

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-057-066

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСУ ДОБАВОК НА ВЛАСТИВОСТІ
ЗМІЦНЕНИХ ЦЕМЕНТОМ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ІЗ ЗАЛІЗИСТИХ
КВАРЦИТІВ

RESEARCH OF COMPLEX ADDITIVE INFLUENCE ON PROPERTIES OF CEMENT
TREATED GRANULAR MIXES OF IRON TAILINGS



Сунь Цзянь, аспірант, кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, e-mail: 1586118851@qq.com

<https://orcid.org/0000-0001-8997-7616>



Жданюк Валерій Кузьмович, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, науковий консультант, ПП «ІСР», Київ, Україна, e-mail: vk.zhdanuk@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0420-7036>

Анотація: В роботі досліджено доцільність використання щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів зміцнених цементом і комплексом добавок (базальтова фібра і катіонний латекс) для будівництва шарів дорожнього одягу автомобільних доріг, що встановлена за результатами експериментальних досліджень показників міцності за стиску, за розколювання по твірній, максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості.

Встановлено, що одночасне введення базальтової фібри і катіонного латексу до складу щебенево-піщаної суміші із залізистих кварцитів зміцнених цементом призводить до зростання показників границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній. Показано, що матеріалу комплексно модифікованому добавками базальтової фібри і катіонного латексу властиві менші значення показника дефектності структури, порівняно з матеріалом зміцненим цементом без добавок. Додаванням базальтової фібри до складу щебенево-піщаної суміші із залізистих кварцитів зміцненої цементом або одночасно базальтової фібри і катіонного латексу, забезпечується підвищений опір матеріалу трішиноутворенню, на що вказує зростання показників максимальної структурної міцності та індексу температурної тріщиностійкості.

Ключові слова: щебенево-піщана суміш, катіонний водний латекс, базальтова фібра, залістий кварцит, границя міцності за стиску, границя міцності за розколювання по твірній, показник дефектності структури, максимальна структурна міцність, індекс температурної тріщиностійкості.

Вступ. В останнє десятиліття щебенево-піщані суміші почали широко використовувати замість щебеню в дорожньому будівництві України для влаштування шарів основи конструкцій дорожніх одягів автомобільних доріг вищих технічних категорій. Для підвищення міцності шарів дорожнього одягу, влаштованих з використанням дискретних мінеральних матеріалів, і зменшення їхньої матеріалоемності, до складу щебенево-піщаних сумішей традиційно додають мінеральні або композиційні органо-мінеральні в'язучі. За високого вмісту цементу, як мінерального в'язучого, матеріал з щебенево-піщаною сумішшю в шарі дорожнього одягу набуває певної міцності і доволі часто стає вразливим до утворення в ньому тріщин [1-3]. Причиною такої поведінки матеріалу із зміцнених цементом щебенево-піщаних сумішей є недостатня його деформативність та міцність за розтягу під час вигину. Наявність тріщин в шарі основи дорожнього одягу в процесі його експлуатації неминуче призводить до утворення віддзеркалених тріщин в асфальтобетонному шарі покриття, влаштованому зверху шару основи, що викликає зменшення довговічності всієї конструкції. Тому підвищення тріщиностійкості шару основи дорожнього одягу з матеріалу із щебенево-піщаною сумішшю, зміцненою додаванням до її складу цементу, має велике практичне значення для запобігання утворенню тріщин в асфальтобетонному шарі покриття.

Дослідженнями встановлено позитивний вплив добавок латексу до складу цементовмісних матеріалів, таких як цементні розчини і цементобетонні суміші, на зростання їхньої рухливості, підвищення водонепроникності цементного бетону завдяки утворенню гідрофобної поверхні порового простору та більш щільної його структури, а також на зростання його механічних властивостей [4-7]. Відомі також результати досліджень будівельних матеріалів які вказують на можливість збільшення показників границі міцності на розтяг за вигину шляхом додавання до їхнього складу фіброволокон [8,9].

Одним із резервів дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування конструктивних шарів дорожнього одягу автомобільних доріг є відходи залізо-рудних підприємств, які утворюються після проходження процесу магнітної сепарації. До таких матеріалів відносяться щебенево-піщані суміші із залістих кварцитів та амфіболітів. Такі відходи виробництва за гранулометричним складом не відповідають вимогам чинних стандартів і тому не можуть у вихідному стані використовуватись для влаштування шарів дорожніх одягів. Для отримання кондиційних щебенево-піщаних сумішей такі відходи виробництва необхідно попередньо розділити на окремі фракції щебеню та піску, після чого отримані складники у певних пропорціях об'єднати шляхом змішування. Проте до сьогодні можливість використання в дорожньому будівництві кондиційних щебенево-піщаних сумішей із залістих кварцитів зміцнених цементом спільно з катіонним латексом та базальтовою фіброю залишається недостатньо дослідженою. Тому поглиблені дослідження впливу комплексної модифікації зміцнених цементом щебенево-піщаних сумішей із залістих кварцитів на їхні міцнісні властивості мають велике практичне значення.

Метою роботи є дослідження впливу комплексу добавок (водного катіонного латексу і базальтової фібри) на властивості матеріалів з щебенево-піщаною сумішшю із залістих кварцитів зміцнених цементом.

Матеріали та методи дослідження. Для виконання досліджень була приготовлена щебенево-піщана суміш ЩПС-40 із залізистих кварцитів. Максимальний розмір зерен щебеню в суміші складав 40 мм. Щебенево-піщану суміш готували шляхом змішування двох складників – щебеню фракції 5-40 мм та піску фракції 0-5 мм з відсіву подрібнення залізистого кварциту. Властивості щебеню та піску із залізистого кварциту наведені в таблиці 1. Гранулометричний склад приготовленої для досліджень щебенево-піщаної суміші відповідає вимогам [10] та наведений в таблиці 2. Як мінеральний в'язучий матеріал для зміцнення щебенево-піщаної суміші використовували портландцемент марки М400, властивості якого наведено в таблиці 3.

Таблиця 1 – Властивості щебеню та піску із залізистих кварцитів

Table 1 – Properties of crushed stone and sand from iron tailings

Фракція, мм	Насипна щільність, кг/м ³	Вміст пилюватих і глиняних часток, %	Вміст зерен пластинчастої та голчастої форми, %	Вологість, %
40-5	1434	0,70	34,5	0,40
5-0	1642	10	-	4,20

Таблиця 2 – Гранулометричний склад щебенево-піщаної суміші ЩПС-40

Table 2 – Grading of granular mix TGM-40

Розмір отворів сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,31 5	0,14	0,071
Вимоги ДСТУ 9177-3 до повних проходів зерен крізь сита для ЩПС-40, %	100-90	80-60	65-35	50-20	40-15	30-10	25-5	20-3	15-2	13-0
Фактичні проходи зерен крізь сита, %	100	75	50	35	25	19	13	8	4	1

Таблиця 3 – Властивості цементу

Table 3 – Cement properties

Час схоплювання, хв.		Границя міцності за стиску, МПа		Границя міцності за вигину, МПа	
Час початкового схоплювання	Час завершення схоплювання	3 доби	28 діб	3 доби	28 діб
176	213	26,3	49,3	4,3	6,9

В процесі виконання досліджень, як модифікуючі добавки до складу щебенево-піщаної суміші ЩПС-40 зміцненої цементом, використовували водний катіонний латекс серії Butonal NS 198 та

базальтову фібру довжиною волокон 18 мм. Катіонний латекс є водною дисперсією білого кольору, яка добре розчиняється у воді. За даними виробника (компанія BASF, Німеччина) катіонному латексу Butonal NS 198 властиві наступні характеристики: густина - 0,96 г/см³, в'язкість - 300 мПа·с, показник рН – 5,3, вміст твердої речовини – 64 %. Базальтова фібра виробництва компанії Zhejiang Haining Anjie Composites Company, як армуюча добавка до складу ЩПС-40, мала діаметр волокон 18±2 мкм, щільність 2650 кг/м³, міцність під час розривання 3500 МПа, видовження під час розривання 3,8 %, модуль пружності 100 ГПа, стійкість до лугів (рівень збереження міцності під час розривання) 92,3 %.

На етапі приготування щебенево-піщаної суміші з цементом до її складу додатково додавали 3, 5 та 10 % латексу Butonal NS 198 від маси води і 0,05 % базальтової фібри від маси мінеральної частини для встановлення ефективності їхнього впливу на властивості матеріалу з ЩПС-40 зміцненого 4 % цементу. Латекс вводили в суміш попередньо розчинивши його в оптимальній кількості води, необхідній для досягнення максимальної щільності матеріалу за його ущільнення. З приготовлених сумішей були заформовані циліндричні зразки статичним ущільненням протягом 3 хвилин за тиску 160 кН. Діаметр і висота зразків становила 100 мм. Тверднення заформованих циліндричних зразків за температури 20 ± 2°C і вологості 95 % протікало протягом 28 діб. Після завершення процесу тверднення зразки піддавали випробуванням. У процесі випробувань експериментально визначали значення границі міцності за одноосьового стиску, границі міцності за розколювання по твірній, показник дефектності структури, показник максимальної структурної міцності та індекс температурної тріщиностійкості.

Значення міцнісних характеристик зразків за стиску та за розколювання по твірній визначали за стандартними методами. Показник дефектності структури досліджуваних матеріалів розраховували як відношення величини границі міцності за стиску ($R_{ст}$) до величини границі міцності за розколювання по твірній (R_p). Величина показника дефектності структури свідчить про міцність структурних зв'язків матеріалу. Чим більша величина показника дефектності структури ($R_{ст}/R_p$), тим слабкіші структурні зв'язки і тим більша кількість мікрodefektів в матеріалі. Для оцінювання здатності матеріалу чинити опір утворенню температурних тріщин розраховували показник максимальної структурної міцності за формулою (1) та індекс температурної тріщиностійкості за формулою (2) [11].

Показник максимальної структурної міцності:

$$R_{mss} = \frac{\bar{R}}{1+1.921 \cdot \lg(R_1/R_2)} \quad (1)$$

де R_1 і R_2 – міцність за розколювання по твірній зразків після термостатування за температури мінус 15 °C протягом 2 годин за швидкості прикладання руйнівного навантаження 3 мм/хв і 10 мм/хв, відповідно;

\bar{R} – середнє значення границі міцності за розколювання по твірній R_1 і R_2 .

Індекс температурної тріщиностійкості:

$$I_T = 1 - \frac{R_0}{R_{mss}} \quad (2)$$

де R_0 – міцність за розколювання по твірній зразків за температури 0 °C за швидкості прикладання руйнівного навантаження 3 мм/хв.

Виклад основного матеріалу. Результати експериментального визначення залежностей границі міцності за стиску та границі міцності за розколювання по твірній матеріалу з ЩПС-40 із залістих кварцитів зміщеної 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри від концентрації (3 %, 5 %, 10 % від маси води) катіонного латексу «Butonal NS 198» наведені на рис.1.

Із наведених залежностей видно, що додавання 0,05 % базальтової фібри до складу ЩПС-40 зміцнених 4 % цементу призводить до збільшення значень границі міцності за стиску (на 9 %) і границі міцності за розколювання по твірній (на 14 %). За одночасного додавання 0,05 % базальтової фібри і катіонного латексу до складу ЩПС-40 зміцнених 4 % цементу спостерігається подальше помірне зростання значень границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній, порівняно з матеріалом без катіонного латексу. Матеріалу зміщеному 4 % цементу з 0,05 % базальтової фібри і 5 % катіонного латексу Butonal NS 198 властиві найбільші значення показників міцності.

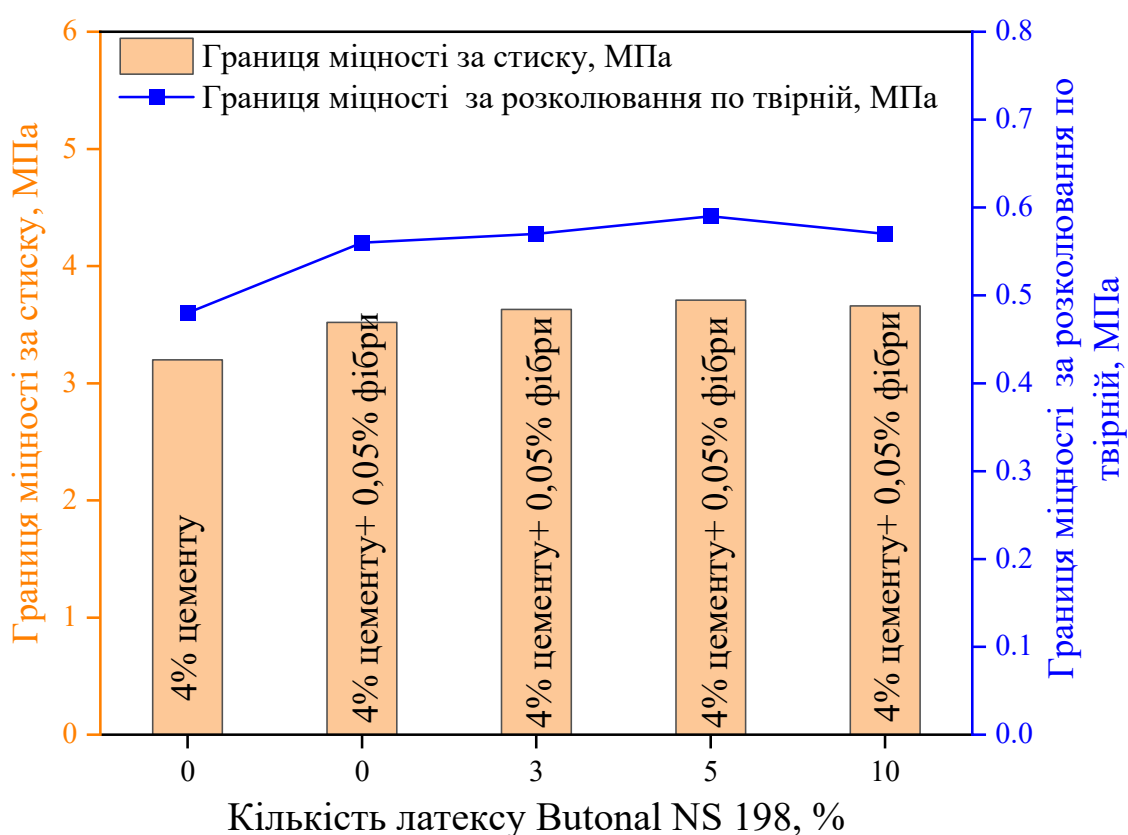


Рисунок 1 – Залежність границі міцності за стиску і границі міцності за розколювання по твірній матеріалу з ЩПС-40 зміщеного 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри від концентрації катіонного латексу

Figure 1 – Dependence of compressive strength and splitting strength of material from TGM -40 treated with 4% cement and 0.05% basalt fiber on the cationic latex content

Залежність розрахованого за результатами експериментальних досліджень показника дефектності структури (R_{cr}/R_p) матеріалу з ЩПС-40 із залізистих кварцитів зміщеної 4 % цементу з 0,05 % базальтової фібри від кількості введеного до його складу катіонного латексу «Butonal NS 198» наведена на рис. 2.

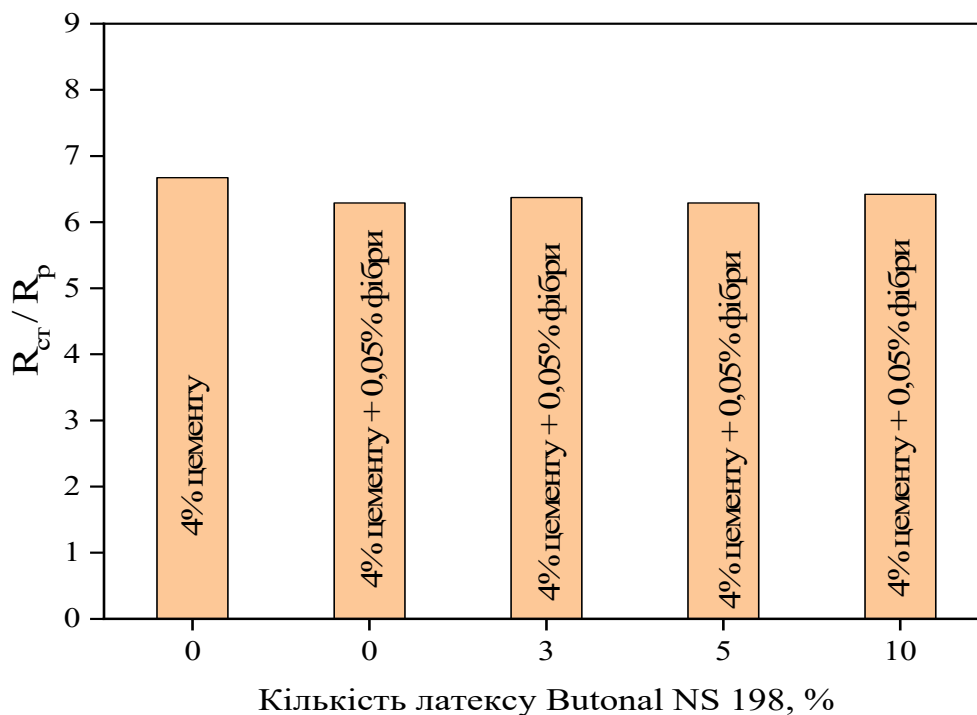


Рисунок 2 – Залежність показника дефектності структури від концентрації катіонного латексу в матеріалі з ЩПС-40 зміщеної 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри

Figure 2 – Dependence of показника дефектності структури on the cationic latex content in the material from TGM -40 treated with 4% cement and 0.05% basalt fiber

Отримані результати досліджень вказують на те, що додавання базальтової фібри і катіонного латексу, як індивідуальних добавок до складу ЩПС-40 зміщеної цементом, а також комплексу цих модифікувальних добавок, викликає зменшення показника дефектності структури матеріалу на 9 – 10 %, порівняно з матеріалом без добавок. Збільшення концентрації катіонного латексу в ЩПС-40 зміщеної 4 % цементу з 0,05 % базальтової фібри практично не впливає на значення показника дефектності структури матеріалу.

Експериментально отримані залежності максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості матеріалів з ЩПС-40 із залізистих кварцитів зміщеної 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри від концентрації катіонного латексу Butonal NS 198 у їхньому складі наведені на рис. 3

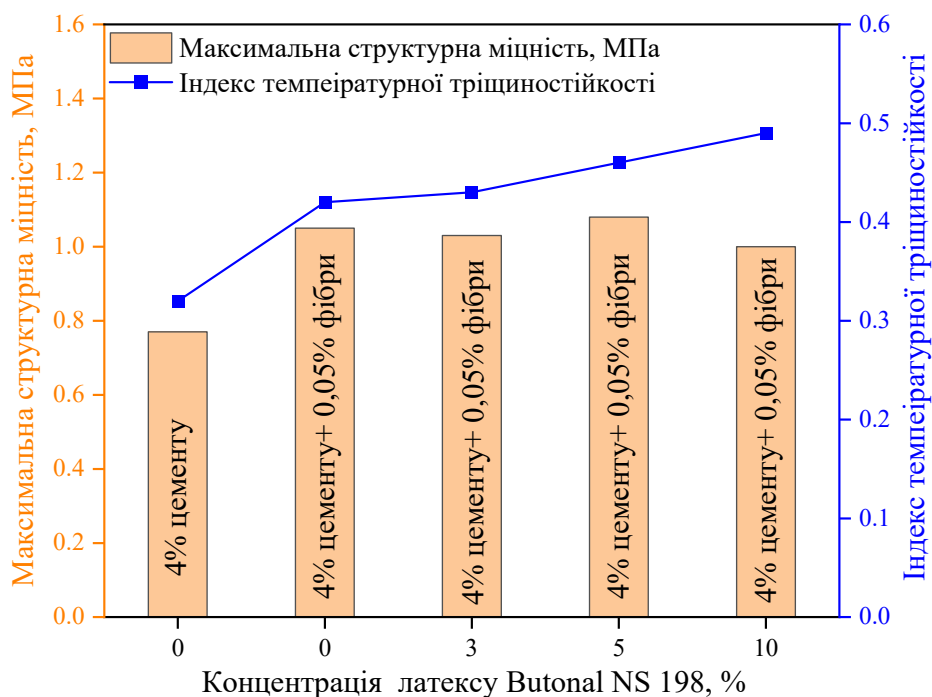


Рисунок 3 – Залежність максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості від концентрації катіонного латексу в матеріалі з ЩПС-40 зміцненої 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри

Figure 3 – Dependence of maximum structural strength and index of temperature crack-resistance on the cationic latex content in the material from TGM-40 treated with 4% cement and 0.05% basalt fiber

З наведених на рис. 3 залежностей видно, що матеріалу з ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцненої 4 % цементу властиві найменші значення максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості. Спостерігається також зростання значень максимальної структурної міцності (на 28 %) і індексу температурної тріщиностійкості (на 24 %) у разі введення до складу матеріалу з ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцненої 4 % цементу добавки базальтової фібри у кількості 0,05 % від маси мінеральної частини. Введення до складу ЩПС-40 із залістистих кварцитів 4 % цементу, 0,05 % базальтової фібри від маси мінеральної частини, а також 3 %, 5 % або 10 % катіонного латексу від маси оптимальної кількості води, практично не впливає на значення максимальної структурної міцності, порівняно з матеріалом з ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцненої 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри. У разі введення 3 % катіонного латексу до складу ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцненої 4 % цементу і 0,05 % базальтової фібри індекс температурної тріщиностійкості зріс всього на 2,3 %, порівняно з матеріалом без латексу. У разі додавання до складу 5 % катіонного латексу вказаний індекс зріс на 8,7 % і за 10 % латексу на 14 %, порівняно з матеріалом без латексу. Аналіз наведених залежностей показує, що введення до складу ЩПС-40 зміцненої 4 % цементу одночасно добавок базальтової фібри та 3 %, 5 % і 10 % латексу викликає зростання значень індексу температурної тріщиностійкості на 25,6 %, 30,4 % і 34,7 %, відповідно. Отримані результати вказують на те, що матеріалам з ЩПС-40 зміцненої одночасно цементом і комплексом досліджуваних добавок властиві найбільші значеннями максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості і, відповідно, більша здатність чинити опір утворенню в них тріщин.

Висновки

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що введення комплексу досліджуваних добавок (0,05 % базальтової фібри + 5 % катіонного латексу) до складу щебенево-піщаної суміші із залізистих кварцитів зміцненої 4 % цементу призводить до найбільшого зростання показників границі міцності за стиску (на 10 %) і границі міцності за розколювання по твірній (на 18 %). Міцнісні показники за розколювання по твірній, як критерії ефективності впливу комплексу добавок на властивості матеріалу, виявилися більш чутливими, порівняно з показниками міцності за стиску. Показано, що матеріалу модифікованому комплексом досліджуваних добавок притаманні менші значення показника дефектності структури, порівняно з матеріалом зміцненим цементом без добавок. Чим менша величина показника дефектності структури, тим менша присутність мікрodefektів в матеріалі і, відповідно, більша його щільність і міцність.

Встановлено, що додавання базальтової фібри до складу щебенево-піщаної суміші із залізистих кварцитів з цементом або одночасно базальтової фібри і катіонного латексу, викликає зростання показників максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості. Більші значення максимальної структурної міцності і індексу температурної тріщиностійкості, що властиві матеріалам з щебенево-піщаної суміші зміцненої цементом одночасно з комплексом досліджуваних добавок, вказують на більшу їхню тріщиностійкість.

Перелік посилань

1. Y. Zheng, P. Zhang, Y. Cai, Z. Jin, and E. Moshtagh, "Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam", *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp.
2. Y. Yang, J. Zheng, S. Lv, Research on differences and correlation between tensile, compression and flexural moduli of cement stabilized macadam, *Frattura Ed Integrità Strutturale* 41 (2017) 339–349.
3. S. Du, Influence of chemical additives on mixing procedures and performance properties of asphalt emulsion recycled mixture with reclaimed cement stabilized macadam, *Constr. Build. Mater.* 118 (2016) 146–154.
4. S. Zhong and Z. Chen, "Properties of latex blends and its modified cement mortars", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 10, pp. 1515–1524, 2002.
5. W. Shen, L. Shan, T. Zhang, H. Ma, Z. Cai, and H. Shi, "Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 667– 674, 2013.
6. D.V. Gemert, L. Czarnecki, M. Maultzsch et al., "Cement concrete and concrete-polymer composites: two merging words: a report from 11th ICPIC Congress in Berlin, 2004", *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 9-10, pp. 926–933, 2005.
7. R. Ollitrault-Fichet, C. Gauthier, and G. Clamen, "Micro structural aspect in a polymer-modified cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 28, no. 12, pp. 1687–1693, 1998.
8. Chakraborty, Sumit, Byung-Wan, et al. Hydration study of the polymer modified jute fibre reinforced cement paste using analytical techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2015.
9. Жданюк В.К., Лапченко А.С., Шрестха Р.Б., Панасюк Я.І. Дослідження властивостей цементогрунту різних марок з добавками латексу Butonal NS 198 та поліпропіленової фібри // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні комп'ютерно-інноваційні технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг і аеродромів».- Харків, ХНАДУ.- 2012.- С.129-134.*

10. ДСТУ 9177-3:2022 Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими.

11. Concretes on organohydraulic binders. Technical specifications: STB 1415-2003. - Minsk: Gosstandart, 2003. - 20 p.

RESEARCH OF COMPLEX ADDITIVE INFLUENCE ON PROPERTIES OF CEMENT TREATED GRANULAR MIXES OF IRON TAILINGS

Jian Sun, PhD student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Department of Automobile Road Construction and Maintenance, Kharkiv, Ukraine e-mail: 1586118851@qq.com, tel. +380638649819, <https://orcid.org/0000-0001-8997-7616>.

Valeriy Zhdaniuk, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, scientific consultant, ICP Company, Kyiv, Ukraine, e-mail: vk.zhanuk@gmail.com, tel.+380679632807, <https://orcid.org/0000-0003-0420-7036>.

Summary. Practicability of granular mixes of iron tailings treated with cement and complex additives (basalt fiber and cationic latex) application for construction of road pavements has been studied by the results of experimental research of compressive strength, splitting strength, maximum structural strength and temperature crack-resistance index.

Simultaneous application of basalt fiber and cationic latex to the composition of granular mix of iron tailings treated with cement has been found to increase compressive strength and splitting strength. It was proved that the material modified with basalt fiber and cationic latex had lower structural defect index compared to the material treated with cement only. Addition of basalt fiber to granular mix from iron tailings treated with cement or both basalt fiber and cationic latex results in higher crack-resistance as indicated by increase of the maximum structural strength and the temperature crack-resistance index.

Keywords: granular mix, cationic aqueous latex, basalt fiber, iron tailings, compressive strength, splitting strength, structural defect index, maximum structural strength, temperature crack-resistance index.

References

1. Y. Zheng, P. Zhang, Y. Cai, Z. Jin, and E. Moshtagh, "Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam", *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp. [in English].

2. Y. Yang, J. Zheng, S. Lv, Research on differences and correlation between tensile, compression and flexural moduli of cement stabilized macadam, *Frattura Ed Integrità Strutturale* 41 (2017) 339–349. [in English].

3. S. Du, Influence of chemical additives on mixing procedures and performance properties of asphalt emulsion recycled mixture with reclaimed cement stabilized macadam, *Constr. Build. Mater.* 118 (2016) 146–154. [in English].

4. S. Zhong and Z. Chen, "Properties of latex blends and its modified cement mortars", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 10, pp. 1515–1524, 2002. [in English].

5. W. Shen, L. Shan, T. Zhang, H. Ma, Z. Cai, and H. Shi, "Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 667– 674, 2013. [in English].

6. D.V. Gemert, L. Czarnecki, M. Maultzsch et al., “Cement concrete and concrete-polymer composites: two merging words: a report from 11th ICPIC Congress in Berlin, 2004”, Cement and Concrete Composites, vol. 27, no. 9-10, pp. 926–933, 2005. [in English].
7. R. Ollitrault-Fichet, C. Gauthier, and G. Clamen, “Micro structural aspect in a polymer-modified cement”, Cement and Concrete Research, vol. 28, no. 12, pp. 1687–1693, 1998. [in English].
8. Chakraborty, Sumit, Byung-Wan, et al. Hydration study of the polymer modified jute fibre reinforced cement paste using analytical techniques[J]. Construction and Building Materials, 2015. [in English].
9. Жданюк В.К., Лапченко А.С., Шрестха Р.Б., Панасюк Я.І. Дослідження властивостей цементогрунту різних марок з добавками латексу Butonal NS 198 та поліпропіленової фібри // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні комп’ютерно-інноваційні технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг і аеродромів».- Харків, ХНАДУ.- 2012.- С.129-134. [in Ukrainian].
10. ДСТУ 9177-3:2022 Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в’язучими. [in Ukrainian].
11. Concretes on organic and hydraulic binders. Technical specifications: STB 1415-2003. - Minsk: Gosstandart, 2003. - 20 p. [in Belorussian].