

НАДСТІЙКІ КАТІОННІ БІТУМНІ ЕМУЛЬСІЇ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛІНГУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

SUPER-STABLE CATIONIC BITUMEN EMULSIONS FOR COLD RECYCLING TECHNOLOGY OF PAVEMENT

Сідун Ю.В., к.т.н., доц.,[0000-0003-3606-6899] **Бідось В.М., аспірант**[0000-0002-2395-2042] **Гунька В.М., д.т.н., доц.,** ..[0000-0002-3480-0693] **Куліков Д.О. аспірант**[0009-0006-2554-5295] (Національний університет "Львівська політехніка"),

I.V. Sidun, Ph.D., associate professor, V.M. Bidos, postgraduate student, V. M. Gunka Ph.D., D.Sc., associate professor, D. O. Kulikov, postgraduate student (Lviv Polytechnic National University, Department of Highways and Bridges, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing)

У статті наведені результати дослідження впливу комплексного в'язучого, що складається із бітумної емульсії та портландцементу на фізико-механічні показники матеріалів виготовлених за технологією холодного ресайклінгу.

The article presents the results of a study on the effect of a composite binder consisting of bitumen emulsion and Portland cement on the physical and mechanical properties of materials produced by cold recycling technology. It discusses the feasibility of using super-stable cationic bitumen emulsions for mixtures produced by this method.

Super-stable cationic bitumen emulsions are defined as emulsions that exhibit high resistance to decomposition, low reactivity with the mineral components of the mixture or individual aggregates, and high storage stability.

It was found that the compressive strength at 3 days in mixtures containing bitumen emulsion (at different dosages) was lower than in mixtures without it. However, by 7 days, the strength of the mixtures with emulsion surpassed that of those containing only the mineral binder. This trend continued after 28 days of curing. Thus, the cationic emulsion delays the initial hardening of the cement but does not reduce the final strength of the samples.

Furthermore, the delayed heat of hydration can result in reduced shrinkage and improved crack resistance of the layer.

The highest compressive strength at 20°C and 50°C, along with the lowest water absorption, were observed in samples containing Portland cement and 2% bitumen emulsion with the Redicote 4875 NPF emulsifier. This is

expected, as this bitumen emulsion provides superior resistance to decomposition.

In terms of bitumen emulsion dosage efficiency, all performance indicators were optimized when the emulsion content in the composite binder was at 2% by weight.

Overall, the addition of bitumen emulsion slows the hardening of Portland cement, enabling longer transportation times for the mixture when produced "at the plant," and allowing for extended timeframes for laying, profiling, and compacting operations.

Ключові слова: фрезерований матеріал, бітумна емульсія, портландцемент, матеріали виготовлені за технологією холодного ресайклінгу.

milled material, bitumen emulsion, portland cement, materials made using cold recycling technology.

Вступ. Внаслідок воєнних дій сьогодні в Україні значна частина автомобільних доріг та вулиць потребують капітального ремонту із заміною, як дорожнього покриття, так і шарів основи дорожнього одягу. Для цих потреб добре відпрацьованою в Україні є технологія холодного ресайклінгу, що дає можливість повторного використання матеріалів із пошкоджених чи зруйнованих шарів дорожньої конструкції [1-6].

Аналіз останніх досліджень. Попередні дослідження [7-12] показали доцільність застосування надстійких катіонних бітумних емульсій (БЕ) для різних дорожніх технологій. Під надстійкими катіонами емульсіями (super-stable (over-stabilised) cationic emulsions emulsions) розуміємо емульсії, які проявляють високу стійкість до розпаду та є низько реактивними по відношенню до мінеральної частини сумішей чи окремих кам'яних матеріалів та володіють високими показниками стійкості під час зберігання. Такий вид емульсій використовують для дорожніх сумішей в яких присутній тонкодисперсний мінеральний матеріал, який може виступати у вигляді в'язучого (як правило портландцемент) або наповнювача. Однією з таких технологій і є холодний ресайклінг дорожнього одягу [13-18]. Надстійкі емульсії є особливо доцільними для технології холодного ресайклінгу «на заводі», що передбачає транспортування готової суміші до місця укладання . Це може стати проблемою коли змішувальна установка знаходиться на значній відстані від дорожньо-будівельного майданчика, внаслідок чого емульсія може розпастися під час транспортування. ДСТУ 8976:2020 [19] регламентує, що термін від початку приготування суміші виготовленої за технологією холодного ресайклінгу (СХР) до ущільнення в шарі дорожнього одягу не повинен перевищувати 2 год. Окрім цього у технології холодного ресайклінгу часто використовують комплексне (комбіноване) в'язуче, що поєднує, як правило емульсію і портландцемент. Саме надстійкі емульсії демонструють хорошу змішуваність із портландцементом. Знову ж

тужавлення портландцементу повинно починатися не раніше ніж через 2 год після змішування його з водою. У разі початку тужавлення цементу раніше ніж через 2 год до суміші потрібно додавати добавки, що сповільнюють тужавлення.

Постановка мети та задач досліджень. Метою даної роботи є проєктування та дослідження СХР та матеріалу дорожнього виготовленого за методом холодного ресайклінгу (МДХР), на основі надстійких катіонних бітумних емульсій в комплексі з портландцементом.

Методика досліджень. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 [20] досліджувались такі фізико-технічні показники бітумних емульсій: зовнішній вигляд; показник концентрації водневих іонів; однорідність (залишок на ситі № 014), вміст залишкового в'язучого, умовна в'язкість, с, при 20 °С на апараті з діаметром отвору 4 мм; стійкість при зберіганні: залишок на ситі №014;індекс розпаду. За ДСТУ EN 12848:2020 [21] встановлювали стійкість при змішуванні із портландцементом, а за ДСТУ EN 13075-2:2020 [22] час (стан) до розпаду, та за ДСТУ EN 12847:2020 [23] схильність до розшарування.

Для дослідження МДХР було використано ФМ асфальтобетонного покриття виготовлений із гарячої, дрібнозернистої, щільної суміші типу А, на бітумі немодифікованому марки БНД 70/100 та портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 та воду. Визначення вмісту органічного в'язучого у фрезерованому матеріалі (ФМ) здійснювали методом випалювання, а встановлення гранулометричного складу ФМ проводили за допомогою методу ситового аналізу згідно з ДСТУ Б В.2.7-319 [24]. Для МДХР встановлювали такі фізико-механічні властивості: середню густину, водонасичення, границю міцності при стиску за температур 20 і 50 °С згідно ДСТУ 8977:2020 [12] на 3, 7, 28 добу. Для виготовлення бітумних емульсій було використано бітум 70/100 ORLEN, (Польща), воду, хлоридну кислоту (13% розчин HCl) та емульгатори аміного типу: Redicote NPF4875, Redicote E-11, Redicote C320 E.

Результати досліджень. Для проєктування МДХР було запроєктовано склади катіонної бітумної емульсії , що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Склади катіонних бітумних емульсій

№ бітумної емульсії	Вміст бітуму, %	Емульгатори		Тип кислоти	рН у водній фазі
		Тип	Вміст, %		
1	60	Redicote E-11	1,2	HCl	2,5
2		Redicote E-4875 NPF	1,2		
3		Redicote C320 E	1.2		

Для запроєктованих бітумних емульсій визначались фізико-технічні показники наведені в табл.2. Показники від 8 до 11 в табл.2, є основними для встановлення стійкості емульсії до розпаду, а показник 6-7 визначають характеристики за зберігання.. За показником стійкості емульсії при

зберіганні всі емульсії можуть зберігатись, як мінімум 30 діб, але найкращу стійкість за зберігання демонструє емульсія складу №2.Redicote E-4875 NPF. Результати схильності до розшарування на 7 добу також вказують на те, емульсія складу №2.Redicote E-4875 NPF є найменш схильною до розшарування.

Таблиця 2

Показники бітумних емульсій

Найменування показника	№ складу бітумної емульсії із емульгатором			Вимоги ДСТУ Б В.2.7-129:2013 для ЕКП-60 [20]
	1.Redicote E-11	2.Redicote E-4875 NPF	3.Redicote C320 E	
1. Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина			
2. Показник концентрації водневих іонів, рН	5,2	3,66	3,06	1,5-6,5
3. Однорідність (залишок на ситі № 014), %,	0,02	0,06	0,03	не більше 0,25
4. Вміст залишкового в'язучого, %	59,35	59,42	59,91	58-62
5. Умовна в'язкість, с, при 20 °С на апараті з діаметром отвору 4 мм	8,2	9,6	8,8	Від 5 до 25
Характеристики стійкості за зберігання				
6. Стійкість при зберіганні: залишок на ситі №014, %, не більше:				
- після 7 д	0,08	0,02	0,02	0,30
- після 30 д	0,04	0,02	0,03	0,40
7. Схильність до розшарування (7 доба), %	1,83	1,35	1,88	-
Характеристики розпаду				-
8. Індекс розпаду, %	242,88	306,33	282,45	170-230
9.Змішуваність із сумішами пористого та щільного зернових складів, так/ні	так/так	так/так	так/так	так/так
10. Час (стан) до розпаду, с	257	>300	291	-
11. Стійкість призмішуванні із портландцементом, г	1,47	0,12	64,21	-

Усі запроектовані бітумні емульсії відмінно змішались із сумішами пористого та щільного зернових складів та за індексом розпаду згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 [20] продемонстрували значення більше 230 %. Відповідно за індексом розпаду їх не можемо віднести до повільнорозпадних, зокрема до марки ЕКП-60. Час (стан) до розпаду найдовший у емульсії №2 Redicote E-4875 NPF і за ДСТУ EN 13808:2020 [25] її відносимо до 8 класу (> 300 с), а інші емульсії до 7 класу (≥ 180 с). Щодо стійкості при змішуванні із портландцементом то емульсія №3.Redicote C320E показала негативну стійкість із портландцементом, це означає, що вона дуже швидко з ним взаємодіє. За ДСТУ EN 13808:2020 [25] цю емульсію відносимо до 9 класу (> 2) за змішуваністю із портландцементом, а інші до 10 класу (≤ 2). Підсумовуючи, за характеристиками розпаду (пункти від 8 до 11 табл.2) та характеристиками стійкості за зберігання, найкращими показниками володіє емульсія складу №2.Redicote E-4875 NPF.

Для ФМ вміст органічного в'язучого склав 6,47% мас., а результати визначення гранулометричного складу показано на рис.1. Отримані результати свідчать про можливість використання ФМ для МДХР ДСТУ 8976:2020 [19]

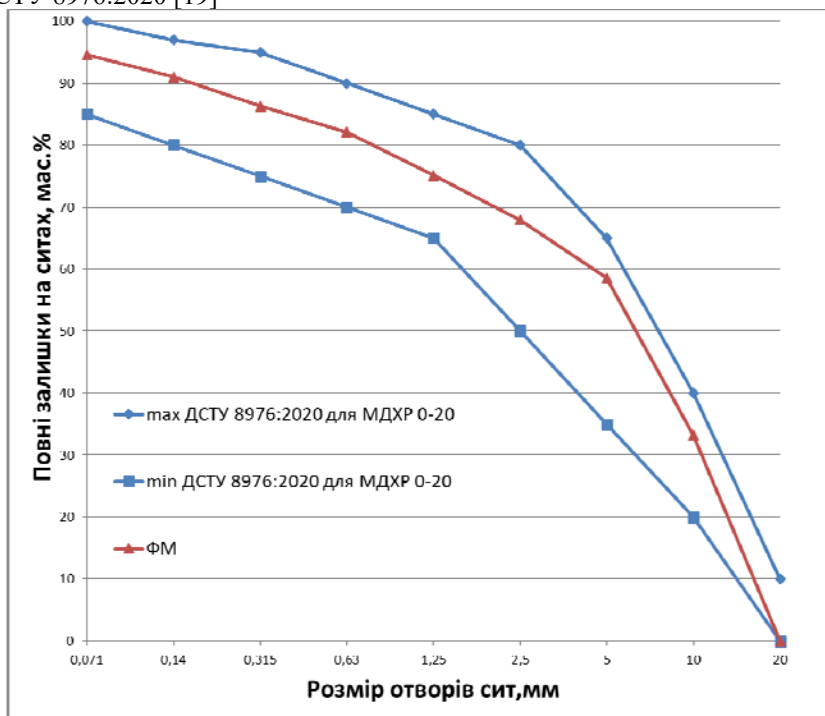


Рис. 1 Гранулометричний склад ФМ

Для досліджень було запроектовано сім складів МДХР (табл.3). В ролі комплексного в'язучого виступили три склади БЕ за дозування 1,5 % мас та три за дозування 2,0 % мас та портландцемент із вмістом 3,0 % мас., також додавали воду на рівні 3,0 % мас.. Для порівняння був запроектований склад СХР тільки на мінеральному в'язучому – портландцементі.

Таблиця 3

Запроектовані склади

Маркування	Вміст компоненту у СХР, % мас			
	ФМ	БЕ	Портландцемент ПЦ II/A-III-400 (ПЦ)	Вода
Без емульсії	100,0	-	3,0	3,0
Redicote 4875 NPF-1,5		1,5		
Redicote E11-1,5				
Redicote C 320E-1,5				
Redicote 4875 NPF-2,0		2,0		
Redicote E11-2,0				
Redicote C 320E-2,0				

Виготовлені зразки МДХР досліджувались на 3, 7 та 28 добу після виготовлення (табл.4). Аналіз табл.4 свідчить, що показник водонасичення на 7 та 28 доби зростає через гідратацію ПЦ, за якої виділяється більше гідратів, які не завжди щільно заповнюють пори. Крім того з'являються мікропори та мікротріщини через усадку, як наслідок структура стає більш пористою або капілярно відкритою, тому водонасичення зростає.

Границя міцності на стиск на 3 добу у СХР із БЕ (за різного дозування) є меншою ніж у зразків без неї, але вже на 7 добу навпаки міцність є вищою ніж у СХР тільки на мінеральному в'язучому. Така тенденція зберігається і 28 добу тверднення. Відповідно катіонна БЕ у МДХР сповільнює початкове тужавіння цементу, але не знижує кінцеву міцність зразків. Також сповільнене гідратаційне тепло може забезпечувати меншу усадку та кращу тріщиностійкість шару. Найвища границя міцності за стиску за температури 20°C та 50°C і найнижчі показники водонасичення спостерігаються на зразках МДХР із ПЦ та 2% БЕ із емульгатором Redicote 4875 NPF.. Це є закономірним оскільки, саме ця БЕ забезпечує найкращу стійкість до розпаду. Щодо ефективності дозування БЕ то усі показники МДХР є кращими за вмісту емульсії у комплексному в'язучому на рівні 2 % мас В загальному БЕ сповільнює тужавіння ПЦ, що призводить до більшого часу транспортування СХР у випадку її виготовлення «на заводі» та більшого часу на технологічні операції укладання, профілювання та ущільнення шару.

Таблиця 4

Зміна фізико-механічних характеристик МДХР в часі

Найменування показників		ФМ+Н ₂ О О 3%+ ПЦ 3%	ФМ+Н ₂ О 3%+ ПЦ 3%+БЕ (Redicote 4875 NPF)		ФМ+Н ₂ О 3%+ ПЦ 3% + БЕ (Redicote E11)		ФМ+Н ₂ О 3%+ ПЦ 3%+БЕ (Redicote C 320E)	
			1,5 %	2,0 %	1,5 %	2,0 %	1,5 %	2,0 %
Середня густина, т/м ³	3	2,27	2,28	2,28	2,27	2,27	2,27	2,27
	7	2,28	2,28	2,28	2,26	2,28	2,27	2,27
	28	2,28	2,28	2,28	2,27	2,28	2,27	2,27
Водонасичення, % за об'ємом	3	3,3	3,5	3,2	3,7	3,1	3,6	3,3
	7	5,2	5,9	5,2	5,7	4,2	5,9	6,0
	28	5,6	6,0	5,4	6,6	5,9	6,3	6,0
Границя міцності за стиску, МПа за темпера- тури:	20°C	3	1,6	1,3	1,5	1,2	1,5	1,3
		7	2,2	2,9	3,1	2,5	2,3	3,1
		28	3,1	3,3	3,5	3,2	3,4	3,4
	50°C	3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,4	0,4
		7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7
		28	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9

Висновки. Запроектовано та виготовлено бітумні емульсії, які можна за відповідними характеристиками розпаду віднести до надстійких. Досліджено фрезерований матеріал на можливість застосування, як заповнювача для технології холодного ресайклінгу. Запроектовано шість складів сумішей для холодного ресайклінгу на основі комплексного в'язучого із емульсіями трьох складів за їх дозування в суміш на рівні 1,5 та 2, 0 % мас. та з додаванням портландцементу 3% мас. Для порівняння запроектований склад суміші виготовленої за методом холодного ресайклінгу на мінеральному в'язучому. Встановлено, що бітумна емульсія, яка за характеристики стійкості за зберігання та розпаду є оптимальною серед досліджених дає можливість запроектувати МДХР з найменшими показниками водонасичення і з підвищеною границею міцності за температури 20°C та 50°C.

Подяка Дана робота виконана в рамках реалізації проекту «Інноваційні комплексні підходи для відновлення транспортних споруд» від Національного фонду досліджень України (грант № 2023.05/0026).

1. Гамеляк І.П., Дмитриченко А.М., Журавський Д.Л. Підвищення якості регенованого асфальтобетону // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво:

науковий журнал. Київ, 2022. Вип. 112. с. 21-32. DOI: 10.33744/0365-8171-2022-112-021-032

2. Ільченко В. В., Демченко О. В., Міщенко Р. А. Фізико-механічні властивості гарячих рецикльованих асфальтобетонних сумішей на основі фрезерованого асфальтобетону з додаванням пластикової фібри // *Дороги і мости* : зб. наук. пр. Київ, 2021. Вип. 23. С. 76–85

3. Ilchenko V., Kariuk A., Mishchenko R., Shevchenko A. Prospects for the production of recycled hot mix asphalt with plastic fiber // *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. 2023. Transportation science and technology :

proceedings of the 13th International conference TRANSBALTICA, September 15–16, 2022, Vilnius, Lithuania. P 336–343.

4. Iurii Sidun, Khrystyna Sobol, Yurii Novytskyi & Andriy Helesh. Bitumen Emulsion with Hydrochloric and Orthophosphoric Acid in the Technology of Cold Recycling of Road Pavement—Comparison. International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów. CEE 2023: Proceedings of CEE 2023 pp 409–418. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_41

5. Дубик, О. М. (2014). Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежосткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу. *Проблеми розвитку міського середовища*, (1), 465-473.

6. Головка, С. К. (2021). Дослідження способів повторного використання дорожньо-будівельних матеріалів при ремонті дорожніх одягів капітального типу. *Збірник наукових праць «Дороги і мости*, (24), 60-71.

7. Sobol K., Sidun I., Hunyak O., Protsyk I., Bidos V. Cationic over-stabilised bitumen emulsion in road construction – review // *Theory and Building Practice*. – 2023. – Vol. 5, № 1. – P. 49–55.

8. Bidos V., Sidun I., Sobol K., Rybchynskyi S. Over-stabilized bitumen emulsions made from emulsifiers for slow-setting emulsions // *Theory and Building Practice*. – 2023. – Vol. 5, № 2. – P. 42–47.

9. Бідось В. М., Сідун Ю. В. Бітумні катіонні емульсії для технології холодного ресайклінгу дорожнього одягу // *Молодь – драйвери відновлення країни* : збірник тез доповідей третьої всеукраїнської наукової конференції молодих вчених, 15 травня 2024 р., Київ. – 2024. – С. 21–24.

10. Сідун Ю. В., Бідось В. М. Характеристики розпаду катіонних бітумних емульсій // *Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації* : матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції, 23–24 листопада 2023 р., Харків. – 2023. – С. 169–173.

11. Сідун Ю. В., Бідось В. М., Волліс О. Є., Станчак С., Гунька В. М. Надстійкі катіонні бітумні емульсії – новий вид емульсій для України // *Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості* : матеріали XI Міжнародна науково-технічної конференції (Львів, 16–20 травня 2022 р.). – 2022. – С. 91–93.

12. Волліс О. Є. Надстійкий емульгатор для катіонних бітумних емульсій / О. Є. Волліс, Ю. В. Сідун // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* [Текст] : зб. наук. пр. / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т ; [редкол.: Богомолов В. О. (голов. ред.) та ін.]. - Харків : ХНАДУ, 2017. – Вип. 79. – С. 62–65.

13. Liu, Z., Huo, J., & Wang, Z. Investigation on Properties of Cement Bitumen Emulsion Mortars (CBEM) in Consideration of Emulsifier Types. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/4820938>

14. Grilli, A., Graziani, A., & Bocci, M. Compactability and thermal sensitivity of cement-bitumen-treated materials. *Road Materials and Pavement Design*, 2012. 13(4), 599-617., DOI: 10.1080/14680629.2012.742624
 15. Grilli, A., Bocci, E., & Graziani, A. . Influence of reclaimed asphalt content on the mechanical behaviour of cement-treated mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 2013. 14(3), 666-678., DOI: 10.1080/14680629.2013.794367
 16. Grilli, A., Cardone, F., & Bocci, E. Mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials containing different amounts of reclaimed asphalt. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018. 22(7), 836-851., DOI: 10.1080/19648189.2016.1219972
 17. Grilli, A., Graziani, A., Bocci, E., & Bocci, M. . Volumetric properties and influence of water content on the compactability of cold recycled mixtures. *Materials and Structures*, 2016. 49, 4349-4362, doi:10.1617/s11527-016-0792-x.
 18. Pasetto, M., Baldo, N. Cold Recycling with Bitumen Emulsion of Marginal Aggregates for Road Pavements.. *Lect. Notes. Civ. Eng.*, 2020 vol. 48, 155–163. 10.1007/978-3-030-29779-4_15
 19. ДСТУ 8976:2020 Матеріали дорожні, виготовлені за технологією холодного ресайклінгу. Технічні умови
 20. ДСТУ Б В.2.7-129:2013 Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови
 21. ДСТУ EN 12848:2020 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення стійкості бітумних емульсій під час змішування з цементом (EN 12848:2009, IDT)
 22. ДСТУ EN 13075-2:2020 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення характеристик розпаду. Частина 2. Визначення часу перемішування катіонних бітумних емульсій із заповнювачем тонких фракцій (EN 13075-2:2016, IDT)
 23. ДСТУ EN 12847:2020 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення схильності бітумних емульсій до розшарування (EN 12847:2009, IDT)
 24. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань
 25. ДСТУ EN 13808:2020 Бітум та бітумні в'язучі. Структура технічних вимог до катіонних бітумних емульсій (EN 13808:2013, IDT)
- volodymyr.m.bidos@lpnu.ua