

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВІДСІВІВ ШЕБЕНЕВОЇ СИРОВИНИ У ПОРОДНИХ ВІДВАЛАХ

О. Oliinyk¹ <https://orcid.org/0009-0004-8988-8612>¹ Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF CRUSHED STONE SCREENINGS IN MINE WASTE DUMPS

Мета. Оцінка якості відсівів щебеневої сировини, що накопичені у породних відвалах трьох каменевидобувних підприємств, для визначення їхнього ресурсного потенціалу та наукового обґрунтування найбільш раціональних напрямів переробки.

Методика. Оцінка здійснюється шляхом відбору усереднених проб методом конвертування з різних горизонтів відвалу для забезпечення репрезентативності. Лабораторні дослідження включали визначення ключових фізико-механічних та хіміко-мінералогічних показників. Зокрема, для встановлення гранулометричного складу застосовано ситовий аналіз, а хімічний склад визначено за допомогою високоточного рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА). Особлива увага приділялася вмісту критичних фракцій та основних оксидів.

Результати. За результатами досліджень встановлені наступні значення зразків: вміст дрібної фракції (0–0,63 мм) у досліджених зразках стабільно високий і варіюється від 29,2% до 32,1% за масою, що значно перевищує гранично допустимі норми (3–5%) для дрібного заповнювача бетонів (ДСТУ Б В.2.7-30:2013). Це є критичним обмежуючим фактором для прямого використання відсівів у традиційних будівельних матеріалах. З іншого боку, хімічний склад підтверджує, що матеріал є якісною алюмосилікатною сировиною, де домінує SiO₂ (понад 70%) та Al₂O₃ (14–15%). Такий склад є ідеальним для отримання активних в'язучих.

Наукова новизна. Вперше для відсівів щебеневої сировини, накопичених у породних відвалах досліджуваних родовищ, кількісно встановлені та документовані ключові фізико-механічні та хіміко-мінералогічні показники, які визначають їхній ресурсний потенціал. Кількісно підтверджений критичний обмежуючий фактор – надлишок дрібнодисперсних частинок (фракція 0–0,63 мм) (29,2–32,1%), що унеможливує пряме застосування відсівів як традиційного заповнювача без попереднього збагачення. Науково обґрунтовано, що невідповідність фізичних властивостей традиційним стандартам (для бетону та асфальтобетону) не виключає, а навпаки, відкриває можливість його застосування як активного алюмосилікатного прекурсора (з високим вмістом SiO₂ та Al₂O₃) для синтезу інноваційних геополімерних композицій.

Практична значимість. Отримані дані розрахунку гранулометричного та хімічного складу дозволяють науково обґрунтувати необхідність збагачення (промивки) відсівів для їх використання у традиційній будівельній галузі, що підвищить якість кінцевого продукту. Крім того, на основі встановленого хімічного складу та високої реакційної здатності обґрунтовано можливість розробити технологічні регламенти для прямого залучення відсівів (без складного збагачення) у виробництво інноваційних геополімерних в'язучих, що сприятиме зниженню техногенного навантаження та економії природної сировини.

Ключові слова: фізико-механічні властивості, відсіву дроблення, гранулометричний склад, вторинна сировина, алюмосилікатна сировина, техногенні відходи.

Вступ. Розвиток гірничодобувної промисловості нерозривно пов'язаний з необхідністю вирішення подвійної задачі: задоволення зростаючих потреб будівельної галузі у високоякісних нерудних матеріалах та мінімізація техногенного навантаження на довкілля. Однією з найбільш гострих екологічних та економічних проблем сучасних каменевидобувних підприємств є накопичення великотоннажних обсягів відсівів дроблення щебеневої сировини. Ці матеріали складають значну частину від загального обсягу видобутої гірської маси традиційно розглядаються як побічний продукт або відходи. Їх складування у породних відвалах призводить до вилучення з обігу великих площ продуктивних земель, погіршення естетики ландшафтів та забруднення повітряного басейну мінеральним пилом [1].

Масштаби цієї проблеми є колосальними. Щорічно на дробильно-сортувальних комплексах генеруються мільйони тонн відсівів фракції 0–5 мм. Основні причини їхнього недостатнього використання полягають у відсутності чітких стандартів та нормативної бази, яка б стимулювала їхнє застосування, а також у сформованій практиці поводження з ними як з відходами. Це призводить до парадоксальної ситуації: підприємства несуть значні фінансові витрати на складування та зберігання матеріалу, який за своїми властивостями є цінною сировиною [2].

На відміну від вітчизняної практики, у розвинених країнах ЄС та Північної Америки відсиви дроблення давно розглядаються як цінний вторинний матеріальний ресурс. Вони знаходять широке застосування як дрібний заповнювач для бетонів, компонент асфальтобетонних сумішей, матеріал для облаштування основ дорожнього одягу та виробництва сухих будівельних сумішей. Економічна доцільність такої утилізації є очевидною, оскільки витрати на підготовку та збагачення відсівів значно нижчі, ніж вартість видобутку та переробки первинної сировини, зокрема, природного піску [3].

Ключовою перешкодою, що стримує масове залучення відсівів у господарський обіг в Україні, є відсутність у потенційних споживачів достовірної та систематизованої інформації про якість цієї сировини. На відміну від товарної продукції (щебеню), якість відсівів у відвалах не контролюється і може суттєво варіюватися. Їхні найважливіші характеристики – гранулометричний склад, вміст пилоподібних та глинистих часток, мінералогічний склад – є нестабільними та залежать від типу вихідної породи, режимів роботи дробильного обладнання та умов зберігання у відвалі. Ця невизначеність властивостей робить неможливим їх пряме використання у технологіях, що вимагають стандартизованої та стабільної сировини [4].

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є перехід від простої констатації наявності відходів до їх глибокого вивчення. Проведення комплексної оцінки якості відсівів щебеневої сировини, що вже накопичені у породних відвалах, є нагальною необхідністю. Визначення їхнього ресурсного потенціалу, фізико-механічних властивостей та стабільності характеристик дозволить науково обґрунтувати найбільш раціональні напрями переробки. Це, у свою чергу, дасть змогу розробити технології для отримання стандартизованих продуктів, здатних конкурувати з традиційними матеріалами, та вирішити гостру екологічну й економічну проблему каменедобувної галузі.

Основна частина. Для проведення комплексної оцінки якості відсівів щебе-невої сировини було організовано відбір проб з породних відвалів трьох ключових каменевидобувних підприємств регіону (далі – Підприємство 1, 2, 3), що спеціалізуються на переробці гранітів. Відбір проб проводився методом конвертування з різних горизонтів відвалу для отримання усереднених зразків, що характеризують накопичений матеріал. Лабораторні дослідження були зосереджені на визначенні ключових фізико-механічних та хіміко-мінералогічних показників, що лімітують або уможлиблюють подальше використання відсівів як вторинної сировини.

Визначення зернового складу відсівів є першочерговим завданням, оскільки воно диктує потенційні сфери їх застосування [5]. Результати ситового аналізу (представлені кумулятивними кривими на рис. 1) свідчать, що гранулометричний склад матеріалу у відвалах різних підприємств є суттєво неоднорідним.

Так, вміст крупної фракції (2-5 мм) варіюється в широкому діапазоні – від 23,6% (Підприємство 2) до 33,6% (Підприємство 1). Подібна мінливість спостерігається і для фракції 1-2 мм. Водночас, для всіх досліджених зразків характерний стабільно високий вміст дрібної фракції (0-0,63 мм), який перевищує 29% і досягає 32,1% на Підприємстві 1. Така варіативність у крупних фракціях та надлишок дрібних фракцій, ймовірно, пов'язані зі зміною налаштувань дробильно-сортувального обладнання протягом років експлуатації та сегрегацією матеріалу при його складуванні у відвал.

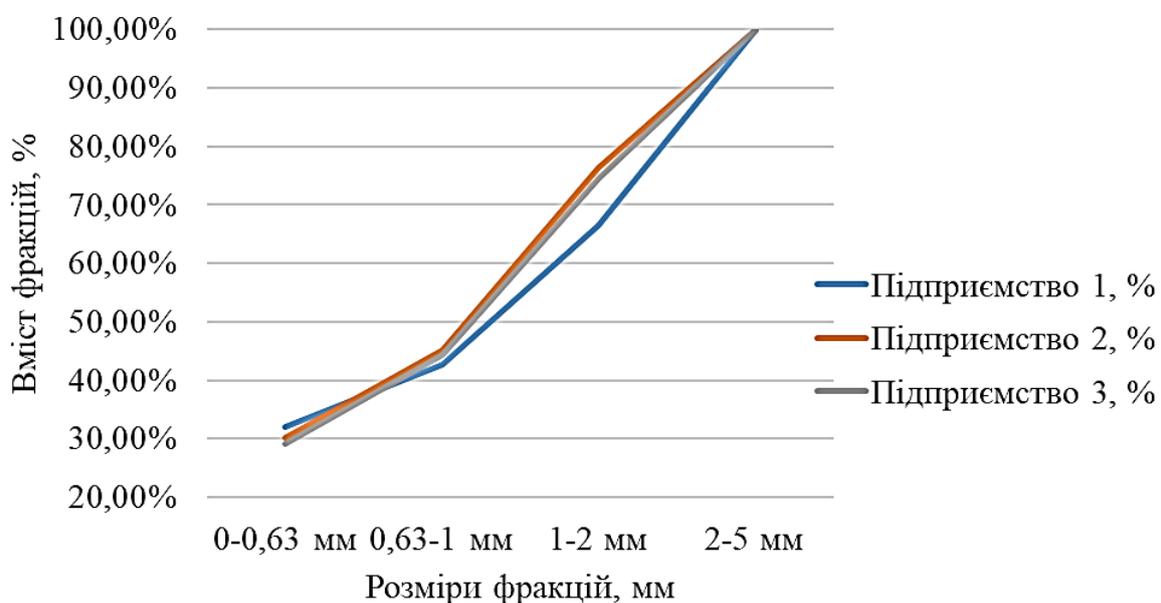


Рис. 1. Кумулятивні криві гранулометричного складу відсівів з відвалів (Підприємство 1-3)

Однак ключовою проблемою, виявленою під час досліджень, є стабільно високий вміст дрібнодисперсних частинок (фракції 0-0,63 мм). Як видно з даних, узагальнених у таблиці 1, вміст цієї фракції у відібраних пробах варіюється у вузькому, але стабільно високому діапазоні – від 29,2% до 32,1% за масою. Такий значний обсяг найдрібнішої фракції є критичним фактором, що обмежує пряме використання відсівів [6].

Таблиця 1

Основні фізичні властивості досліджуваних відсівів

Показник	Підприємство 1	Підприємство 2	Підприємство 3	Вимоги ДСТУ (для бетону)
Вміст пилоподібних і глинистих часток, %	32,1	30,2	29,2	< 3–5%
Насипна густина, кг/м ³	1410–1520	1450–1550	1390–1480	-
Істинна густина, кг/м ³	2620–2650	2630–2660	2610–2640	-

Ці показники (29,2%-32,1% для фракції 0-0,63 мм) вказують на надзвичайно високий вміст дрібних частинок. Це значно перевищує гранично допустимі норми, встановлені ДСТУ Б В.2.7-30:2013 «Заповнювачі для бетонів і розчинів», де вміст пилоподібних та глинистих частинок (які є складовою цієї фракції) суворо обмежується (зазвичай до 3-5%). Така надвисока кількість дрібних частинок є критичним обмежуючим фактором, оскільки вона різко збільшує водопотребу бетонної суміші, знижує її рухливість, призводить до розшарування та суттєво погіршує кінцеву міцність і морозостійкість готового виробу [7].

Хімічний склад відсівів (визначений методом рентгенофлуоресцентного аналізу) очікувано підтвердив, що він повністю відповідає материнській породі – граніту (табл. 2). У пробах домінує кремнезем ($\text{SiO}_2 > 70\%$) та оксид алюмінію ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 14-15\%$), що разом складають понад 85% маси. Це характеризує відсів як якісну алюмосилікатну сировину. Вміст шкідливих домішок, таких як оксиди сірки (SO_3) та хлоридів, знаходиться на мінімальному рівні і не становить загрози для корозії арматури чи цементного каменю [8].

Таблиця 2

Усереднений хімічний склад відсівів граніту (%)

Оксид	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Втрати при прожарюванні
Вміст, %	70,8	14,9	2,1	1,6	0,9	4,2	3,8	1,7

Мінералогічний аналіз (XRD) показав, що основні фази представлені кварцом, польовими шпатами (мікроклін, плагіоклаз) та слюдами (біотит). Не виявлено аморфних або реакційноздатних форм кремнезему, що могли б вступати у шкідливу лужно-силікатну реакцію в бетоні [9].

Аналіз результатів дослідження показує те, що з одного боку, матеріал має високоякісний хіміко-мінералогічний склад, що характеризує його як цінну алюмосилікатну сировину, з іншого – його фізичні властивості (гранулометрія) роблять його непридатним для прямого використання у традиційних будівельних застосунках (табл. 3).

Таблиця 3

Придатність відсівів щебеневої сировини

Сфера застосування	Ключовий стандарт (ДСТУ)	Типова вимога до фракції < 0,63 мм (Дрібна/Пилоподібна)	Результат дослідження (Середнє)	Придатність та обмежуючий параметр
1. Цементний бетон (Дрібний заповнювач)	ДСТУ Б В.2.7-30:2013	≤3% (для критичних конструкцій) / ≤5% (для загальних)	≈30%	Непридатний у вихідному стані. Обмежуючий параметр: Надмірний вміст пилу (перевищення норми у 6-10 разів). Вимагає промивки.
2. Асфальтобетон (Піщана компонента)	ДСТУ EN 13108-1	≤5% (залежно від типу суміші)	≈30%	Непридатний у вихідному стані. Обмежуючий параметр: Неконтрольована кількість пилу, що підвищує бітумосмість та погіршує якість покриття.
3. Основи дорожнього олягу (ЩПС)	ДСТУ Б EN 13242:2013	Залежить від марки, але вміст <0,63 мм суворо контролюється для запобігання пучинності	≈30%	Низька придатність / Ризикований. Обмежуючий параметр: Висока чутливість до вологи та ризик морозного здимання. Потребує стабілізації або збагачення.
4. Геополімерні композиції (Активний прекурсор)	(Міжнародні/наукові вимоги до сировини)	Високий вміст дрібної фракції є бажаним. Потрібна алюмосилікатна активність.	≈30%	Висока придатність. Визначальний параметр: Високий вміст дрібнодисперсної фракції (збільшена реакційна поверхня) та наявність SiO ₂ /Al ₂ O ₃ .
5. Виробництво мінерального порошку	ДСТУ 8772:2018	≥70% фракції <0,071 мм	≈30% фракції <0,63 мм	Потребує додаткового додроблення/помелу. Обмежуючий параметр: Ступінь подрібнення. Наявний матеріал є лише проміжним продуктом.

Ключовою проблемою, виявленою у ході лабораторних досліджень, є стабільно високий вміст найдрібнішої фракції 0–0,63 мм, що коливається в діапазоні від 29,2% до 32,1%. Цей показник є критичним обмежуючим фактором для більшості раціональних напрямів утилізації, про які йдеться у вступі. Наслідки прямого використання такого матеріалу у виробництві бетону, як правильно зазначено, є катастрофічними: різке збільшення водопотреби суміші, погіршення рухливості, розшарування, та, як наслідок, суттєве зниження кінцевої міцності та морозостійкості виробів [10]. Таким чином, попри якісний мінералогічний склад (відсутність реакційноздатних форм кремнезему), сировина у поточному стані є категорично непридатною для використання як дрібний заповнювач для бетонів.

Однак, аналізуючи хімічний склад відсівів, де домінують кремнезем ($\text{SiO}_2 > 70\%$) та оксид алюмінію ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 15\%$), відкривається ще один, потенційно більш інноваційний напрям утилізації, що є ідеальною характеристикою для прекурсора у синтезі геополімерних (лужно-активованих) в'язучих.

Геополімери розглядаються як низьковуглецева альтернатива традиційному портландцементу. У цьому контексті ключова проблема відсівів – високий вміст дрібнодисперсних частинок (29,2–32,1%) – перетворюється з критичного недоліку на вирішальну технологічну перевагу [11].

Для процесів геополімеризації необхідна висока питома поверхня сировини, яка забезпечує кращу реакційну здатність матеріалу при взаємодії з лужним активатором. Саме найдрібніші фракції (пил), які є шкідливими для бетону через підвищену водопотребу, у геополімерних системах забезпечують повноту реакції та формування міцної штучної кам'яної структури [12].

Висновки.

1. Кількісно підтверджено наявність значного ресурсного потенціалу у відсівах щебеневої сировини, накопичених у породних відвалах каменевидобувних підприємств, що представляє собою гостру екологічну та економічну проблему. Проведені дослідження дозволили отримати усереднені проби та визначити їх ключові характеристики.

2. Встановлено критичний обмежуючий фактор для традиційного використання: Гранулометричний склад відсівів характеризується стабільно високим вмістом дрібної фракції (0–0,63 мм), який варіюється від 29,2% до 32,1% за масою. Це значення значно перевищує гранично допустимі норми (3–5%) для дрібного заповнювача бетонів (ДСТУ Б В.2.7-30:2013).

3. Визначено хіміко-мінералогічну якість сировини: Хімічний склад відсівів підтверджує, що матеріал є якісною алюмосилікатною сировиною, де домінує $\text{SiO}_2 (> 70\%)$ та $\text{Al}_2\text{O}_3 (14–15\%)$. Це свідчить про високу якість материнської породи (граніту) та відсутність шкідливих домішок, що могли б загрожувати арматурі чи цементному каменю.

4. Обґрунтовано два раціональні напрями переробки:

– Для традиційних будівельних матеріалів (бетон, асфальт): Виявлена невідповідність фізичних властивостей вимагає обов'язкового збагачення (промивки) відсівів для видалення надлишку дрібнодисперсних частинок.

– Для інноваційних матеріалів (геополімери): Надлишок дрібнодисперсних частинок, який є недоліком для бетону, перетворюється на вирішальну технологічну перевагу для синтезу геополімерних (лужно-активованих) в'язучих. Це дозволяє використовувати матеріал як активний прекурсор.

Перелік посилань

1. Пономарьов, К. С., Пономарьова, С. Д., Юрченко, В. О., & Строгіна, Т. С. (2020). Дослідження дисперсного складу пилу підприємств з виробництва сухих будівельних сумішей. *Науковий вісник будівництва*, 102(4), 212–217. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2020-102-4-212-217>
2. Житковський, В. В. (2013). Використання відходів збагачення гранітного відсіву при виготовленні вібропресованих бетонних виробів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (26), 151–156.
3. Башинський, С. І., Котенко, В. В., Скиба, Г. В., Колодій, М. А., & Остафійчук, Н. М. (2020). Удосконалення методики оцінки придатності використання будівельного піску як сировини для інших галузей промисловості. *Технічна інженерія*, (1(85)), 191–200. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-191-200](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-191-200)
4. Шамрай, В. І., Мельник-Шамрай, В. В., Темченко, А. Г., Махно, А. М., & Ігнатюк, Р. М. (2023). Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. *Технічна інженерія*, 1(91), 385–397. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397)
5. Shamrai, V., Leonets, I., Melnyk-Shamrai, V., Patseva, I., & Naumov, Y. (2024). Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 10–17. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.010>
6. Balabanov, M. S., & Chiknovoryan, A. G. (2023). Study of enrichment of sand for construction works with screening of rocks crushing. *Urban construction and architecture*, 13(3), 50–58. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2023.03.07>
7. Gorbunov, F., Berdnikova, L., Bulgakov, V., Fadina, A., & Lapin, A. (2021). The use of screening of crushed granite stone for the production of building materials. *MATEC Web of Conferences*, 340, 01004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134001004>
8. Макаренко, В., Гоц, В., Хомутецька, Т., Макаренко, Ю., Аргатенко, Т., Прибителько, І., & Панченко, О. (2021). Карбонізація бетону і корозія арматури залізобетонних конструкцій підземних каналізаційних систем. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, (37), 47–56. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.47-56>
9. Müller, C. (2023). How standards support sustainability of cement and concrete in Europe. *Cement and Concrete Research*, 173, 107288. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107288>
10. Tran, V. Q., Dang, V. Q., & Ho, L. S. (2022). Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach. *Construction and Building Materials*, 323, 126578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126578>
11. Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*, 15(19), 6852. <https://doi.org/10.3390/ma15196852>
12. Luhar, I., & Luhar, S. (2022). A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*, 6(8), 219. <https://doi.org/10.3390/jcs6080219>

ABSTRACT

Purpose. Assessment of the quality of crushed stone screenings accumulated in the mine waste dumps of three quarrying enterprises to determine their resource potential and provide scientific justification for the most rational directions for processing.

The methods. The assessment is carried out by sampling averaged samples using the coning and quartering method from different horizons of the waste dump to ensure representativeness. Laboratory studies included the determination of key physico-mechanical and chemo-mineralogical indicators. Specifically, sieve analysis was used to establish the particle size distribution (granulometry), and the chemical composition was determined using high-precision X-ray fluorescence analysis (XRF). Particular attention was paid to the content of critical fractions and main oxides.

Findings. According to the research results, the following sample values were established: the content of the fine fraction (0–0.63 mm) in the studied samples is consistently high, varying from 29.2% to 32.1% by mass, which significantly exceeds the maximum permissible limits (3–5%) for fine concrete aggregate (DSTU B V.2.7–30:2013). This is a critical limiting factor for the direct use of screenings in traditional building materials. On the other hand, the chemical composition confirms that the material is a high-quality aluminosilicate raw material, dominated by SiO₂ (> 70%) and Al₂O₃ (14–15%). Such a composition is ideal for obtaining active binders.

The originality. For the first time for crushed stone screenings accumulated in the waste dumps of the studied deposits, key physico-mechanical and chemo-mineralogical indicators that determine their resource potential were quantitatively established and documented. The critical limiting factor was quantitatively confirmed – the excess of finely dispersed particles (0–0.63 mm fraction) (29.2–32.1%), which makes the direct use of screenings as a traditional aggregate impossible without preliminary beneficiation. It is scientifically substantiated that the mismatch of physical properties with traditional standards (for concrete and asphalt concrete) does not exclude, but on the contrary, opens up the possibility of its use as an active aluminosilicate precursor (with high SiO₂ and Al₂O₃ content) for the synthesis of innovative geopolymer compositions.

Practical implementation. The obtained data on particle size distribution and chemical composition calculations allow for scientifically substantiating the necessity of beneficiation (washing) of the screenings for their use in the traditional construction industry, which will improve the quality of the final product. Furthermore, based on the established chemical composition and high reactivity, the possibility of developing technological regulations for the direct involvement of screenings (without complex beneficiation) in the production of innovative geopolymer binders is substantiated, which will contribute to reducing man-made load and saving natural resources.

Keywords: *physical and mechanical properties, crushing screenings, particle size distribution, secondary raw materials, aluminosilicate raw materials, technogenic waste.*

дата першого надходження статті до видання	03.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	07.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025