

УДК 624.01:691.322

## ОЦІНЮВАННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ ВІДХОДІВ БЕТОНУ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. О. С. Зінченко,  
кандидати техн. наук А. В. Никитинський, О. В. Романенко

## PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION ASSESSMENT OF THE RECYCLED AGGREGATES FROM CONCRETE REMAINS

Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgrad. student O. Zinchenko,  
PhD (Tech.) A. Nykitynskyi, PhD (Tech.) O. Romanenko



DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>

**Анотація.** У статті наведено результати оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону подрібненням залишків залізобетонних шпал. Встановлено, що за гранулометричним складом крупний заповнювач відповідає вимогам для використання у бетонних сумішах. Дрібний заповнювач має модуль крупності 0,9 і за гранулометричним складом не придатний для виготовлення бетонних сумішей. Використання рециркульованих заповнювачів знизить потребу будівельної галузі в природних матеріалах і собівартість виготовлення бетонних конструкцій, а також зменшить площу земель, зайнятих під будівельне сміття.

**Ключові слова:** крупний заповнювач, дрібний заповнювач, гранулометричний склад, крива розсіву, бетон.

**Abstract.** The reuse of the remainders of destroyed concrete structures is becoming more and more urgent problem not only in Ukraine, but also in the whole world. According to the current strategy of secondary use of resources, concrete waste is either crushed into recycled aggregate as a substitute for natural aggregate or crushed into recycled powder as a substitute for cement in mortar and concrete. The reuse of construction waste as secondary construction materials can reduce the need for natural resources for construction and free areas from accumulated construction debris. The purpose of the work is to evaluate the particle size composition of aggregates obtained from recycled concrete of waste reinforced concrete railway sleepers. To achieve the goal, the following tasks were set: to grind of sleeper waste in various ways; to determine the granulometric composition of coarse and fine aggregates; compare the obtained data with the standard requirements for concrete aggregates. Destroyed reinforced concrete railway sleepers were used as material for research. After removing the reinforcement, the sleeper parts were first loaded into a jaw crusher with a fixed distance between the working plates at 20 mm. The obtained material was reloaded into a drum mill and grinded for 30 minutes. After that, the mixture was unloaded on a standard set of sieves to determine the particle size distribution. As a result of an experimental study of crushed waste of reinforced concrete sleepers, the following was established. The granulometric composition of particles larger than 5 mm meet the requirements for coarse aggregates to produce concrete mixtures. Fractions with particle sizes less than 5 mm are very fine with a fineness modulus at 0.9 which does not meet the requirements for fine aggregates to produce concrete mixtures. Further research will be aimed at studying other properties that determine the possibility of using aggregates for reuse in concrete mixes, namely moisture content, average density, compressive strength, etc. Also, the ways for usage of fine

*fractions as fillers will be search for other building materials in order to dispose of crushed concrete waste.*

**Keywords:** *coarse aggregate, fine aggregate, granulometric composition, sieving curve, concrete.*

**Вступ.** Проблема повторного використання залишків зруйнованих бетонних конструкцій стає все більш актуальною не тільки в Україні, але і всьому світі. Відповідно до сучасної стратегії вторинного використання ресурсів бетонні відходи або подрібнюються в перероблений заповнювач як заміна природного заповнювача, або подрібнюються в перероблений порошок як заміна цементу в розчині та бетоні. Переробка будівельних відходів як вторинних будівельних матеріалів може знизити потребу у природних ресурсах для будівництва та звільнити площі від накопиченого будівельного сміття.

Як зазначено в роботі [1], міцність високоміцного бетону, крім інших чинників, буде залежати від міцності та гранулометрії крупного заповнювача. Проте якісні характеристики перероблених заповнювачів дуже сильно відрізняються від природних залежно як від способу подрібнення, так і властивостей початкового подрібнюваного бетону. Виходячи з цього, дослідження властивостей рециклінгових заповнювачів, і перш за все їхнього гранулометричного складу, є актуальним практичним завданням.

**Аналіз попередніх досліджень.** Проблемі повторного використання залишків зруйнованих бетонних конструкцій присвячено багато публікацій вітчизняних і закордонних дослідників. За роботою [2], сукупний світовий попит на бетон у деяких країнах збільшився до 3,8 т на особу, третина бетонних конструкцій з часом перетворюється на відходи, що дає приблизно тонну відходів на рік на особу в цілому по усьому світі. Це означає, поперше, що природний заповнювач необхідно замінити безпечнішим для навколишнього середовища матеріалом.

Отримання вторинного щебеню з відходів бетону майже у вісім разів зменшує витрати енергоносіїв, ніж видобування природного щебеню, який використовують українські заводи залізобетонних конструкцій [3]. Мобільні рециклінгові установки, використовувані безпосередньо на місці утворення будівельних відходів, дають змогу економити на закупівлі будівельних матеріалів, а також часі доставлення, оскільки вторинний щебень для нового будівництва вже знаходиться на будівельному майданчику.

По-друге, стає все більш актуальною проблема перероблення залишків бетонних конструкцій. Після перероблення кількість дрібних частинок, присутніх у рециркульованому заповнювачі, залежить від якості старого бетону, розмір частинок безпосередньо впливає на якість знов виробленого бетону. Крім того, кількість прикріпленого розчину збільшується зі зменшенням розміру частинок, і цей розчин схильний до розшарування, що призводить до зниження міцності на роздавлювання і удар, а також стійкості до стирання бетону на таких заповнювачах порівняно з бетоном на природних заповнювачах [4].

У дослідженні [5] вивчалися фізичні властивості дрібних заповнювачів, а також міцність і вартість бетону, отриманого шляхом часткової заміни піску повторно використаним дрібним заповнювачем і штучним піском. Авторами були проведені випробування на міцність на стиск, і результати показали, що бетон, який містить рециркульовані і штучні заповнювачі як замічник піску, має більшу міцність на стиск, ніж стандартний бетон. Бетон, у якому весь пісок замінюється вказаними заповнювачами, є економічною сумішшю, що дає змогу заощадити до 2,41 % загальної вартості бетону.

Подрібнені залишки бетону житлових будівель як крупні заповнювачі оцінювали з використанням традиційного ситового аналізу, а як дрібні заповнювачі визначали як такі, що пройшли через сито з розмірами отворів 4,75 мм. Серед домішок у рециркульованих дрібних заповнювачах зустрічалися гіпс, глина, деревина, кераміка та біологічні компоненти. Для видалення цих домішок використовували просіювання, ручне збирання або водну флотацію, а також промивання. Дані розсіву в дослідженні [5] свідчать, що гранулометричний склад дрібних заповнювачів знаходиться в межах відповідних стандартів, а крупних заповнювачів виходить за допустимі значення, тобто розмір частинок є більшим, ніж можна використовувати в бетонах класу С-25. Тому для виготовлення зразків було використано лише дрібний заповнювач. Можливість використання крупного заповнювача не було досліджено в цій роботі.

Щоб продемонструвати різноманітність заповнювачів, що походять з різних типів відходів бетонних конструкцій, у роботі [6] приготували різні типи заповнювачів. Було показано, що шляхом подрібнення затверділої цементної пасти можна отримати двофракційну суміш із середніми розмірами 5 і 60 мкм. При подрібненні відходів будівельного розчину найбільшу фракцію складали частинки з розмірами 30 мкм, а після подрібнення бетонних відходів – 20 мкм. Автори не описали докладно режими подрібнення, використане обладнання та час, тому ці дані не можуть бути розповсюджені на всі подрібнені відходи бетонних конструкцій. У дослідженні [7] виконано порівняння гранулометричних складів відходів бетону, отриманих з різних переробних заводів. Було показано, що заповнювачі з одного заводу містили більше дрібних частинок в інтервалі 0,15-0,3 мм, ніж з іншого. Додаткове просіювання відділило дрібну фракцію, яка містить в основному частинки з розмірами від 0 до 0,3 мм, і більш крупну

з розмірами частинок від 1,18 до 9,5 мм. Але в обох випадках рециркульовані заповнювачі були дрібнішими, ніж природний пісок, а отже, застосування таких заповнювачів для виготовлення бетону потребує подальших досліджень.

Як свідчить виконаний огляд попередніх досліджень, на гранулометричний склад подрібнених відходів зруйнованих бетонних конструкцій впливає дуже багато чинників, серед яких міцність первинного бетону, спосіб перероблення і подрібнення тощо. В автодорожній галузі вже давно використовується матеріал зношених асфальтобетонних шарів для відновлення асфальтобетонного покриття. Актуальність впровадження технологій перероблення та повторного застосування цементобетону в дорожній галузі України підтверджується наявністю низки нормативних документів, які врегульовують це питання [8]. У цивільному і транспортному будівництві відповідні нормативні документи відсутні, тому дослідження властивостей заповнювачів із переробленого бетону може стати підґрунтям для створення бази даних, після узагальнення яких можливе розроблення технічних умов і регламентів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є оцінювання гранулометричного складу заповнювачів, отриманих із переробленого бетону відходів залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: здійснити подрібнення відходів шпал різними способами; визначити гранулометричний склад крупного і дрібного заповнювачів; порівняти отримані дані зі стандартними вимогами до заповнювачів бетону.

**Матеріали і методи дослідження.** Як матеріал для досліджень використовувалися зруйновані залізобетонні залізничні шпали, частини яких є суцільними агрегатами з декількох зерен щебеню, з'єднаними цементно-піщаним розчином із залишків старого бетону. Після видалення

арматури частини шпал спочатку завантажували в шокову дробарку з установленою відстанню між робочими поверхнями 20 мм. Отриманий матеріал перевантажували в барабанний млин і подрібнювали протягом 30 хв. Після цього суміш вивантажували на стандартний набір сит для визначення гранулометричного складу. Визначення зернового складу крупного заповнювача проводилося за ДСТУ Б В.2.7-71 [9], зернового складу дрібного заповнювача – ДСТУ Б В.2.7-232 [10]. Встановлення відповідності властивостей заповнювачів вимогам для застосування в бетонних сумішах здійснювалося за ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11].

**Основна частина досліджень.** Для визначення гранулометричного складу подрібненої суміші було визначено залишки на ситах і побудовано криву розсіву за ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11]. Часткові та повні залишки на ситах наведено в таблиці, а гранулометрична крива – на рис. 1.

За ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11], якщо лінія розсіву сумішей розташована нижче кривої *A*, то така суміш заповнювачів

вважається недоцільною для використання, оскільки вона занадто перенасичена частинками крупного розміру і дуже важко піддається обробці. До того ж така суміш має схильність до розшарування. Якщо лінія розсіву проходить між кривими *A* та *B*, то така суміш заповнювачів вважається оптимальною. Якщо лінія розсіву проходить у площині між кривими *B* та *C*, то вважається, що така суміш заповнювачів перенасичена піском. Вона має підвищену водопотребу і, як наслідок, потребує більшої кількості цементу або пластифікуючої добавки. Як видно з рис. 1, експериментальна крива розсіву (помаранчева лінія) лише частково відповідає вимогам до гранулометричного складу заповнювачів і має суттєву відмінність від кривих розсіву для поліфракційних кондиційних заповнювачів, наведених у роботі [1], для гранітного щебеню марки за міцністю 1200, фракцій 2-5 мм, 5-10 мм і 10-20 мм.

Для більш точного оцінювання властивостей було проведено окремий розсів крупного і дрібного заповнювачів (рис. 2, 3).

Таблиця

Часткові та повні залишки на ситах суміші заповнювачів

Розміри отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки на ситах, %	Повні залишки на ситах, %
пройшло через сито 0,16	28,37	28,37
0,16	11,15	39,52
0,315	1,78	41,30
0,63	0,32	41,63
1,25	0,76	42,39
2,5	1,42	43,81
5	5,50	49,31
10	18,97	68,28
20	31,72	100,00

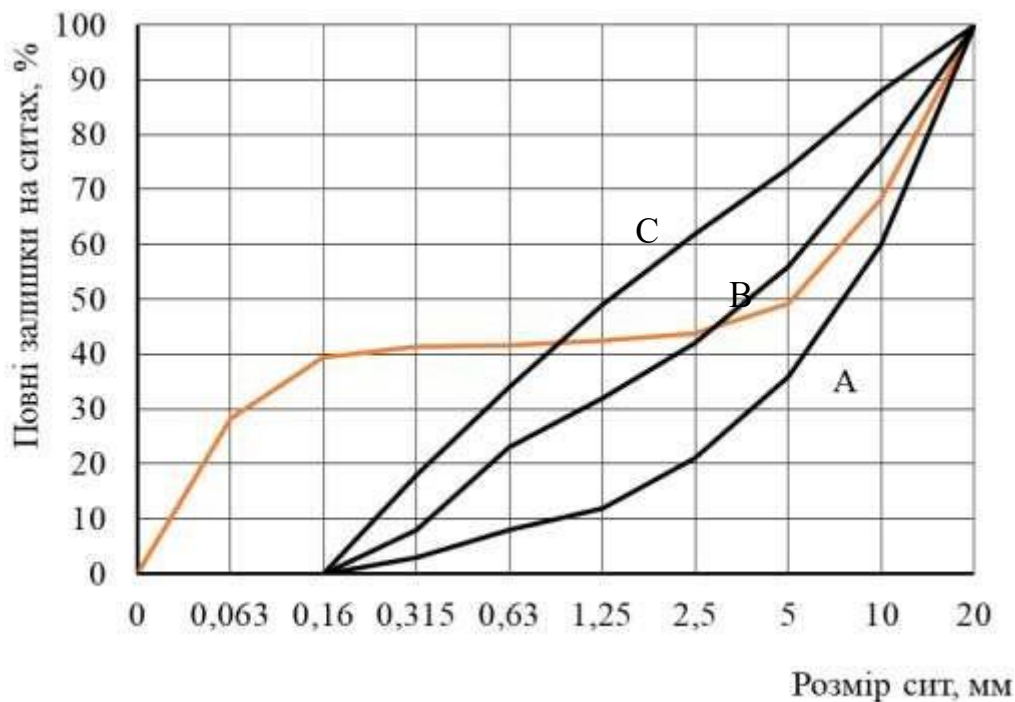


Рис. 1. Крива розсіву суміші заповнювачів

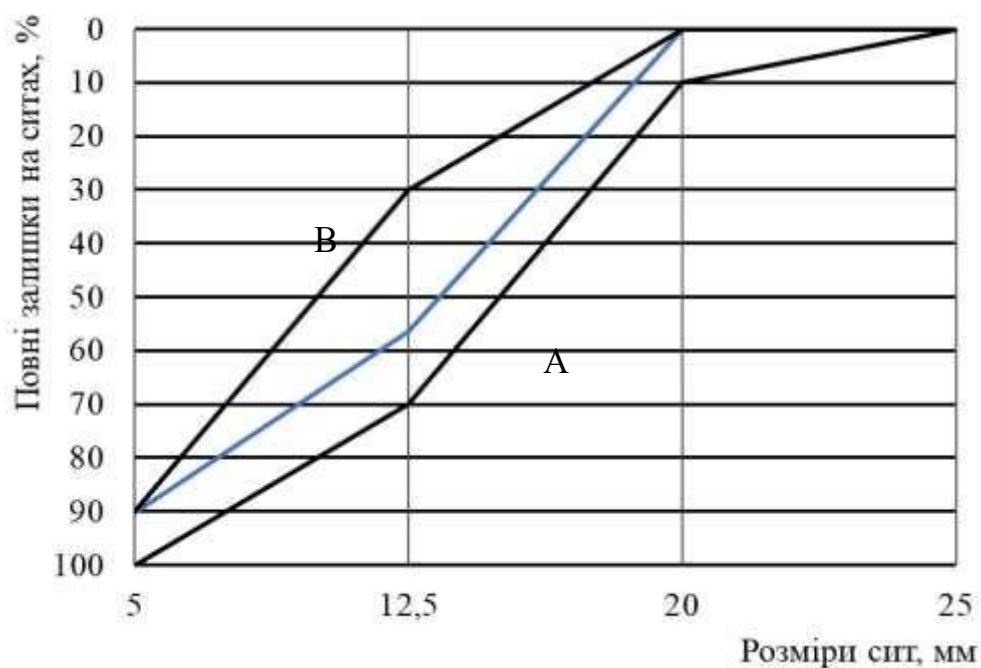


Рис. 2. Крива розсіву крупного заповнювача

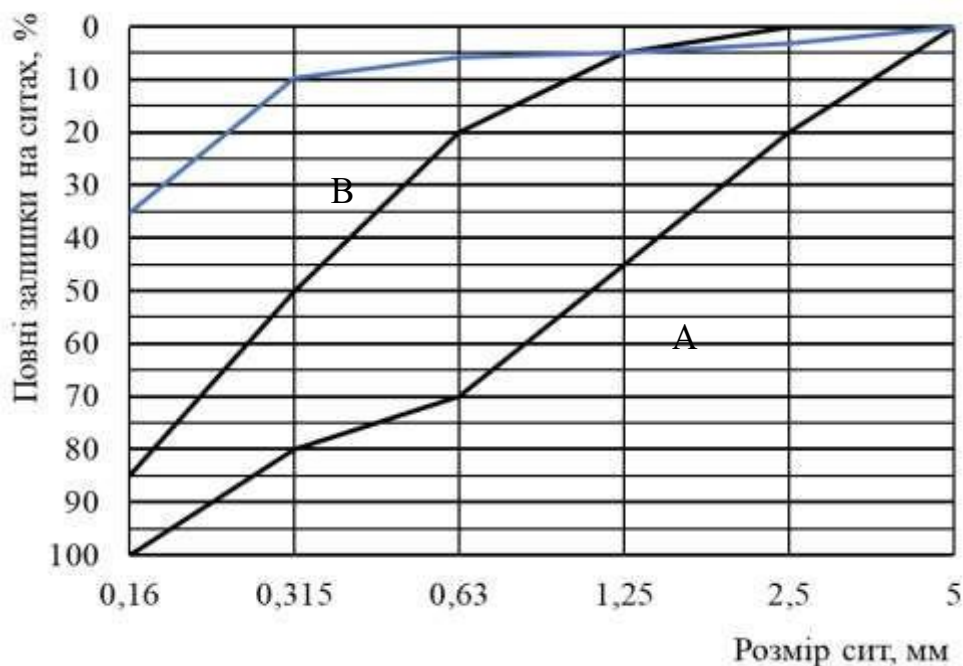


Рис. 3. Крива розсіву дрібного заповнювача

Якщо лінія розсіву проходить між кривими *A* та *B* (рис. 2 і 3), то такий заповнювач вважається придатним для виготовлення бетону, за роботами [12, 13]. Крива розсіву крупного заповнювача (блакитна лінія на рис. 2) розташована між кривими *A* і *B*, отже, за гранулометричним складом крупний заповнювач придатний для виготовлення бетонної суміші. Крива розсіву дрібного заповнювача (блакитна лінія на рис. 3) розташована вище кривої *A*, тобто за гранулометричним складом дрібний заповнювач не придатний для виготовлення бетонної суміші. Розрахований модуль крупності цього піску становить 0,9, тож такий заповнювач, за класифікацією [14], належить до групи тонких. Відповідно до роботи [11] як дрібний заповнювач для бетонів можуть використовуватись піски з модулем крупності від 1,0 до 4,0. Отже, за цим параметром дрібний заповнювач із переробленого бетону не може бути застосований у бетонних сумішах. Вміст у піску зерен, що проходять через сито 0,16 мм, перевищує за масою 15 %, що не відповідає вимогам ДСТУ [11].

**Висновки.** У результаті експериментального дослідження подрібнених відходів залізобетонних шпал встановлено таке. Гранулометричний склад частинок розмірами більше 5 мм відповідає вимогам, які висуваються до крупних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей. Фракції з розмірами частинок менше 5 мм є дуже дрібними з модулем крупності 0,9, що не відповідає вимогам, які висуваються до дрібних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей. Оцінювання заповнювачів, отриманих із подрібнених відходів залізничних шпал було проведено лише за одним параметром – гранулометричним складом. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення інших властивостей, які визначають можливість застосування заповнювачів для повторного використання в бетонних сумішах, а саме вологості, середньої щільності, міцності при роздавлюванні тощо. Також буде здійснено пошук шляхів використання дрібних фракцій як заповнювачів інших будівельних матеріалів з метою утилізації відходів подрібненого бетону.

*Список використаних джерел*

1. Троян В. В., Попруга П. В., Кіндрась Б. П. Високоміцні бетони на основі високорухомих товарних бетонних сумішей. *Будівельні матеріали та вироби*. 2014. № 2. С. 12-13.
2. Makul N. Recycled Aggregate Concrete. Technology and Properties. London : Taylor & Francis Group, 2023. P. 1-15.
3. Автомонова В. О., Власенко В. В., Зайцева К. О., Кривільова С. П. Рециклінг відходів виробництва та брухту бетонних конструкцій як центральна ланка концепції екологізації заводів ЗБК. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 48 (1269). С. 16-23.
4. Anike E. E., Saidani M., Ganjian E., Tyrer M., Olubanwo A. O. The potency of recycled aggregate in new concrete: a review. *Construction Innovation*. 2019. Vol. 19. No. 4. P. 594-613. URL: <https://doi.org/10.1108/CI-07-2018-0056>.
5. Molla F. A. Concrete with Recycled Fine Aggregate (RFA) and Manufactured Sand (MS): Compressive Strength and Cost. Preprint Research Square. 2022. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1407923/v1>.
6. Ma Zh., Zhang Zh., Hu R., Liu X., Shen J., Wang Ch. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023. P. 1-19 URL: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>.
7. Katz A., Kulisch D. Efficiency of Using Recycled Fine Aggregate for a New Concrete. *Sustainable Built Environment (SBE). Regional Conference Zurich*. June 15-17. 2016. P. 404-407. URL: [http://dx.doi.org/10.3218/3774-6\\_65](http://dx.doi.org/10.3218/3774-6_65).
8. Терещенко Т. А. Можливості застосування регенованих дисперсних матеріалів у неукріплених шарах основи дорожнього одягу. *Дороги і мости*. 2017. Вип. 17. С. 73-80. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.005>.
9. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. Київ: Держкомбуд України, 1999. 47 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 44 с.
11. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 86 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкомбуд України, 1999. 16 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 13 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-29-96. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 19 с.

---

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.  
Зінченко Олексій Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: potatoesrumba@gmail.com. ORCID 0009-0000-3858-8258.

---

Никитинський Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-63. E-mail: NykitynskyiAV@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-4923-8568.

Романенко Олександр Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: Romanenko@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-9203-6056.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net\_ORCID 0000-0002-8531-7546.

Zinchenko Oleksii, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com. ORCID 0009-0000-3858-8258.

Nykitynskyi Andrii, PhD, associate professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-63. E-mail: NykitynskyiAV@kart.edu.ua.

ORCID 0000-0002-4923-8568.

Romanenko Oleksandr, PhD, associate professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-63. E-mail: Romanenko@kart.edu.ua.

ORCID 0000-0002-9203-6056.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.