

УДК 625.7/.8

Головко С. К., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-9517-7049>

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорнДІ»), м. Київ, Україна

## **ЙМОВІРНІСНО-ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОБМЕЖЕНОГО ВМІСТУ ФРЕЗЕРОВАНОЇ КРИХТИ В СКЛАДІ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНОЇ СУМІШІ, УКРІПЛЕНОЇ КОМПЛЕКСНИМ В'ЯЖУЧИМ**

### **Анотація**

**Вступ.** У роботі розглядається питання можливості повторного використання асфальтобетонної крихти в кількості до 40 % для виготовлення щебенево-піщаної суміші укріпленої комплексним в'язучим.

**Проблематика.** При ремонті автомобільних доріг, особливо місцевого значення, стикаються з проблемою недостатньої кількості фрезерованої крихти для приготування суміші фрезерованої обробленої в'язучим за методом холодного ресайклінгу відповідно до [1, 2]. Постає питання, як раціонально використати обмежену кількість (менше 40 %) фрезерованої крихти, яку будівельники можуть отримати при ремонті дорожнього одягу.

**Мета.** Пошук можливості застосування фрезерованої крихти для виготовлення щебенево-піщаної суміші укріпленої комплексним в'язучим.

**Методи дослідження.** Аналітично-експериментальний з використанням залежностей ймовірно-геометричного підходу до аналізу структур.

**Результати.** У роботі за допомогою ймовірно-геометричного підходу виконаний аналіз формування структури, яка ймовірно буде утворена при обмеженому вмісті фрезерованої крихти (до 40 % за масою). Визначено, що за такої кількості крихти буде формуватись безконтактний каркас.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили встановити, що припустимо вводити у склад щебенево-піщаної суміші укріпленої комбінованим в'язучим обмежений вміст фрезерованої крихти. Отримане рішення дозволить знизити вартість суміші та вирішити питання утилізації бітумомістких матеріалів, що позитивно вплине та екологічну безпеку регіону.

**Ключові слова:** безконтактний каркас, ймовірно-геометричний підхід, комбіноване в'язуче, щебенево-піщана суміш, фізико-механічні показники, фрезерована крихта.

### **Вступ**

Досвід влаштування шарів із фрезерованої асфальтобетонної крихти (далі — фрезерована крихта), обробленої комплексним в'язучим відповідно до [1, 2] показав, що дане рішення є прогресивним, оскільки дозволяє повторно використовувати значну кількість фрезерованої крихти з одночасним суттєвим підвищенням фізико-механічних характеристик дорожнього одягу, який ремонтують.

Разом із тим, на багатьох об'єктах, особливо при ремонті автомобільних доріг місцевого значення, стикаються з проблемою недостатньої кількості фрезерованої крихти для приготування суміші фрезерованої обробленої в'язучим (далі — СФОВ) відповідно до [1, 2]. Постає питання, як ефективно використати фрезеровану крихту, при ремонті дорожнього одягу, якщо її кількість обмежена і становить менше 40 %.

## Основна частина

Досвід влаштування шарів із фрезерованої суміші, обробленої комплексним в'язучим показав, що високі фізико-механічні показники досягаються за рахунок оброблення суміші комбінацією в'язучих, як правило це водні розчини цементу (цементно-водна суспензія) та бітуму (емульсія бітумна катіонна), з одночасною оптимізацією зернового складу, шляхом додавання потрібної кількості фракцій мінерального заповнювача.

Однак, як вже відмічалось на цілому ряді об'єктів, особливо при ремонті автомобільних доріг місцевого значення, стикаються з проблемою недостатньої кількості фрезерованої крихти для приготування суміші фрезерованої обробленої в'язучим.

Наприклад: існуюча конструкція має покриття з асфальтобетону товщиною 5 см та основу з шару щебеню, влаштованому за технологією заклинки чи просочення. Доцільно використати крихту з асфальтобетону, але для влаштування шару із фрезерованої суміші обробленою в'язучим товщиною 16 см такої кількості асфальтобетонної фрезерованої крихти необхідно додавати понад 60 % за масою нового мінерального матеріалу. Додавання такої кількості нового кам'яного матеріалу вже формує матеріал, який не може розглядатись як СФОВ. Згідно з [ 1 , 2 ] СФОВ — це оброблена в'язучим матеріалом фрезерована суміш, що містить фрезерований матеріал та добавку нового мінерального матеріалу (при потребі); а матеріал мінеральний новий – це природного або штучного походження кам'яний матеріал та пісок, які додаються для оптимізації зернового складу фрезерованої суміші.

Отже, коли фрезерованої крихти менше 40 % постає питання щодо його повторного використання при ремонті дорожнього одягу і у більшості випадків фрезерована крихта використовується для виконання другорядних робіт (підсіпка узбіч тощо), а не для влаштування конструктивних шарів при ремонті або реконструкції дорожнього одягу.

Слід зауважити, що такої проблеми не виникає, коли ми розглядаємо питання повторного використання фрезерованої асфальтобетонної крихти за методом гарячого ресайклінгу [3, 4], де оптимальна кількість фрезерованої крихти визначається, виходячи з балансу тепло-масообміну та аналізу ймовірності утворення безперервного кластеру з гранул фрезерованого матеріалу. Згідно з рішеннями вище вказаних задач встановлено, що оптимальна кількість використання фрезерованої асфальтобетонної крихти за методом гарячого ресайклінгу становить від 20 % до 40 % за масою [5].

Виходячи з ймовірно-геометричного підходу [6–8], розглянемо задачу щодо формування просторових структур із дисперсних гранул, якими в нашому випадку виступає фрезерована крихта, у композитному матеріалі, що складається зі щебеню та піску, оброблених комбінованим в'язучим.

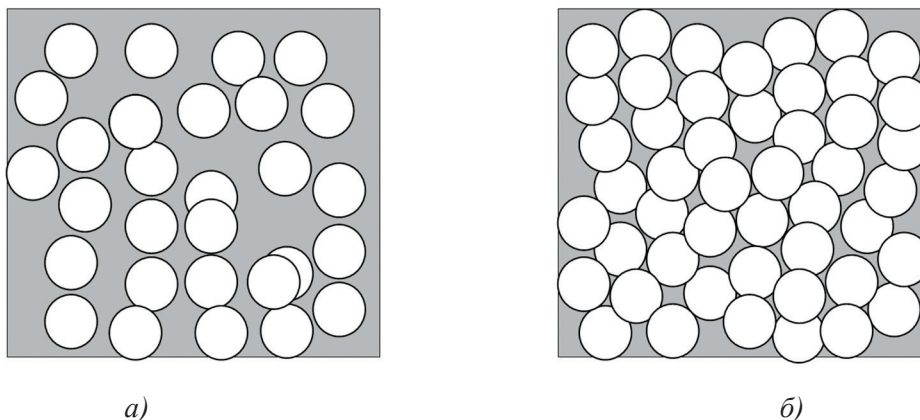
Композит який ми розглядаємо — це бінарна система матриці та заповнювача. Матрицею виступає розчин піску (відсіву) обробленою комбінацією в'язучих: цементу та бітуму. Заповнювач у даному випадку — «новий» щебінь та гранули асфальтобетонної крихти. На відміну від «нового» щебеню, гранули асфальтобетонної крихти це «старий» щебінь оброблений органічним в'язучим з обмеженим вмістом мінерального порошку, піску тощо.

Вихідна система це щебенево-піщана суміш, яка побудована як каркасна дисперсна система, пори в якій заповнені дрібними складовими. У дисперсній системі каркас є сталим [9, 10] коли вміст його елементів становить близько 0,60 від об'єму.

Кількість гранул, яку ми плануємо додавати набагато менша і можна бачити, що сталого каркасу вони не утворюють. Згідно рішення І. Палашті [11] та розрахунків за методом Монте-Карло відомо, що обсяг одномірних дисперсних елементів 0,38–0,42 утворює у просторі безконтактний каркас (рис. 1, а). Далі, при наповненні системи подібними дисперсними елементами, відбувається формування вже контактного каркасу (рис.1, б).

Відповідно, до вище наведених залежностей, при кількості гранул з асфальтобетонної крихти до 0,4 від об'єму, у системі буде утворюватись безконтактний каркас. Далі, при подальшому поступовому наповненні системи зернами щебеню — буде утворюватись контактний каркас 0,6 від об'єму.

Всі елементи каркасної системи (заповнювач), обробляються матрицею і таким чином формується композит. Матриця складається з дрібного кам'яного матеріалу (пісок або відсів) оброблені комбінацією в'язучих: цементу (цементно-водна суспензія) та бітуму (емульсія бітумна катіонна). Такий підхід проектування дозволяє отримати композитний матеріал із високими фізико-механічними властивостями.



**Рисунок 1** — Невпорядковані і безконтактна (а) та контактна (б) упаковка дисперсних елементів у просторі

Можна припустити, що обмежена кількість гранул тільки опосередковано впливає на фізико-механічні властивості композитної системи, оскільки рівномірно розподілені в об'ємі гранули між собою не контактують і вони є складовою контактного каркасу.

Були розглянуті вимоги до фізико-механічних властивостей щебенево-піщаної суміші, укріпленої комбінованим в'язучим [12, 13, 14] та органо-мінеральної суміші із фрезерованої крихти, укріпленої комбінованим в'язучим [1, 2]. Аналіз показав, що вимоги до марок матеріалів близькі, а тому забезпечити їх, при обмеженому вмісті асфальтобетонної крихти (до 40 % за масою) імовірно.

Для підтвердження даного положення проведені пошукові дослідження. Визначали фізико-механічні показники ЩПС-40 марки МК20 на 28 добу згідно з [12] з додаванням фрезерованої асфальтобетонної крихти в кількості 20 % за масою.

**Таблиця 1**

**Підбір складу ЩПС-40 з додаванням фрезерованої крихти**

Фракція, мм	Повний залишок, у відсотках			Вимоги [12]
	80 % ЩПС-40	20 % фрезеровна крихта	100 % комбінована суміш	
1	2	3	4	5
40	3,7	–	3	0–10
20	19,6	6,5	26,1	10–40

*Кінець таблиці 1*

1	2	3	4	5
10	41,8	9,6	51,4	35–65
5	54,3	14,0	68,3	50–80
2,5	57,8	16,3	74,1	60–85
1,25	60,1	17,4	77,5	70–90
0,63	67,1	18,6	85,7	75–95
0,315	70,4	19,2	89,6	80–97
0,14	73,9	19,7	93,6	85–98
0,071	77,0	19,8	96,8	87–99

*Таблиця 2*

*Склад ЩПС-40 із додаванням фрезерованої крихти*

Компоненти суміші	Вміст, % за масою
ЩПС-40	80
Фрезерована крихта	20
Емульсія бітумна ЕКП-60	2,6
Цемент ПЦ - 400	3,5
Вода технічна	3
Усього	109,1

*Таблиця 3*

*Фізико-механічні властивості ЩПС-40 марки МК20*

Назва показника	Результати випробування	Вимоги [12]
Границя міцності під час стискання зразків, МПа, за температури:		
20 °С	2,93	не менше ніж 2,0
50 °С	1,32	не менше ніж 0,8
Водостійкість за тривалого водонасичення	0,68	не менше ніж 0,65
Водонасичення, % за об'ємом	6,80	не більше ніж 9,0
<i>Примітка.</i> Зразки випробували у віці 28 діб.		

Проведені лабораторні дослідження показали, що фізико-механічні властивості щебенево-піщаної суміші з обмеженим вмістом фрезерованої крихти з обробленням комбінованим в'язучим забезпечують вимозі [12].

За вище вказаним складом та подібними складами побудовано ряд дослідних ділянок, спостереження за якими показують їх високі експлуатаційні показники.

## Висновки

За результатом ймовірно-геометричного аналізу формування структур із композитних матеріалів розглянута задача про допустиму кількість фрезерованої крихти (гранул), при формуванні композиту із щебенево-піщаної суміші, обробленої комбінованим в'язучим. Встановлено, що при приготуванні суміші введені гранули рівномірно розподіляються по всьому об'єму, а при найбільшій їх кількості до 40 % за масою, із цих гранул формується безконтактний каркас. Проведені лабораторні та польові дослідження дозволили підтвердити теоретично отримане рішення — безконтактний каркас із фрезерованих гранул опосередковано впливає на фізико-механічні властивості композитної системи. А тому, така кількість гранул є припустимою для додавання у склад щебенево-піщаної суміші укріпленої комбінованим в'язучим.

## Список літератури

1. ВБН В.2.3-218-545:2009 Споруди транспорту укріплення та стабілізація шарів дорожнього одягу за методом холодного ресайклінгу. Київ, 2010. 29 с. (Інформація та документація).
2. СОУ 45.2-00018112-061:2011 Будівельні матеріали. Суміші органо-мінеральні дорожні з фрезерованих матеріалів дорожніх одягів, виготовлені за методом холодного ресайклінгу. Технічні умови. Київ, 2011. 25 с. (Інформація та документація).
3. Малеванский Г.В., Головка С.К. Підбір складу асфальтобетонної суміші з частковим використанням старих бітумомістких матеріалів. *Автомобільні дороги та дорожнє будівництво*. Київ, 1988. № 46. С. 46-49.
4. Головка С.К. Рациональні способи повторного використання асфальтобетону при реконструкції автомобільних доріг : дис. ...канд. техн. наук. Київ, 1999. 203 с. (Інформація та документація).
5. Р В.3.2-03450778-877:2017 Рекомендації з підбору складу та застосування бітумомінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти. Київ, 2017. 48 с. (Інформація та документація).
6. Радовский Б.С. Вероятностно-геометрический подход к структуре и оценке физико-механических свойств материалов дорожной конструкции. *Новое в проектировании конструкций одежд*. Москва, 1992, с. 37-50.
7. Ефрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. Москва, 1982. 268 с.
8. Шкловский Б.И., Ефрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. Москва, 1979. 416 с.
9. Bernal J.D. The structure of liquids. *Nature*. London, 1964. Vol. 280 (1382). P.299-322.
10. Solomon H., Weiner H. A review of the packing problem : technical report. California, 1986. 44 p. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a175007.pdf> (дата звернення: 20.07.2020).
11. Palasti I. On some random space filling problems. *A Magyar Tudományos Akadémia Matematikai Kutató Intézetének közleményei*. Hungary, 1960. Vol. 5 (3). P.353-360.
12. ДСТУ-Н Б В.2.3-39:2016 Настанова з влаштування шарів дорожнього одягу з кам'яних матеріалів. Зміна № 1. Київ, 2017. 17 с. (Інформація та документація).
13. Р В.2.7-37641918-880:2017 Рекомендації з підбору складу та застосування щебенево-піщаних сумішей, оброблених комплексним бітумомінеральним в'язучим. Київ, 2017. 28 с. (Інформація та документація).
14. ТУ У В.2.7-14.2-00018112-266:2006 Суміші цементорганічні бетонні дорожні. Технічні умови. Київ, 2006. 12 с. (Інформація та документація).

**References**

1. VBN V.2.3-218-545:2009 Sporudy transportu ukriplennia ta stabilizatsiia shariv dorozhnoho odiahu za metodom kholodnoho resaiklinhu (Federal building regulations (VBN B.2.3-218-545: 2009) Transport facilities strengthening and stabilization of layers of pavement by the method of cold recycling). Kyiv, 2010. 29 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. SOU 45.2-00018112-061:2011 Budivelni materialy. Sumishi orhano-mineralni dorozhni z frezerovanykh materialiv dorozhnikh odiahiv, vyhotovleni za metodom kholodnoho resaiklinhu. Tekhnichni umovy (Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-061:2011) Building materials. Organo-mineral road mixes from the milled materials of road pavement made by a method of cold recycling. Specifications. Kyiv, 2011. 25 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. Malevansky G.V., Golovko S.K. Pidbir skladu asfaltbetonnoi sumishi z chastkovym vykorystanniam starykh bitumomistkykh materialiv (About Selection of asphalt concrete mixture with partial using of old bituminous materials). *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. Vol. 46. Kyiv, 1988. P. 46-49 [in Ukrainian].
4. Golovko S.K. Ratsionalni sposoby povtornoho vykorystannia asfaltbetonu pry rekonstruksii avtomobilnykh dorih (Rational methods of reuse of asphalt concrete in the reconstruction of roads) : dis. ... cand. tech. nauk. Kyiv, 1999. 203 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
5. P B.3.2-03450778 – XXX: 2016 Recommendations for selection of composition and application of bituminous mixtures using asphalt concrete crumb (Information and documentation) [in Ukrainian].
6. Radovsky B.S. Veroiatnostno-heometrycheskyi podkhod k strukture y otsenke fizyko-mekhanycheskykh svoistv materyalov dorozhnoi konstruksii (Probabilistic-geometric approach to the structure and evaluation of physical and mechanical properties of road construction materials). *Novoe v proektyrovannyi konstruksyi odezhd*. Moscow, 1988. P. 37-50. [in Russian].
7. Efros A.L. Fizika i geometriya besporyadka (Physics and geometry of disorder). Moscow, 1982. 268 p. [in Russian].
8. Shklovsky B.I., Efros A.L. Elektronnyye svoystva legirovannykh poluprovodnikov (Electronic properties of doped semiconductors). Moscow, 1979. 416 p. [in Russian].
9. Bernal J.D. The structure of liquids. *Nature*. London, 1964. Vol. 280 (1382). P.299-322 [in English].
10. Solomon H., Weiner H. A review of the packing problem : technical report. California, 1986. 44 p. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a175007.pdf> (Last accessed: 20.07.2020) [in English].
11. Palasti I. On some random space filling problems. *A Magyar Tudományos Akadémia Matematikai Kutató Intézetének közleményei*. Hungary, 1960. Vol. 5 (3). P. 353-360 [in English].
12. DSTU-N B V.2.3-39:2016 Nastanova z vlashtuvannia shariv dorozhnoho odiahu z kamianykh materialiv. Zmina N 1 (State Standard of Ukraine (DSTU-N B V.2.3-39:2016) Guidelines for the arrangement of layers of pavement made of stone materials. Change N 1). Kyiv, 2017. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
13. R V.2.7-37641918-880:2017 Rekomendatsii z pidboru skladu ta zastosuvannia shchebenevo-pishchanykh sumishei, obroblenykh kompleksnym bitumomineralnym viazhuchym (Recommendations (R V.2.7-37641918-880:2017) Recommendations for the selection of the composition and application of gravel-sand mixtures treated with a complex bituminous binder). Kyiv, 2017. 28 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
14. TU U V.2.7-14.2-00018112-266:2006 Sumishi tsemento-orhanichni betonni dorozhni. Tekhnichni umovy (Specifications (TU U V.2.7-14.2-00018112-266:2006) Organic cement-concrete road mixtures. Specifications). Kyiv, 2006. 12 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Sergey Golovko, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-9517-7049>

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

### **PROBABLY-GEOMETRIC ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF LIMITED CONTENT OF MILLED CRUSH IN THE COMPOSITION OF CRUSHED AND SAND MIXTURE**

#### ***Abstract***

**Introduction.** The paper considers the possibility of reuse of asphalt concrete crumb in an amount up to 40 % for the production of crushed stone and sand mixture reinforced with a complex binder.

**Problem Statement.** At repair of highways, especially of local importance, there is a problem of insufficient amount of milled crumb for preparation of a milled mix treated with binder by cold recycling method according to [1, 2]. The question is how rationally use the limited amount (less than 40 %) of milled crumb which builders can get when repairing the road pavement.

**Purpose.** Searching for the possibility to use milled crumb for the production of crushed stone and sand mixture reinforced with a complex binder.

**Methods of research.** Analytical-experimental using the dependencies of probably-geometric approach to analyze the structures.

**Results.** In the study by the probably-geometric approach the analysis of structure formation is carried out, which probably will be formed at the limited content of milled crumb (up to 40 % by weight). It was determined that at this amount of crumb a non-contact frame, which only indirectly will impact on the physical and mechanical properties of the material will be formed.

**Conclusions.** The conducted researches allow establishing that it is admissible to introduce the limited content of the milled crumb into the composition of the crushed stone and sand mixture reinforced by the complex binder. The obtained decision allows reducing the cost of a mix and solving a problem of bituminous materials elimination that will positively impact on ecological safety of region.

**Keywords:** non-contact frame, probably-geometric approach, complex binder, crushed stone and sand mixture, physical and mechanical properties, milled crumb.