

УДК 625.7/8

А. В. Седов*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

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

О. О. Фоменко

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

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

*автор-кореспондент, e-mail: avs.1708@ukr.net

Дослідження впливу пластифікації та фракціонування грануляту на властивості матеріалу, виготовленого за технологією холодного ресайклінгу

Цитувати як:

Седов, А. В., Фоменко, О. О. (2025). Дослідження впливу пластифікації та фракціонування грануляту на властивості матеріалу, виготовленого за технологією холодного ресайклінгу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 417-426. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-36](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-36)

© 2025, Седов, А. В., Фоменко, О. О.

Традиційно ремонт покриття проводять шляхом вирівнювання покриття асфальтобетонною сумішшю з влаштуванням додаткового шару зносу.

У статті приділено увагу питанням технології холодної регенерації асфальтобетону, яка полягає у подрібненні матеріалу покриття (у деяких випадках із захопленням частини основи) переважно за допомогою холодного фрезерування.

Холодна регенерація асфальтобетонних покриттів вигідно відрізняється від традиційних способів ремонту, насамперед своєю економічністю. Ця технологія дозволяє найбільш ефективно використовувати матеріал старого дорожнього одягу, усунувати тріщини у старому покритті на всю або більшу частину глибини, що уповільнює появу тріщин на новому покритті. Крім того, проведення робіт без розігріву матеріалу завдає мінімальної шкоди навколишньому середовищу.

Істотна особливість таких матеріалів – залежність їх властивостей від структури, яка визначається кількістю та якістю зерен асфальтобетонного грануляту, їх взаємним розташуванням та характером зв'язків між ними.

Стосовно сумішей, виготовлених за технологією холодного ресайклінгу, важливий напрямок регулювання процесу їх структуроутворення з метою підвищення щільності є підвищення технологічності суміші в процесі ущільнення за рахунок зниження міцності контактів і поліпшення рухливості гранул. Умовою досягнення найбільш щільної упаковки гранул є досягнення їх найбільшої рухливості на стадії формування структури матеріалу шляхом пластифікації.

У структуроутворенні сумішей, виготовлених за технологією холодного ресайклінгу, важливу роль відіграють кристалізаційні контакти, що утворюються при твердінні цементу, який вводиться разом з водою та утворює цементне тісто або пасту.

В роботі були проаналізовані різні варіанти складів сумішей, виготовлених за технологією холодного ресайклінгу, на основі асфальтобетонного грануляту без додавання та з додаванням цементу в межах від 1,5 % до 6 % та пластифікатора у кількості 0,02-0,04 % від маси цементу. При додаванні водного розчину пластифікатора міцність фрезерованого матеріалу, майже в 1,5 рази більша, ніж у складах без пластифікатора.

Ключові слова: капітальний ремонт, регенерація, асфальтобетонний гранулят, пластифікація, цемент, міцність

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. При капітальному ремонті автомобільних доріг знаходять поширення методи регенерації та повторного використання матеріалів дорожнього одягу. Регенерація асфальтобетонних покриттів вигідно відрізняється від традиційних способів ремонту насамперед своєю економічністю. Ця технологія дозволяє найбільш ефективно використовувати матеріал, який отриманий після фрезерування старого одягу, усувати тріщини у старому покритті на всю або більшу частину глибини, що уповільнює появу тріщин на новому покритті [1].

Проведений аналіз показав, що з урахуванням основних видів пошкоджень доріг найбільше доцільно використовувати технологію холодної регенерації в установці.

Дана технологія як спосіб ремонту дорожнього одягу має низку очевидних переваг [2]:

- виключена необхідність вивезення матеріалу старого покриття, що видаляється, і доставки свіжої гарячої асфальтобетонної суміші;

- не потрібно складувати віддалений матеріал поблизу ділянки, що ремонтується, що не завжди можливо, особливо в місті;

- не потрібно розігрівати старе покриття до «блакитного серпанку», як це робилося за технологією гарячої термофрезерної регенерації, що важливо як з погляду економії енергії, так і охорони навколишнього середовища;

- витрати бітуму набагато менше, ніж при облаштуванні нового покриття;

- повністю використовується старий кам'яний матеріал (для поліпшення зернового складу суміші до нього може бути доданий новий щебінь) [3, 4].

При фрезеруванні пакету бітумомінеральних шарів в склад асфальтобетонного грануляту потрапляють матеріали різних складів, з

різним ступенем старіння бітуму. Асфальтобетонний гранулят містить зерна крупністю до 40 мм, кількість зерен дрібніша за 0,14 мм зазвичай дуже низька. Асфальтобетонний гранулят може містити в тому чи іншому співвідношенні щебні, оточені розчинною частиною (пісок + асфальтова в'язуча речовина), гранули, гранули з асфальнової речовини і окремі мінеральні зерна, вкриті повністю, частково або не покриті бітумом (рис. 1).

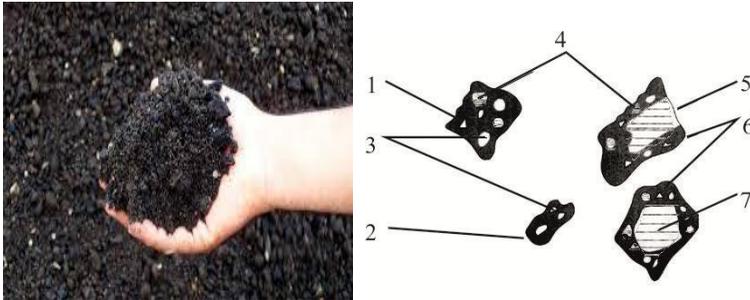


Рис. 1 Схема структури асфальтобетонного грануляту

1 – розчинна гранула; 2 – асфальтове в'язуче; 3 – повітряна пора;
4 – піщинка; 5 – скол щебінки; 6 – щебенева гранула; 7 – щебінка

Істотна особливість таких матеріалів – залежність їх властивостей від структури, яка визначається кількістю та якістю зерен асфальтобетонного грануляту, їх взаємним розташуванням та характером зв'язків між ними.

Стосовно сумішей, виготовлених за технологією холодного ресайклінгу (СХР), важливий напрямок регулювання процесу їх структуроутворення з метою підвищення щільності є підвищення технологічності суміші в процесі ущільнення за рахунок зниження міцності контактів і поліпшення рухливості гранул [5].

Мета і завдання дослідження. Технологія глибокої холодної регенерації дорожнього покриття дозволяє ефективно повторно використовувати матеріали старого дорожнього одягу. Проведення відновлювальних робіт без розігріву старого матеріалу завдає мінімальної шкоди навколишньому середовищу та різко знижує енерговитрати. Таким чином метою роботи є вдосконалення технології холодної регенерації за рахунок покращення властивостей переробленого фрезерованого матеріалу.

Матеріали та методи

Методологічною основою для вирішення поставлених завдань є системний підхід у вивченні шляхів регулювання властивостей матеріалу, виготовленого за технологією холодного ресайклінгу (МДХР) за рахунок

підбору гранулометричного складу грануляту, пластифікації суміші та кристалізаційних контактів, що утворюються при твердінні цементної пасти, між частинками поряд з коагуляційними зв'язками.

Результати та обговорення

МДХР – це композиційний матеріал, в якому наповнювачем є полізернисті частинки асфальтобетонного грануляту, а матрицею комплексне в'язуче на основі повільнотвердіючого мінерального та органічного в'язучого [6, 7].

В процесі структуроутворення в СХР, формуються два типи мікроструктури коагуляційна та конденсаційно-кристалізаційна. Коагуляційні зв'язки між частинками асфальтобетонного грануляту здійснюються через адсорбціо-сольватні структуровані плівки органічного в'язучого. Конденсаційно-кристалізаційні зв'язки формуються з часом і представлені слабокристалізованими новоутвореннями гідросилікатів кальцію.

Зазначена відмінна здатність міцних конденсаційно-кристалізаційних зв'язків, що утворюються, при твердінні мінерального в'язучого, а також наявність гнучких коагуляційних бітумних зв'язків між зернами асфальтобетонного грануляту і прошарків бітуму серед продуктів гідратації мінерального в'язучого є основними факторами, що визначають водо- та морозостійкість регенованого асфальтобетону на комплексному в'язучому. Що стосується СХР, умовою досягнення найбільш щільної упаковки гранул є досягнення їх найбільшої рухливості на стадії формування структури матеріалу шляхом пластифікації. У структуроутворенні МДХР важливу роль відіграють кристалізаційні контакти, що утворюються при твердінні цементу, який вводиться разом з водою та утворює цементне тісто або пасту (рис. 2). Необхідна кількість цементної пасти залежить від сумарної поверхні грануляту та товщини плівки пасти, яка також залежить від розмірів гранул [5, 8].

Підвищення міцності, МДХР пояснюються утворенням при твердінні мінерального в'язучого гелеподібних гідросилікатів кальцію і наявністю гнучких бітумних зв'язків між зернами асфальтового грануляту.

В роботі були проаналізовані різні варіанти складів СХР на основі асфальтобетонного грануляту без додавання та з додаванням цементу в межах від 1,5 % до 6 %. та пластифікатора у кількості 0,02-0,04 % від маси цементу.

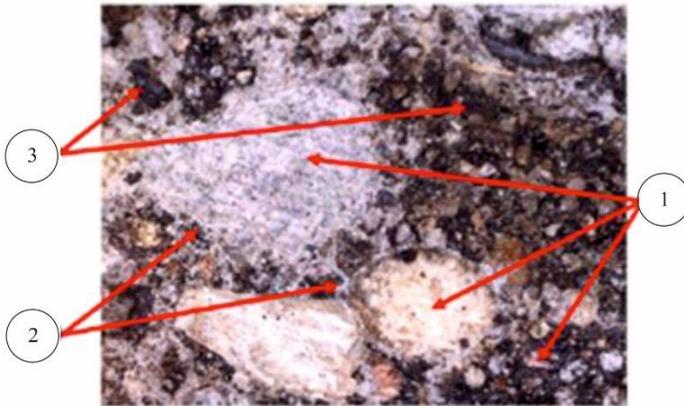


Рис. 2. Структура МДХР з цементом:
1 – зерно розміром дрібніше 5 мм; 2 – прошарок цементного каменю;
3 – прошарок бітуму

Особливістю застосування асфальтобетонного грануляту є можливість використання цього матеріалу у фракціонованому або нефракціонованому вигляді. Розглядалися суміші з грануляту розміром 0-40 мм, який отриманий після фрезерування без дроблення та фракціонування і грануляту розміром 0-20 мм, який отриманий, після дроблення, розсіву та змішування фракцій, (рис. 3) [5, 9].

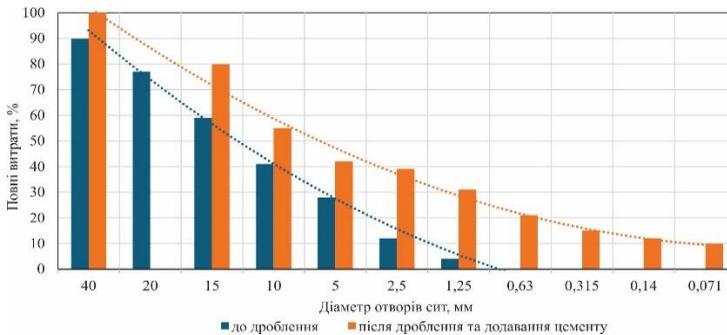


Рис 3 Гранулометричний склад асфальтобетонного грануляту
Результати визначення основних показників властивостей МДХР з неподрібненого та подрібненого грануляту у віці 7 діб та 28 діб наведено на рис. 4, 5 [9].

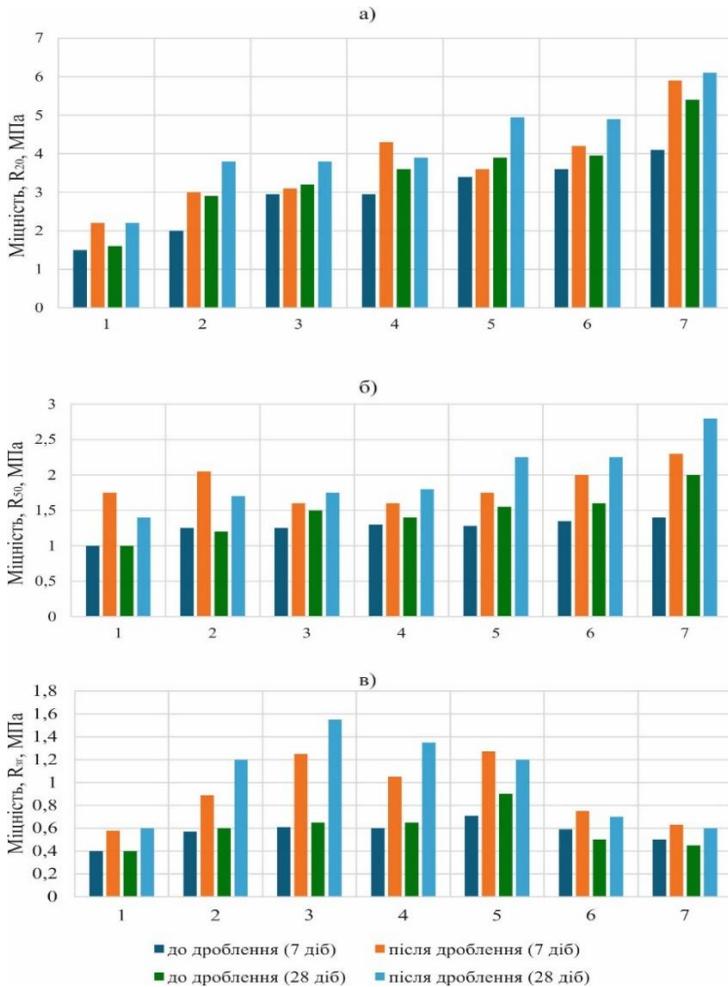


Рис. 4. Показники міцності МДХР:

а, б – міцність на стиск; в – міцність при згинанні;

- 1 – гранулят, 2 – гранулят +цемент 1,5 % +вода 0,75 %; 3 – гранулят +цемент 1,5 % +вода 0,75 % + пластифікатор 0,02 %; 4 – гранулят +цемент 3,0 % +вода 3,0 %; 5 – гранулят + 3,0 % +вода 1,5 % + пластифікатор 0,04 %; 6 – гранулят +цемент 4,5 % +вода 2,2 %; 7 – гранулят +цемент 6,0 % +вода 3,0 %

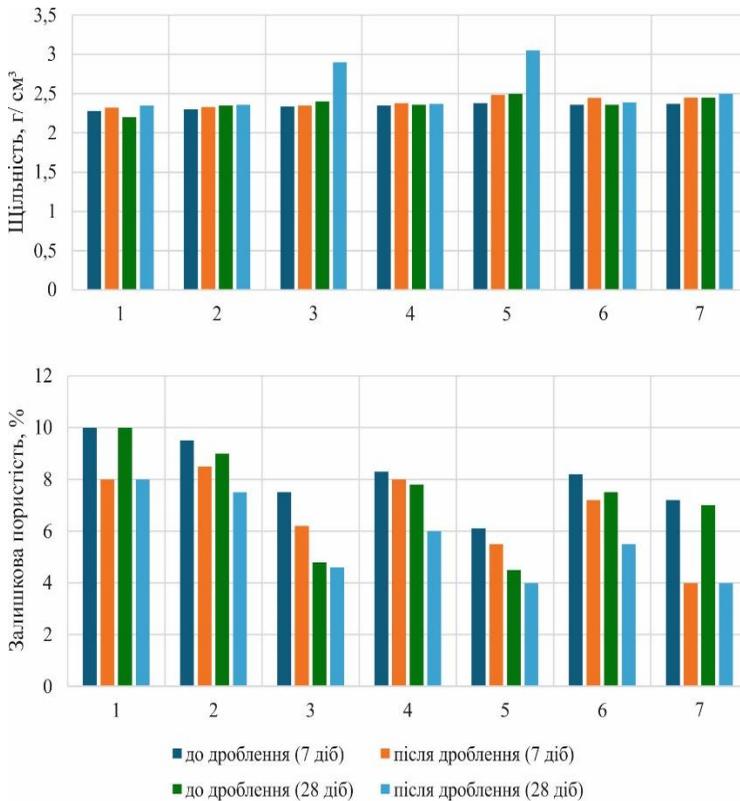


Рис. 5 Показники щільності і залишкової пористості МДХР

1 – гранулят, 2 – гранулят +цемент 1,5 % +вода 0,75 %; 3 – гранулят +цемент 1,5 % +вода 0,75 % +пластифікатор 0,02 %; 4 – гранулят +цемент 3,0 % +вода 3,0 %; 5 – гранулят + 3,0 % +вода 1,5 % +пластифікатор 0,04 %; 6 – гранулят +цемент 4,5 % +вода 2,2 %; 7 – гранулят +цемент 6,0 % +вода 3,0 %

Висновки

Дослідження показали, що МДХР у віці 7 діб та 28 діб з використанням фракціонованого грануляту 0-20 мм має міцність при різних температурах вище, ніж МДХР з гранулятом від 0 мм до 40 мм без дроблення та сортування.

При додаванні водного розчину пластифікатора міцність МДХР майже в 1,5 рази більша, ніж у складах без пластифікатора.

При близьких значеннях властивостей досліджуваних складів МДХР найбільшу міцність при 50 °С, що характеризує його стійкість до зсуву, показали зразки з додаванням цементу і пластифікатора. Застосування МДХР із подрібненого грануляту з додаванням від 1,5 % до 3 % цементу та

пластифікатора, за своїми показниками забезпечує, а за показниками міцності перевищує вимоги до гарячих крупнозернистих щільних асфальтобетонів.

Зі збільшенням кількості цементу з 1,5 % до 6 % міцність МДХР зростає в 1,5-2 рази за температури від 20 °С до 50 °С. Причому у зразках з фракціонованим гранулятом приріст міцності помітно вищий, ніж у зразках із недробленим гранулятом. За рахунок введення пластифікатора зразки показали велику міцність при меншому вмісті цементу.

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. Tereshchenko T.A. Aspects of successful implementation of industrial hot recycling of road asphalt concrete. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/ ilovepdf_com-5-13.pdf (access date: 15.09.2025).
2. TTR 42.1-37641918-418:2017 Typical technological regulations for the production of bituminous mixtures using asphalt concrete crumb
3. Tereshchenko, T.A. Ways of development of technologies for hot recycling of road asphalt concrete [Text] / T.A. Tereshchenko // Ukrainian Highway. – 2014. - No. 2 – P. 42-48. – Bibliography: p. 48
4. World Road Association. Technical Committee C7/8 “Road Surfaces”. Recycling of road surfaces. Part 3. Manual for hot recycling of asphalt concrete from old pavements at the plant / Translated from Russian by V. Zhdanyuk. Under the general editorship of V. Zhdanyuk and D. Sybilsky. – Kh.: Publishing House of KhNADU, 2006. – 52 p.
5. Tereshchenko, T.A. Calculation of the grain composition of the mineral part of regenerated asphalt concrete mixtures when using unfractionated asphalt concrete granulate [Text] / T.A. Tereshchenko // Collection of scientific works "Roads and Bridges". – 2015. – Issue 15. - P. 59 – 65. – Bibliography: p. 65
6. R B.2.7-37641918-887:2017 Recommendations for the selection of the composition and application of bituminous mixtures using asphalt concrete crumb
7. Kandhal, P. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments [Electronic resource] // P. Kandhal, R. Mallick. US Department of Transportation, Federal Highway Administration; Research, Development, and Technology. - Publ. No. FHWA-SA-98-042. - 1997 – Access mode: <http://www.fhwa.dot.gov> – Title from the screen

8. Zhdanyuk V. Recycling of road clothing/V. Zhdanyuk, D. Sybilsky //Avtoшlyahovyk Ukrainy. – 2006. – No. 4. – P. 32–35.

9. Ilchenko V.V., Nesterenko O.V., Horobiy S.S. Prospects for the use of cold mixtures based on asphalt fines for road construction in rural areas. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/5172/1/Znpgmb_2009_2_24%2039.pdf (access date: 15.10.2025).

Література

1. Терещенко Т.А. Аспекти успішного впровадження промислового гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/lovepdf_com-5-13.pdf (дата звернення: 15.09.2025).

2. ТТР 42.1-37641918-418:2017 Типовий технологічний регламент на виготовлення бітумінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти.

3. Терещенко, Т.А. Шляхи розвитку технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону [Текст] / Т.А. Терещенко // Автошляховик України. – 2014. - № 2 – С. 42-48. – Бібліогр.: с. 48.

4. Всесвітня дорожня асоціація. Технічний комітет С7/8 «Дорожні покриття». Рецикловання дорожніх одягів. Частина 3. Посібник з гарячого рецикловання асфальтобетону зі старих покриттів на заводі / Пер. з рос. В. Жданюка. Під заг. ред. В. Жданюка і Д. Сибільського. – Х.: Вид-во ХНАДУ, 2006. – 52 с.

5. Терещенко, Т.А. Розрахунок зернового складу мінеральної частини регенованих асфальтобетонних сумішей при використанні нефракціонованого асфальтобетонного грануляту [Текст] / Т.А. Терещенко // Збірник наукових праць «Дороги і мости». – 2015. – Вип. 15. - С. 59 – 65. – Бібліогр.: с. 65.

6. Р В.2.7-37641918-887:2017 Рекомендації з підбору складу та застосування бітумінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти.

7. Kandhal, P. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments [Електронний ресурс] // P. Kandhal, R. Mallick. US Department of Transportation, Federal Highway Administration; Research, Development, and Technology. - Publ. № FHWA-SA-98-042. - 1997 – Режим доступу: <http://www.fhwa.dot.gov> – Заголовок з екрану.

8. Жданюк В. Рецикловання дорожніх одягів/В. Жданюк, Д. Сибільський //Автошляховик України. – 2006. – №4. – С. 32–35.

9. Ільченко В.В., Нестеренко О.В., Горобій С.С. Перспективи використання холодних сумішей на основі асфальтового дрібняку для будівництва доріг у сільській місцевості. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/5172/1/Znpgmb_2009_2_24%2039.pdf (дата звернення: 15.10.2025).

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.11.2025	Received 14.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 19.11.2025	Received in revised form 19.11.2025
Прийнято 25.11.2025	Accepted 25.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

A. V. Siedov*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>
Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

O. O. Fomenko

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>
Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: avs.1708@ukr.net

Research on the influence of plasticization and fractionation of granulate on the properties of the material produced by cold recycling technology

How to Cite:

Siedov, A. V., Fomenko, O. O. (2025). Research on the influence of plasticization and fractionation of granulate on the properties of the material produced by cold recycling technology. Modern technologies and calculation methods in construction, 24, 417-426. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-36](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-36)

Abstract. Traditionally, pavement repair is carried out by leveling the pavement with an asphalt concrete mixture and installing an additional wear layer.

The article focuses on the issues of the technology of cold regeneration of asphalt concrete, which consists in grinding the coating material (in some cases with the capture of part of the base) mainly by cold milling.

Cold regeneration of asphalt concrete pavements differs favorably from traditional repair methods, primarily in its cost-effectiveness. This technology allows the most effective use of the material of the old road surface, eliminating cracks in the old coating to the full or most of the depth, which slows down the appearance of cracks in the new coating. In addition, carrying out work without heating the material causes minimal damage to the environment.

An essential feature of such materials is the dependence of their properties on the structure, which is determined by the number and quality of asphalt concrete granulate grains, their mutual arrangement and the nature of the connections between them.

Regarding mixtures made using cold recycling technology, an important direction of regulating the process of their structure formation in order to increase density is to increase the processability of the mixture in the compaction process by reducing the strength of contacts and improving the mobility of granules. The condition for achieving the most dense packing of granules is to achieve their greatest mobility at the stage of forming the structure of the material by plasticization.

In the structure formation of mixtures made using cold recycling technology, an important role is played by crystallization contacts formed during the hardening of cement, which is introduced together with water and forms a cement dough or paste.

The work analyzed various options for the compositions of mixtures made using cold recycling technology, based on asphalt concrete granulate without addition and with the addition of cement in the range from 1.5% to 6%, and plasticizer in an amount of 0.02-0.04% of the mass of cement. When adding an aqueous solution of plasticizer, the strength of the milled material is almost 1.5 times greater than in compositions without plasticizer.

Keywords: capital repairs, regeneration, asphalt concrete granulate, plasticization, cement, strength