

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОЛІЙНИК Олександр Вікторович

УДК 622.7.004.8:622.35

ДИ С Е Р Т А Ц І Я

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ
ВІДСІВІВ ДРОБЛЕННЯ ЩЕБЕНЕВИХ КАР'ЄРІВ**

Спеціальність 184 Гірництво
Галузь знань 18 – виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії з гірництва

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Олійник

Науковий керівник:
БАШИНСЬКИЙ Сергій Іванович,
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Олійник О.В. Обґрунтування технології комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 «Гірництво» галузі знань 18 «Виробництво та технології» – Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми – підвищенню ефективності використання мінерально-сировинної бази нерудних корисних копалин. У дослідженні обґрунтовано технологічні підходи до комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів, а також встановлено закономірності формування структури, фазового складу та фізико-механічних властивостей будівельних керамічних матеріалів із використанням техногенних мінеральних добавок.

Робота спрямована на вирішення актуальної задачі раціонального використання техногенних мінеральних ресурсів, що утворюються у значних обсягах під час видобування та переробки гірничої маси. Водночас результати дослідження сприяють створенню ресурсозберігаючих технологій виробництва будівельних матеріалів, орієнтованих на зменшення витрат природної сировини та підвищення ефективності виробничих процесів.

Актуальність теми визначається сучасними тенденціями розвитку гірничодобувної, переробної та будівельної галузей, які супроводжуються постійним зростанням обсягів видобутку нерудної мінеральної сировини та накопиченням значної кількості техногенних відходів. Зокрема, під час виробництва щебеню утворюється значна частка дрібнодисперсних продуктів дроблення – до 20–30 % від загального обсягу переробленої гірничої маси. Такі матеріали зазвичай складаються у відвалах, займають великі площі земель, порушують природні ландшафти, спричиняють пилове забруднення повітря та формують додаткові екологічні ризики для гірничих регіонів.

В умовах переходу економіки до принципів сталого розвитку, ресурсозбереження та циркулярної економіки особливого значення набуває комплексне використання техногенних мінеральних матеріалів як вторинної сировини. Залучення відсівів дроблення до виробництва будівельних матеріалів дає змогу не лише скоротити обсяги техногенних накопичень, а й підвищити рівень комплексного освоєння родовищ нерудних корисних копалин. Крім того, це дозволяє зменшити споживання природної глинистої сировини, знизити енергетичні витрати виробництва та підвищити загальну економічну ефективність технологічних процесів.

Одним із найбільш перспективних напрямів утилізації відсівів дроблення є їх використання у виробництві будівельної кераміки. Це зумовлено їхніми мінералогічними та фізико-хімічними властивостями, зокрема високим вмістом кремнезему, наявністю польовошпатових мінералів і оксидів-плавнів. Такі компоненти здатні активізувати процеси рідкофазного спікання та сприяти формуванню більш щільної й однорідної структури керамічного матеріалу.

Водночас відсутність комплексних досліджень щодо визначення оптимального вмісту техногенної добавки у складі керамічних мас, а також раціональних температурних режимів сушіння й випалу стримує широке впровадження подібних технологічних рішень у промислову практику.

У першому розділі дисертації здійснено системний аналіз сучасного стану використання техногенних мінеральних відходів у виробництві будівельних матеріалів. Узагальнено результати численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених переробці дрібнодисперсних продуктів дроблення магматичних порід, визначено їхні технологічні переваги та обмеження, а також окреслено їхню роль у формуванні ресурсоефективних технологій. Показано, що у світовій практиці простежується стійка тенденція до інтеграції техногенних мінеральних ресурсів у технологічні процеси виробництва керамічних виробів, цементу, бетонів та інших будівельних матеріалів.

Водночас у вітчизняній науково-виробничій сфері використання відсівів

дроблення має переважно епізодичний характер. Це зумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованих підходів до їх комплексної переробки. У цьому контексті особливо важливим є встановлення закономірностей впливу гранулометричного, мінералогічного та хімічного складу техногенної добавки на процеси структуроутворення керамічних матеріалів.

У другому розділі дисертаційної роботи проведено комплексні експериментальні дослідження гранулометричного складу, а також фізико-механічних, мінералогічних і хімічних властивостей відсівів дроблення магматичних порід. Встановлено, що досліджувані матеріали містять значну кількість дрібнодисперсної фракції – частинки розміром менше 0,63 мм становлять близько 30 %. Це зумовлює підвищену питому поверхню матеріалу та його високу реакційну здатність у процесах термічної обробки.

Фізичні характеристики відсівів, зокрема істинна густина на рівні 2600–2700 кг/м³ і насипна густина близько 1400 кг/м³, свідчать про їхню технологічну сумісність із традиційною глинистою сировиною та можливість ефективного використання у складі керамічних мас.

Результати хімічного аналізу підтвердили підвищений вміст кремнезему, а також наявність оксидів-плавнів (K₂O, Na₂O, CaO, MgO), які сприяють зниженню температури спікання та утворенню склоподібної фази у структурі керамічного матеріалу. На основі отриманих даних розроблено серію складів керамічних мас із різним рівнем заміни глинистої сировини техногенною добавкою. Для цих складів досліджено формувальні властивості, зокрема пластичність, формостійкість і повітряну усадку.

Установлено, що введення відсівів дроблення зумовлює зменшення пластичності керамічної маси та одночасне зниження повітряної усадки під час сушіння. Це позитивно впливає на стабільність геометричних параметрів виробів і зменшує ймовірність утворення технологічних дефектів.

У третьому розділі дисертаційної роботи наведено результати комплексних експериментальних досліджень процесів сушіння, випалу та

структурування керамічних матеріалів із використанням відсівів дроблення щебневих кар'єрів. Основну увагу зосереджено на встановленні закономірностей зміни структурно-чутливих властивостей матеріалу залежно від гранулометричного складу техногенної добавки, співвідношення компонентів шихти та температурних режимів термічної обробки.

У ході досліджень встановлено, що введення відсівів дроблення істотно впливає на формувальні властивості керамічних мас. Зі збільшенням вмісту техногенної добавки спостерігається закономірне зниження пластичності формувальної маси, що пояснюється зменшенням частки глинистих мінералів і зростанням вмісту непластичних алюмосилікатних компонентів. Унаслідок цього зменшується повітряна усадка під час сушіння та підвищується стабільність геометричних параметрів сирцевих виробів. Експериментально встановлено, що повітряна усадка знижується з 8–9 % для контрольного складу до 5–6 % у разі введення значної кількості відсівів дроблення.

Дослідження процесів випалу показали інтенсифікацію рідкофазного спікання, яка супроводжується збільшенням вогневої усадки та формуванням більш щільної структури керамічного черепка. Зокрема, за температури випалу 950 °C вогнева усадка зростає приблизно з 2–3 % для контрольного складу до близько 5 % для композицій із підвищеним вмістом техногенної добавки. Одночасно спостерігається закономірне зменшення відкритої пористості матеріалу з 27–28 % до 18–19 %, що свідчить про активізацію процесів структурного ущільнення та покращення щільності керамічного матеріалу.

Підвищення температури випалу до 1050–1100 °C сприяє подальшій інтенсифікації процесів спікання, активному формуванню склоподібної фази та зростанню ступеня структурного ущільнення матеріалу. За таких умов відкрита пористість зменшується до 12–14 %, середня густина керамічного черепка зростає до 1900–2000 кг/м³, а межа міцності при стиску досягає 30–32 МПа. Отримані результати підтверджують суттєвий вплив температурних режимів випалу на процеси структуроутворення та експлуатаційні властивості

керамічних матеріалів.

Встановлено, що залежність механічної міцності від складу шихти має екстремальний характер. Найвищі показники міцності досягаються за введення відсівів дроблення у кількості 60–65 мас. %, що забезпечує оптимальне співвідношення між об'ємом рідкої фази, яка утворюється під час випалу, та кількістю кристалічних компонентів, які формують жорсткий структурний каркас. Подальше збільшення вмісту техногенної добавки призводить до зниження формостійкості виробів і погіршення їх експлуатаційних характеристик унаслідок надмірного склоутворення.

На основі проведених експериментальних досліджень розроблено концептуальні та регресійні математичні моделі процесів структуроутворення керамічних матеріалів. Вони описують взаємозв'язок між вмістом техногенної добавки, температурою випалу та основними фізико-механічними показниками виробів. Запропоновані моделі дають змогу прогнозувати зміну відкритої пористості, середньої густини, міцності та усадкових деформацій залежно від технологічних параметрів, що створює наукову основу для оптимізації виробничих процесів.

Узагальнення отриманих результатів дозволило обґрунтувати раціональні технологічні параметри комплексної переробки відсівів дроблення у виробництві будівельних керамічних матеріалів. Встановлено, що оптимальною є область складів із заміною глинистої сировини техногенною добавкою на рівні 60–65 мас. % за температури випалу близько 1100 °С. За таких умов забезпечується максимально ефективно використання вторинної мінеральної сировини при одночасному підвищенні фізико-механічних характеристик виробів.

Отже, результати досліджень формують науково обґрунтовану основу для створення ресурсозберігаючих технологій виробництва будівельних матеріалів із використанням техногенних мінеральних відходів гірничодобувної промисловості. Запропоновані технологічні рішення можуть бути впроваджені

на підприємствах будівельної індустрії з метою підвищення ефективності використання мінеральної сировини, зниження виробничих витрат і поліпшення екологічної безпеки технологічних процесів.

Узагальнюючи результати роботи, встановлено, що комплексна переробка відсівів дроблення сприяє підвищенню рівня комплексного освоєння родовищ нерудних корисних копалин, зменшенню обсягів техногенних накопичень і розвитку екологічно орієнтованих технологій виробництва будівельних матеріалів.

Ключові слова: відсів дроблення, техногенні відходи, вторинна мінеральна сировина, будівельна кераміка, структуроутворення, рідкофазне спікання, пористість, густина, міцність, математичне моделювання, ресурсозбереження.

ABSTRACT

Oliinyk O.V. Substantiation of technology for integrated processing of screenings from crushed stone quarries. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 184 «Mining», field of knowledge 18 «Production and Technologies» – Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem is improving the efficiency of the use of the mineral resource base of non-metallic minerals. The study substantiates technological approaches to the integrated processing of crushing screenings from crushed-stone quarries and establishes the regularities governing the formation of structure, phase composition, and physical and mechanical properties of construction ceramic materials using technogenic mineral additives.

The work is aimed at addressing the urgent task of rational utilization of technogenic mineral resources generated in significant quantities during the extraction and processing of rock mass. At the same time, the research results contribute to the development of resource-saving technologies for the production of building materials focused on reducing the consumption of natural raw materials and increasing the efficiency of production processes.

The relevance of the topic is determined by current trends in the development of the mining, processing, and construction industries, which are accompanied by a continuous increase in the extraction of non-metallic mineral raw materials and the accumulation of large volumes of technogenic waste. In particular, during crushed-stone production a considerable proportion of fine-dispersed crushing products is generated – up to 20–30% of the total volume of processed rock mass. Such materials are usually stockpiled in dumps, occupy large areas of land, disturb natural landscapes, cause dust pollution of the air, and create additional environmental risks for mining regions.

Under conditions of the transition of the economy to the principles of sustainable development, resource conservation, and a circular economy, the integrated use of technogenic mineral materials as secondary raw materials becomes especially important. The incorporation of crushing screenings into the production of building materials makes it possible not only to reduce the volumes of technogenic accumulations but also to increase the level of comprehensive development of non-metallic mineral deposits. In addition, this approach allows for reducing the consumption of natural clay raw materials, lowering production energy costs, and improving the overall economic efficiency of technological processes.

One of the most promising areas for the utilization of crushing screenings is their use in the production of construction ceramics. This is due to their mineralogical and physicochemical properties, particularly the high silica content, the presence of feldspar minerals and fluxing oxides. Such components can activate liquid-phase sintering processes and contribute to the formation of a denser and more homogeneous structure of the ceramic material.

At the same time, the lack of comprehensive studies aimed at determining the optimal content of technogenic additives in ceramic bodies, as well as rational drying and firing temperature regimes, restrains the widespread implementation of such technological solutions in industrial practice.

The first chapter of the dissertation provides a systematic analysis of the current state of the use of technogenic mineral waste in the production of building materials. The results of numerous domestic and foreign studies devoted to the processing of fine-dispersed crushing products of igneous rocks are summarized; their technological advantages and limitations are identified, and their role in the development of resource-efficient technologies is outlined. It is shown that in global practice there is a steady trend toward the integration of technogenic mineral resources into technological processes for the production of ceramic products, cement, concrete, and other construction materials.

At the same time, in the national scientific and industrial sphere the use of

crushing screenings remains largely sporadic. This necessitates the development of scientifically substantiated approaches to their integrated processing. In this context, establishing the regularities of the influence of granulometric, mineralogical, and chemical composition of technogenic additives on the processes of structure formation in ceramic materials is of particular importance.

The second chapter of the dissertation presents comprehensive experimental studies of the granulometric composition as well as the physical and mechanical, mineralogical, and chemical properties of crushing screenings of igneous rocks. It has been established that the investigated materials contain a significant amount of fine-dispersed fraction – particles smaller than 0.63 mm account for about 30%. This determines the increased specific surface area of the material and its high reactivity during thermal treatment processes.

The physical characteristics of the screenings, in particular a true density of 2600–2700 kg/m³ and a bulk density of about 1400 kg/m³, indicate their technological compatibility with traditional clay raw materials and the possibility of their effective use in ceramic bodies.

The results of chemical analysis confirmed an increased content of silica as well as the presence of fluxing oxides (K₂O, Na₂O, CaO, MgO), which contribute to lowering the sintering temperature and to the formation of a glassy phase in the structure of the ceramic material. Based on the obtained data, a series of ceramic body compositions with different levels of replacement of clay raw materials by technogenic additives was developed. For these compositions, forming properties – in particular plasticity, shape stability, and air shrinkage – were investigated.

It was found that the introduction of crushing screenings leads to a decrease in the plasticity of the ceramic body and, at the same time, to a reduction in air shrinkage during drying. This has a positive effect on the stability of the geometric parameters of products and reduces the likelihood of technological defects.

The third chapter of the dissertation presents the results of comprehensive experimental studies of the drying, firing, and structure formation processes of ceramic

materials produced with the use of crushing screenings from crushed-stone quarries. The main focus is placed on establishing the regularities governing changes in structure-sensitive properties of the material depending on the granulometric composition of the technogenic additive, the ratio of batch components, and the temperature regimes of thermal treatment.

The studies have shown that the introduction of crushing screenings significantly affects the forming properties of ceramic bodies. With an increase in the content of the technogenic additive, a consistent decrease in the plasticity of the forming mass is observed, which is explained by a reduction in the proportion of clay minerals and an increase in the content of non-plastic aluminosilicate components. As a result, air shrinkage during drying decreases and the stability of the geometric parameters of green products improves. Experimental results indicate that air shrinkage decreases from 8–9% for the reference composition to 5–6% when a significant amount of crushing screenings is introduced.

The investigation of firing processes revealed an intensification of liquid-phase sintering accompanied by an increase in firing shrinkage and the formation of a denser ceramic body structure. In particular, at a firing temperature of 950 °C, firing shrinkage increases from approximately 2–3% for the reference composition to about 5% for compositions with an increased content of technogenic additive. At the same time, a consistent reduction in open porosity from 27–28% to 18–19% is observed, indicating the activation of structural densification processes and an improvement in the density of the ceramic material.

An increase in the firing temperature to 1050–1100 °C further intensifies sintering processes, promotes the active formation of a glassy phase, and increases the degree of structural densification of the material. Under these conditions, open porosity decreases to 12–14%, the average density of the ceramic body increases to 1900–2000 kg/m³, and compressive strength reaches 30–32 MPa. The obtained results confirm the significant influence of firing temperature regimes on structure formation processes and on the performance properties of ceramic materials.

It has been established that the dependence of mechanical strength on batch composition is of an extreme (non-linear) nature. The highest strength values are achieved when crushing screenings are introduced in an amount of 60–65 wt%, which ensures an optimal balance between the volume of the liquid phase formed during firing and the quantity of crystalline components forming a rigid structural framework. A further increase in the content of the technogenic additive leads to a decrease in the shape stability of the products and deterioration of their performance characteristics due to excessive glass formation.

Based on the experimental studies, phenomenological and regression-based mathematical models describing the processes of structure formation in ceramic materials have been developed. These models characterize the relationships between the content of the technogenic additive, firing temperature, and the main physical and mechanical properties of the products. The proposed models make it possible to predict changes in open porosity, average density, strength, and shrinkage deformations depending on technological parameters, thereby providing a scientific basis for optimizing production processes.

Generalization of the obtained results made it possible to substantiate rational technological parameters for the integrated processing of crushing screenings in the production of construction ceramic materials. It has been established that the optimal range of compositions corresponds to the replacement of clay raw materials with technogenic additive at the level of 60–65 wt% at a firing temperature of about 1100 °C. Under these conditions, the most efficient utilization of secondary mineral raw materials is ensured together with an improvement in the physical and mechanical characteristics of the products.

Thus, the research results form a scientifically substantiated basis for the development of resource-saving technologies for the production of building materials using technogenic mineral waste from the mining industry. The proposed technological solutions can be implemented at enterprises of the construction industry in order to increase the efficiency of mineral resource utilization, reduce production costs, and

improve the environmental safety of technological processes.

In summary, it has been established that the integrated processing of crushing screenings contributes to increasing the level of comprehensive development of non-metallic mineral deposits, reducing the volumes of technogenic accumulations, and promoting the advancement of environmentally oriented technologies for the production of building materials.

Keywords: crushing screenings, technogenic waste, secondary mineral raw materials, construction ceramics, structure formation, liquid-phase sintering, porosity, density, strength, mathematical modeling, resource saving.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Криворучко А. О., Іськов С. С., Куницька М. С., Олійник О. В., Шлапак, В.О. Дослідження просторової мінливості показників якості покладу Мурзинського родовища вторинних каолінів. *Технічна інженерія*. 2023. №1(91). С. 347–355. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-347-355](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-347-355) (0,47 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: описано порядок здійснення геометризації Мурзинського родовища вторинних каолінів, підготовка окремих графічних матеріалів та участь в інтерпретації результатів моделювання).

2. Олійник О.В., Башинський С.І. Комплексна оцінка відвалів видобутку граніту та габро як ресурсу для будівельної індустрії. *Технічна інженерія*. 2025. №2(96). С. 252–258. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-252-258](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-252-258) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,25 д.а.: проведено аналіз фізико-механічних властивостей відвальних мас граніту та габро, обґрунтовано напрями їх використання у виробництві будівельних матеріалів та узагальнено результати комплексної оцінки ресурсної бази).

3. Олійник О.В. Оцінка якості відсівів щебеневої сировини у породних відвалах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2025. №83. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.037> (0,5 д.а.).

4. Олійник О.В. Обґрунтування використання відсівів гранітоїдних порід у виробництво керамічної цегли з додаванням каоліну. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2025. №3(111). С. 67–79. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt320257> (0,75 д.а.).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Башинський С.І. Олійник О.В., Криворучко А.О. Дослідження просторової мінливості Злобицького родовища ільменіту. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених,*

присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: «Житомирська політехніка». 2023. С. 192-193. (0,1 д.а., особисто автору належить 0,04 д.а.: проведено збір та систематизацію первинних геологічних даних щодо вмісту ільменіту в межах родовища, участь у побудові картограм просторової мінливості компонентів).

6. Башинський С.І. Олійник О.В. Перспективи використання занурюваних насосів при розробці родовищ будівельних пісків. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: «Житомирська політехніка». 2023. С. 190-191. (0,1 д.а., особисто автору належить 0,05 д.а.: проведено аналіз технічних характеристик сучасних моделей занурюваних насосів, досліджено умови їх ефективного застосування при підводному видобутку піску та участь в узагальненні результатів порівняльного аналізу).*

7. Олійник О.В. Гранітний шлам як каталізатор низькотемпературного спікання керамічних композицій на основі каоліну. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва», 20 листопада 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С. 120–121. (0,10 д.а.)*

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	16
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕВАЛОРИЗАЦІЇ ВІДВАЛІВ ВІДХОДІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ТА СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ МАС.....	26
1.1. Аналіз світового досвіду та тенденцій у сфері використання техногенних відходів видобувної промисловості	26
1.2. Сучасні методи ревалоризації відвалів відходів природного каменю .	31
1.3. Аналіз технологій переробки відсівів щебеневої сировини	38
Висновки до розділу 1	55
РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВІДВАЛІВ ВИДОБУТКУ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ЯК РЕСУРСУ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ	57
2.1. Методологічні основи та результати комплексної оцінки відвалів видобутку природного каменю	57
2.2. Фізико-технологічні властивості відсівів дроблення як сировини для виготовлення керамічних і композиційних матеріалів.....	71
2.3. Методика експериментального дослідження отримання керамічних матеріалів із використанням техногенного шламу	79
Висновки до розділу 2	89
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДСІВІВ ДРОБЛЕННЯ У КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ	92
3.1. Дослідження гранулометричних та фізико-хімічних властивостей відсівів дроблення.....	92
3.2. Розроблення складів керамічних композицій із використанням	

відсівів	97
3.3. Експериментальні дослідження процесів випалу та властивостей керамічних матеріалів	107
Висновки до розділу 3	118
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТКИ	142

ВСТУП

Актуальність. Сучасний розвиток гірничодобувної та будівельної галузей супроводжується інтенсивним зростанням обсягів видобутку нерудної мінеральної сировини, що водночас призводить до накопичення значної кількості техногенних відходів. Однією з найбільш гострих екологічних і виробничих проблем є утворення відсівів дроблення на щебенових кар'єрах, частка яких може становити 10–30 % від загального обсягу переробленої гірничої маси. Їх накопичення зумовлює вилучення значних площ земель із господарського використання, порушення природних ландшафтів, пилове забруднення атмосферного повітря та загальне погіршення екологічного стану гірничих регіонів.

Водночас сучасні підходи до сталого розвитку та принципи циркулярної економіки передбачають раціональне використання мінеральних ресурсів і повторне залучення техногенних матеріалів у виробничі процеси. У цьому контексті відсиви дроблення розглядаються не лише як відходи, а як перспективна вторинна мінеральна сировина, здатна частково замінювати природні матеріали у будівельній індустрії. Їх використання у технологічних циклах дозволяє підвищити рівень комплексного освоєння родовищ, знизити собівартість продукції та зменшити негативний вплив гірничої діяльності на довкілля.

Одним із найбільш ефективних напрямів утилізації таких матеріалів є їх застосування у виробництві будівельної кераміки. Дрібнодисперсний гранулометричний склад, а також наявність у мінералогічній структурі оксидів-плавнів створюють передумови для інтенсифікації процесів спікання та формування більш щільної структури керамічних виробів. Разом із тим відсутність науково обґрунтованих технологічних рішень щодо комплексної переробки відсівів дроблення, визначення їх оптимального вмісту у складі шихти

та раціональних температурних режимів випалу суттєво обмежує можливості їх широкого промислового використання.

У зв'язку з цим розроблення наукових засад і технологічних підходів до комплексної переробки відсівів дроблення щебеневих кар'єрів є актуальною науково-практичною задачею. Її вирішення сприятиме підвищенню ефективності використання мінерально-сировинної бази, створенню ресурсозберігаючих технологій виробництва будівельних матеріалів, зменшенню обсягів техногенних відходів і поліпшенню екологічного стану територій видобування нерудної сировини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася на кафедрі гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка» в межах науково-дослідної теми «Обґрунтування оптимальних параметрів гідроабразивного впливу на природний облицювальний камінь в умовах ТОВ «Укрстоун» (№ ДР 0125U003916), у межах якої автор брав участь як виконавець, та у рамках зазначеної тематики здійснювалися дослідження техногенних продуктів каменевидобування, що стало підґрунтям для оцінки можливостей їх подальшої комплексної переробки та використання у виробництві будівельних матеріалів. Також робота виконана в рамках Перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Державного університету «Житомирська політехніка» за бюджетною програмою 2201390 «Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти» (наказ МОН від 25.03.2021 №372).

Мета і завдання дослідження полягає в науковому обґрунтуванні технологічних рішень щодо комплексної переробки відсівів дроблення щебеневих кар'єрів як вторинної мінеральної сировини з метою їх ефективного використання у виробництві будівельних керамічних матеріалів.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі поставлено та вирішено такі завдання:

- Проаналізувати сучасний стан і основні тенденції ревалоризації техногенних відходів гірничодобувної промисловості та визначити перспективні напрями використання відсівів дроблення у будівельній індустрії.
- Провести комплексну оцінку техногенних відвалів щебеневих кар'єрів і встановити їх ресурсний потенціал як джерела вторинної мінеральної сировини.
- Дослідити гранулометричні, фізико-механічні, мінералогічні та хімічні властивості відсівів дроблення, а також визначити їх технологічну придатність для використання у складі керамічних мас.
- Розробити склади керамічних композицій із різним рівнем заміни глинистої сировини техногенною добавкою та встановити закономірності зміни формувальних властивостей керамічних мас.
- Виконати експериментальні дослідження процесів сушіння і випалу керамічних матеріалів із використанням відсівів дроблення та визначити вплив складу шихти і температурних режимів на фізико-механічні характеристики виробів.
- Побудувати математичні моделі процесів структуроутворення керамічних матеріалів залежно від вмісту техногенної добавки та параметрів термічної обробки.
- Обґрунтувати раціональні технологічні параметри комплексної переробки відсівів дроблення та визначити оптимальні умови їх використання у виробництві будівельної кераміки.

Об'єкт дослідження – процес комплексної переробки відсівів дроблення щебеневих кар'єрів як вторинної мінеральної сировини у технологіях виробництва будівельних керамічних матеріалів.

Предмет дослідження – закономірності формування гранулометричних, структурних і фізико-механічних властивостей керамічних матеріалів залежно від складу шихти, вмісту техногенної мінеральної добавки та температурних режимів випалу.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі застосовано комплекс сучасних наукових методів дослідження. Зокрема, проведено аналіз і узагальнення науково-технічної інформації щодо утилізації техногенних мінеральних відходів та виробництва будівельної кераміки. Виконано польові й камеральні дослідження техногенних відвалів щебеневих кар'єрів, а також лабораторні випробування для визначення гранулометричного складу, фізико-механічних і хімічних властивостей мінеральної сировини. Для вивчення особливостей формування властивостей матеріалів використано методи фізичного моделювання процесів сушіння та випалу керамічних виробів. Закономірності структуроутворення встановлювалися із застосуванням математичного моделювання та регресійного аналізу, а обробку результатів експериментальних досліджень здійснювали методами математичної статистики.

Технології штучного інтелекту (зокрема ChatGPT) використовувалися: 1) для пошуку, систематизації та попереднього аналізу науково-технічної інформації щодо сучасних підходів до ревалоризації техногенних відходів гірничодобувної промисловості, комплексної переробки відсівів дроблення та їх використання у виробництві будівельних матеріалів; 2) для перекладу окремих наукових публікацій, представлених у міжнародних наукометричних базах даних «Scopus» та «Web of Science», з англійської мови на українську під час вивчення фізико-хімічних властивостей техногенних мінеральних матеріалів, процесів структуроутворення керамічних композицій та технологій утилізації відходів каменевидобування; 3) для пошуку окремих нормативних, довідкових та аналітичних матеріалів, що стосуються принципів циркулярної економіки, ресурсозбереження та комплексного використання мінеральної сировини. Технології штучного інтелекту не використовувалися для генерування тексту дисертації, формулювання наукової новизни, висновків або наукових положень, що виносяться на захист. Усі експериментальні дослідження, лабораторні випробування, обробка результатів, математичне моделювання, побудова

залежностей, статистичний аналіз експериментальних даних та інтерпретація отриманих результатів виконувалися автором самостійно із застосуванням стандартних методів математичної статистики та спеціалізованого програмного забезпечення.

Наукову новизну отриманих результатів представлено науковими положеннями, в яких

Вперше:

- встановлено особливості впливу відсівів дроблення магматичних порід на процеси структуроутворення керамічних матеріалів, які полягають у поєднанні отощувальної дії техногенної добавки на стадії формування та її участі у процесах спікання під час випалу, що забезпечує зниження повітряної усадки керамічної маси від 6,2 до 0,9 % та підвищення стабільності виробів у процесі сушіння;

- встановлено закономірність зміни фізико-механічних властивостей керамічних матеріалів залежно від вмісту відсівів дроблення та температури випалу, відповідно до якої підвищення температури випалу з 950 до 1100 °C забезпечує зменшення відкритої пористості на 2,0–3,4 %, підвищення середньої густини на 80–120 кг/м³ та збільшення міцності при стиску у 1,2–2,1 раза залежно від складу керамічної шихти;

- встановлено закономірність зміни температури початку деформації керамічних матеріалів під впливом відсівів дроблення магматичних порід, яка характеризується підвищенням показника від 1205 до 1270 °C після випалу при 950 °C та його зниженням від 1265 до 1212 °C після випалу при 1100 °C, що дозволило обґрунтувати доцільність використання відсівів дроблення магматичних порід у кількості 40–50 % та визначити раціональні температурні режими термічної обробки.

Удосконалено:

- математичні залежності впливу вмісту відсівів дроблення магматичних порід і температури випалу на процеси структуроутворення керамічних

матеріалів, що дозволяють прогнозувати зміну пористості, густини та міцності виробів у широкому діапазоні технологічних режимів.

Набули подальшого розвитку:

- наукові положення щодо комплексного освоєння родовищ нерудних корисних копалин на основі використання відсівів дроблення як вторинної мінеральної сировини, що забезпечує залучення до переробки до 50 % техногенних матеріалів та заміщення до 50 % природних компонентів керамічних мас.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- запропоновано підхід до оцінювання техногенних відвалів із використанням БПЛА, фотограмметричного моделювання та цифрового гранулометричного аналізу для визначення їх ресурсного потенціалу;

- встановлено перспективність використання відсівів дроблення як вторинної алюмосилікатної сировини для виробництва будівельної кераміки та інших композиційних матеріалів;

- визначено раціональні параметри використання відсівів дроблення у складі керамічних мас (40–50 мас.% техногенної добавки при температурі випалу близько 1100 °С), що забезпечують отримання матеріалу з високими показниками міцності та низькою пористістю;

- розроблено математичні моделі прогнозування властивостей керамічних матеріалів залежно від складу шихти та температури випалу, які можуть використовуватися для оптимізації технологічних режимів виробництва;

- результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр» та можуть бути використані підприємствами гірничодобувної, гірничо-переробної та будівельної галузей для впровадження ресурсозберігаючих технологій та підвищення ефективності використання мінеральної сировини;

- практичні результати досліджень реалізовано в освітньому процесі Державного університету «Житомирська політехніка» під час викладання

навчальних дисциплін: «Технологія і механізація розпилювання каменю», «Технологія розробки родовищ стінового каменю», «Технологія та обладнання виробництва щебеню» та «Переробка та збагачення корисних копалин».

Обґрунтованість наукових положень і достовірність отриманих результатів забезпечується:

- значним обсягом лабораторних і аналітичних досліджень;
- застосуванням сучасних експериментальних методів та математичної статистики;
- узгодженням отриманих результатів із теоретичними положеннями фізико-хімії керамічних матеріалів;
- порівнянням експериментальних даних із результатами досліджень інших авторів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є закінченою, самостійно виконаною науковою працею. Наукові розробки, висновки, рекомендації, положення, які подано у дисертаційній роботі, є результатом самостійно проведеного наукового дослідження. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які представлені до захисту, одержані автором особисто (звіт подібності сформований за допомогою програми StrikePlagiarism (додаток Г).

Апробація результатів дисертації. Головні результати та висновки дисертаційної роботи оприлюднені на всеукраїнських науково-практичних конференціях: Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченій Дню науки» (15-19 травня 2023 року); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (20 листопада 2025 року).

Повнота опублікування результатів дослідження. Основні положення наукових розробок, отриманих здобувачем, опубліковано у 7 наукових працях загальним обсягом 2,47 друк. арк. (авторський обсяг – 1,89 друк. арк.), із них 4 статей у наукових фахових виданнях загальним обсягом 2,17 друк. арк. (авторський обсяг – 1,7 друк. арк.); 3 публікації у матеріалах і тезах конференцій

загальним обсягом 0,3 друк. арк. (авторський обсяг – 0,19 друк. арк.) (додаток А).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів і висновку, викладених на 141 сторінках основного тексту, містить 31 рисунок, 18 таблиць, список використаних джерел із 118 найменувань на 14 сторінках та 4 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕВАЛОРИЗАЦІЇ ВІДВАЛІВ ВІДХОДІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ТА СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ МАС

1.1. Аналіз світового досвіду та тенденцій у сфері використання техногенних відходів видобувної промисловості

Світова практика поводження з техногенними відходами гірничодобувної галузі свідчить про поступову зміну підходів – від їх простого знешкодження або захоронення до повторного використання як цінних вторинних ресурсів. Такий підхід, відомий як ревалоризація, передбачає надання відходам нової економічної та екологічної значущості. Водночас результати сучасних досліджень підтверджують, що хвостосховища й відвали можуть становити серйозну загрозу для навколишнього середовища, зокрема через можливе забруднення підземних вод і ризики аварійного руйнування гідротехнічних споруд, що зумовлює необхідність застосування ефективних заходів ремедіації [1]. У контексті глобального переходу до принципів циркулярної економіки держави з потужним видобувним сектором активно впроваджують технології переробки таких відходів. Це дає змогу зменшити антропогенне навантаження на довкілля, обмежити потребу у видобутку первинної сировини та мінімізувати процеси деградації природних ландшафтів. Трансформація цих підходів у видобувній галузі схематично представлена на рис. 1.1.

Модель, подана на рис. 1.1, демонструє підхід до залучення техногенних відходів у три взаємопов'язані контури ревалоризації. У межах внутрішнього контуру передбачено повторне освоєння відвалів (re-mining), що дає змогу зменшити втрати цінних компонентів. Міжгалузевий та екологічний контури, своєю чергою, орієнтовані на перетворення відходів на низьковуглецеві будівельні матеріали та засоби відновлення порушених територій. Такий підхід сприяє переходу від традиційної лінійної схеми «видобуток – відходи» до

замкненої системи управління ресурсами, що узгоджується зі стратегічними орієнтирами сталого розвитку [8, 21].



Рис. 1.1. Концептуальна модель циклічного управління техногенними ресурсами у видобувній галузі

У країнах Європи значна увага приділяється проектам, спрямованим на комплексне дослідження складу та екологічну реабілітацію відходів гірничого виробництва. За даними Б. Лоттермозера [2], понад третина успішних практик у цій сфері ґрунтується на детальному мінералогічному аналізі відходів, який дає змогу визначити найбільш ефективні напрями їх подальшого використання – від вилучення залишкових металів до застосування у виробництві керамічної продукції чи дорожніх матеріалів. Провідні позиції у впровадженні технологій очищення та стабілізації шламів займають Німеччина, Швеція та Фінляндія, що свідчить про системну інтеграцію екологічних принципів у національну політику розвитку видобувної галузі.

У Китаї, який належить до найбільших генераторів техногенних відходів, пріоритет надається масштабному використанню відходів вуглезбагачення. Результати новітніх досліджень підтверджують доцільність заміни природного

піску подрібненою вугільною породою у складі конструкційних бетонів [3]. Це відкриває можливості для створення будівельних матеріалів із меншим вуглецевим слідом і водночас допомагає зменшити залежність від природних заповнювачів. Застосування таких технологій базується на поєднанні механічних, термічних і хімічних методів обробки, що забезпечує отримання матеріалів із новими експлуатаційними властивостями. Узагальнені напрями використання різних видів техногенної сировини у світовій практиці наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Систематизація світових напрямів ревалоризації техногенних відходів
видобувної промисловості

Напрямок використання	Види техногенних відходів	Ключові технології та методи	Країни-лідери	Джерела
Будівельна індустрія	Вугільна порода, хвости збагачення, червоні шлами	Заміна природних заповнювачів у бетоні, стабілізація та солідифікація	Китай, Індія, Бразилія	[3, 4, 10, 11]
Геополімерні технології	Алюмосилікатні хвости, шлами сульфідних руд	Лужна активація відходів для створення безцементних в'язучих	Фінляндія, Бельгія, Австралія	[9]
Вилучення цінних компонентів	Старі хвостосховища, бідні відвали	Біовилуговування, гідрометалургія, флотаційне дозбагачення	Чилі, ПАР, США, Канада	[6, 13, 15]
Екологічна інженерія	Силікатні породи (базальт, габро), карбонатні відсів	Секвестрація CO ₂ , створення сорбентів для очищення вод	Норвегія, Канада, Велика Британія	[18, 20]
Геотехнічне використання	Скельні породи, дрібнодисперсні хвости	Пастоподібна закладка виробленого простору, рекультивація	Німеччина, Австралія	[1, 16, 17]

Подібні підходи спостерігаються також в Індії та низці інших країн Азії, де

на державному рівні заохочується використання побічних продуктів видобутку та спалювання вугілля у цементній промисловості. Активне застосування таких матеріалів як мінеральних добавок до бетонних сумішей дає змогу не лише зменшити обсяги накопичених відходів, а й підвищити довговічність будівельних конструкцій та їхню стійкість до впливу агресивних середовищ [4].

В Австралії та Канаді значної уваги набувають біотехнологічні підходи до управління хвостосховищами. Згідно з результатами досліджень [5], мікроорганізми можуть ефективно застосовуватися як для селективного вилучення металів, так і для біоремедіації забруднених територій. Це створює передумови для поєднання досягнень мікробіології та гірничої інженерії, що дозволяє поступово зменшувати токсичність відвалів і підвищувати рівень екологічної безпеки.

У країнах Латинської Америки, зокрема в Чилі та Бразилії, одним із пріоритетних напрямів є вдосконалення технологій очищення флотаційних відходів. Дослідження свідчать, що застосування модифікованого бентоніту сприяє більш ефективному вилученню залишків реагентів, таких як ксантогенати, із хвостів збагачення [6]. Водночас поглиблене вивчення фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхні мінералів, зокрема кварцу, дає змогу підвищити точність розділення корисних компонентів і пустої породи. Це, своєю чергою, сприяє підвищенню ефективності повторного освоєння відвалів (re-mining) [7].

Аналітичні оцінки OECD показують, що питання ефективного використання відходів дедалі тісніше пов'язується з усвідомленням зростаючого дефіциту первинних ресурсів, який, за прогнозами, посилюватиметься до 2060 року [8]. У цьому контексті активно розвиваються геополімерні технології. На відміну від традиційного портландцементу, геополімери створюються на основі алюмосилікатних відходів, що дозволяє одночасно зменшувати викиди CO₂ та залучати до господарського обігу значні обсяги промислових шлаків [9].

Разом із тим використання окремих видів відходів, зокрема червоного

шламу, потребує ретельного дослідження їхнього впливу на реологічні властивості та міцність будівельних сумішей [10]. У цьому напрямі широко застосовуються технології стабілізації та солідифікації, які дають змогу переводити небезпечні або рідкі відходи у стійкий монолітний стан, придатний для подальшого використання в інфраструктурних проєктах [11].

У виробництві стінових керамічних матеріалів світова практика орієнтується на дослідження кінетики термічного розкладання відходів, що містять карбонати та інші домішки [12]. Це дозволяє оптимізувати режими випалу та ефективно використовувати відходи як технологічні добавки під час виготовлення цегли. Водночас повторне освоєння старих хвостосховищ набуває особливої актуальності у зв'язку з необхідністю вилучення рідкісноземельних елементів, концентрація яких у відвалах інколи перевищує їхній вміст у бідних рудах [13].

Важливим стратегічним напрямом є також отримання критично важливих видів сировини. Європейська комісія розглядає це як одну з ключових умов забезпечення технологічної незалежності [14]. У цьому контексті гідрометалургійні та біотехнологічні методи, зокрема біовилуговування, дають змогу вилучати метали з техногенних відходів із меншими енерговитратами та нижчим екологічним навантаженням порівняно з традиційними підходами [15].

Серед найбільш поширених напрямів практичного використання відходів залишається їх застосування для геотехнічних потреб, зокрема для закладки виробленого простору шахт. Це сприяє підвищенню безпеки гірничих робіт і зменшенню соціально-економічних ризиків у регіонах видобутку [16]. Для визначення придатності відходів як ізоляційних або конструкційних матеріалів широко застосовуються методики оцінювання питомої поверхні та здатності до набухання, зокрема тест із метиленовим синім [17]. Крім того, відходи гірничого виробництва дедалі частіше розглядаються як ефективні сорбенти для очищення стічних вод від важких металів, що реалізує принцип повторного використання матеріалів у природоохоронних технологіях [18].

Сучасні інженерні рішення також передбачають підвищення довговічності обладнання, яке використовується під час переробки відходів. Зокрема, це досягається шляхом нанесення керамічних оксидних покриттів, стійких до абразивного та хімічного впливу [19]. Окрему увагу приділяють потенціалу силікатних відходів у процесах секвестрації вуглецю. Використання методу прискореного мінерального вивітрювання на сільськогосподарських землях дозволяє зв'язувати атмосферний CO_2 у формі стабільних мінеральних сполук [20].

Попри суттєвий технологічний прогрес, важливим стримувальним чинником залишаються економічні та нормативні обмеження. Досвід Бразилії та інших держав свідчить, що успішне впровадження технологій повторного використання відходів залежить від узгодженості соціальних, економічних і законодавчих механізмів підтримки [21]. За відсутності чітких державних стандартів і стимулів навіть перспективні рішення часто залишаються на стадії експериментальних або пілотних проєктів.

Отже, сучасний глобальний підхід до управління відходами гірничодобувної промисловості зазнає суттєвих трансформацій. Перехід від сприйняття відходів як суто екологічної проблеми до розуміння їх як потенційного ресурсу зумовлений як зростанням дефіциту сировини, так і необхідністю виконання кліматичних зобов'язань. Світовий досвід переконливо свідчить, що техногенні відходи поступово стають важливою складовою майбутньої ресурсної бази та одним із ключових чинників формування низьковуглецевої економіки.

1.2. Сучасні методи ревалоризації відвалів відходів природного каменю

Інтенсивний розвиток гірничодобувної та каменеобробної галузей супроводжується утворенням значних обсягів відходів, які накопичуються у вигляді відвалів, хвостосховищ і шламонакопичувачів. У процесі видобування та обробки природного каменю формується кілька видів техногенних матеріалів,

що виникають на різних технологічних етапах виробництва. Узагальнену схему утворення відходів природного каменю та можливі напрями їх подальшого використання подано на рис. 1.1 [22; 23].

Накопичення таких відходів зумовлює зміну природних ландшафтів, сприяє деградації земельних ресурсів і створює потенційні екологічні загрози. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження ефективних підходів до управління відходами гірничодобувної промисловості [24].

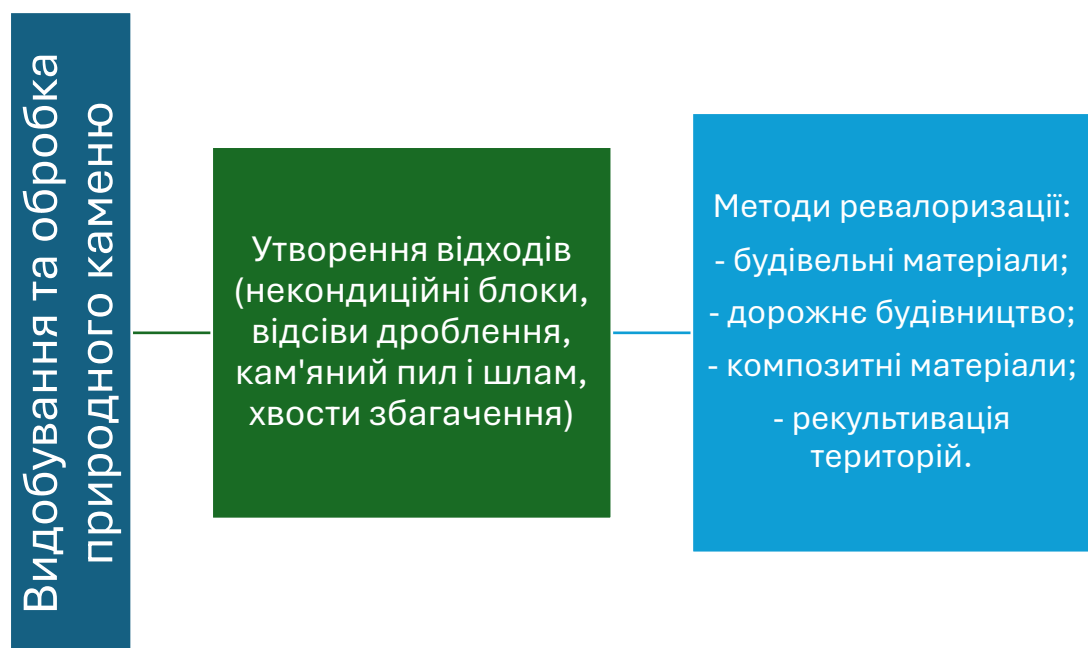


Рис. 1.2. Схема утворення та використання відходів природного каменю

У сучасних наукових дослідженнях відходи гірничодобувної промисловості дедалі частіше розглядаються як перспективне джерело вторинної мінеральної сировини. Такий підхід узгоджується з принципами циркулярної економіки, що передбачають раціональне повторне використання ресурсів і скорочення обсягів утворення відходів [25, 26].

У багатьох випадках техногенні накопичення містять корисні мінерали або компоненти, придатні для подальшої переробки, що відкриває можливості для їх ревалоризації та повторного залучення у виробничі процеси [27, 28]. Сучасні

підходи до ревалоризації відходів природного каменю передбачають їх застосування у будівельній галузі, промисловому виробництві, а також у заходах з екологічного відновлення порушених територій. Основні напрями такого використання узагальнено подано на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Сучасні підходи до ревалоризації відходів природного каменю

Одним із визначальних етапів ревалоризації є вивчення мінералогічного та геохімічного складу відходів. Сучасні методи автоматизованої мінералогії та електронної мікроскопії дають змогу встановлювати фазовий склад матеріалів, оцінювати ступінь розкриття мінералів і досліджувати особливості мікроструктури гірських порід [29, 30].

Застосування кількісної електронної мікроскопії та підходів процесної мінералогії забезпечує більш точне визначення потенціалу відходів щодо їх подальшої переробки та використання у промисловості [31, 32]. Узагальнену

характеристику основних видів відходів каменевидобування та можливі напрями їх ревалоризації подано в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Основні типи відходів, що утворюються під час видобування та обробки природного каменю

Тип відходів	Джерело утворення	Основні характеристики	Можливі напрями ревалоризації
Великі фрагменти порід	Видобування блоків у кар'єрах	Масивні уламки гірських порід	Будівництво, ландшафтна архітектура
Відсів дроблення	Дроблення та сортування каменю	Дрібні фракції щебеню	Дорожнє будівництво, бетонні суміші
Кам'яний пил	Різання та шліфування каменю	Дуже дрібнодисперсний матеріал	Добавки до цементу, кераміка
Каменеобробний шлам	Полірування та обробка каменю	Висока вологість, дрібні частинки	Керамічна промисловість, геополімери
Хвости збагачення	Переробка мінеральної сировини	Суміш мінеральних частинок	Повторне вилучення корисних компонентів

Мікроструктурні дослідження відходів дають змогу оцінити характер фізико-хімічних змін, що відбуваються у техногенних накопиченнях. Аналіз структури хвостів і гірничих відходів дозволяє виявити процеси цементації та формування щільних шарів, які можуть істотно впливати на стабільність відвалів [33, 34]. Такі дослідження є важливими для прогнозування поведінки відходів у природних умовах і розроблення ефективних технологій їх переробки [35].

Геохімічні процеси, що протікають у гірничих відходах, часто супроводжуються окисненням сульфідних мінералів і утворенням кислотного дренажу. За результатами досліджень, окиснення пірротину та інших сульфідів є одним із головних чинників забруднення водних ресурсів у районах гірничодобувної діяльності [36, 37]. Водночас взаємодія різних мінеральних фаз

може прискорювати корозійні процеси та впливати на загальну стійкість техногенних відвалів [38, 39].

Для оцінювання ресурсного потенціалу відходів у сучасних дослідженнях активно застосовують геостатистичні методи. Вони дозволяють аналізувати просторовий розподіл мінеральних компонентів у хвостах і відвалах та визначати перспективні ділянки для повторного вилучення корисних складових [26, 40]. Аналіз техногенних родовищ свідчить, що в багатьох випадках відвали можуть розглядатися як перспективні джерела вторинної мінеральної сировини [41].

Одним із найпоширеніших напрямів ревалоризації відходів є їх використання у будівельній індустрії. Кам'яні відходи можуть застосовуватися як заповнювачі для бетону, матеріал для дорожнього будівництва або як сировина для виготовлення різних будівельних виробів [42, 43]. Дослідження підтверджують, що використання відходів гранітного видобування у бетонних сумішах дозволяє забезпечити необхідні показники міцності та довговічності конструкцій [44].

Дрібнодисперсні відходи каменеобробних підприємств також мають значний потенціал для використання у виробництві керамічних матеріалів. Зокрема, шлам, що утворюється під час різання та полірування каменю, може застосовуватися як добавка до керамічних сумішей, що сприяє скороченню використання природної сировини [45, 46]. Такі підходи підвищують ресурсоефективність виробництва та зменшують екологічне навантаження на довкілля [47, 48].

Перспективним напрямом ревалоризації є створення нових композиційних матеріалів на основі відходів природного каменю. Зокрема, встановлено, що суміші відходів граніту та рекристалізованого вапняку можуть використовуватися для отримання композитів із покращеними фізико-механічними характеристиками [49]. Крім того, відходи мармуру знаходять застосування у технологіях адитивного виробництва, зокрема для створення будівельних елементів за допомогою 3D-друку [50].

Окремим напрямом ревалоризації є переробка кам'яних відходів із метою отримання промислових карбонатів. Такі матеріали широко застосовуються у виробництві паперу, фарб, пластмас та інших промислових продуктів [51, 52]. Їх виробництво з техногенних накопичень дозволяє перетворювати відходи на цінний ресурс для різних галузей промисловості [53].

Важливим аспектом ревалоризації є забезпечення екологічної безпеки відвалів. У світовій практиці значну увагу приділяють дослідженню стабільності хвостосховищ і гірничих відвалів, оскільки їх руйнування може спричиняти масштабні техногенні катастрофи [54, 55]. Для оцінювання таких ризиків застосовують інженерні методи моделювання та аналізу стійкості гірничих споруд [56].

Дослідження також акцентують увагу на необхідності оцінювання впливу гірничих відходів на водні екосистеми. Порівняльний аналіз різних способів розміщення хвостів свідчить, що рівень їхнього впливу на довкілля значною мірою залежить від умов зберігання та систем управління відходами [57, 58]. Крім того, кліматичні й гідрологічні особливості територій можуть впливати на процеси міграції хімічних елементів у техногенних накопиченнях [59, 60].

Одним із важливих напрямів ревалоризації є рекультивація порушених земель. Відновлення природних екосистем на територіях відвалів передбачає формування родючого шару ґрунту та створення рослинного покриву [61]. У деяких випадках відпрацьовані кар'єри можуть використовуватися для розміщення об'єктів відновлюваної енергетики, зокрема сонячних електростанцій [62].

Окрім екологічних і технологічних аспектів, ревалоризація відвалів має також вагоме соціально-економічне значення. Відпрацьовані кар'єри можуть інтегруватися у туристичну інфраструктуру як об'єкти індустриальної спадщини або геотуристичні локації [63, 64]. Такі території здатні стати важливими чинниками регіонального розвитку та створення нових економічних можливостей [65].

Використання геологічних моделей родовищ і сучасних підходів до класифікації мінералів дозволяє глибше зрозуміти процеси формування гірничих відходів і точніше оцінити їхній ресурсний потенціал [66, 67]. Мінералогічна систематика відіграє важливу роль у дослідженні складу відходів та визначенні можливостей їх повторного використання [68]. Загалом сучасні підходи до управління відходами каменевидобувної промисловості передбачають їх комплексне залучення у різні галузі економіки. Основні напрями ревалоризації відходів природного каменю, їх сутність і переваги узагальнено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3.

Основні сучасні напрями ревалоризації відвалів природного каменю

Напрямок використання	Суть методу	Переваги	Приклади використання
Будівельні матеріали	Використання відходів як наповнювачів	Зменшення споживання природної сировини	Бетон, тротуарна плитка
Дорожнє будівництво	Застосування відходів у дорожніх основах	Зниження вартості будівництва	Основи доріг, асфальтобетон
Композитні матеріали	Створення нових матеріалів із відходів	Підвищення міцності та довговічності	Композитні будівельні матеріали
Адитивне виробництво	Використання порошків каменю у 3D-друці	Інноваційне використання ресурсів	Архітектурні елементи
Промислові мінерали	Отримання карбонатів та інших продуктів	Висока додана вартість	СаСО ₂ для промисловості
Рекультивация	Відновлення екосистем	Поліпшення стану довкілля	Озеленення кар'єрів

Отже, сучасні підходи до ревалоризації відвалів природного каменю охоплюють широкий спектр технологічних, екологічних і економічних рішень. Вони передбачають повторну переробку гірничих відходів, використання кам'яних матеріалів у будівництві, створення нових композиційних матеріалів, рекультивацію порушених земель, а також інтеграцію техногенних ландшафтів у соціально-економічний простір.

Реалізація таких підходів сприяє підвищенню ефективності використання природних ресурсів і зменшенню негативного впливу гірничодобувної діяльності на довкілля [69]. Основні екологічні та економічні ефекти ревалоризації відходів природного каменю узагальнено подано на рис. 1.4.

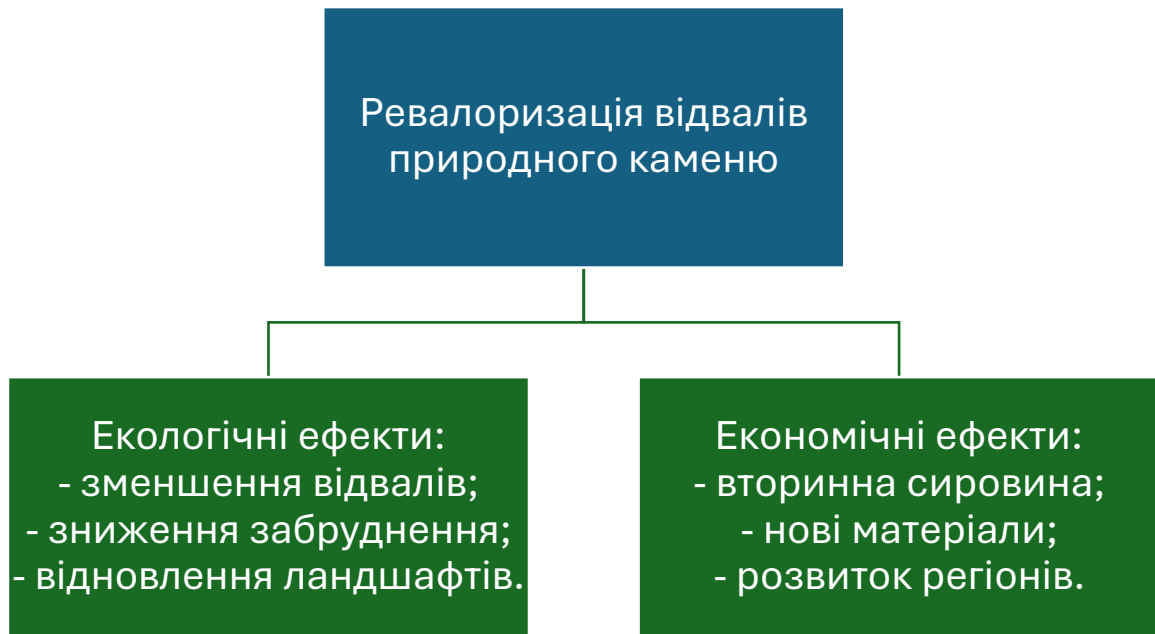


Рис. 1.4. Екологічні та економічні ефекти ревалоризації відходів

1.3. Аналіз технологій переробки відсівів щебеневої сировини

Видобування та переробка нерудної мінеральної сировини, зокрема гранітів, габро, лабрадоритів та інших магматичних порід, відіграють важливу роль у розвитку будівельної індустрії. Водночас виробництво щебеню супроводжується утворенням значних обсягів побічних продуктів – відсівів дроблення та дрібнодисперсних мінеральних відходів (рис. 1.5).

Частка таких матеріалів може становити 10–30 % від загального обсягу переробленої гірничої маси, що зумовлює необхідність їх раціонального використання та подальшої переробки [70]. Накопичення відсівів у відвалах

призводить до втрати потенційно цінної сировини, зайняття значних площ земель і посилення негативного впливу на навколишнє середовище.



Рис. 1.5. Технологічна схема утворення відсівів у процесі виробництва щебеню

Сучасна технологія виробництва щебеню включає комплекс послідовних операцій, зокрема видобування гірської породи, її транспортування до дробильно-сортувального комплексу, первинне та вторинне дроблення, грохочення і класифікацію матеріалу за фракційним складом. У процесі дроблення відбувається інтенсивне руйнування мінеральних зерен, унаслідок чого утворюється значна кількість дрібнодисперсних частинок, що переходять у відсів [71].

Як правило, до складу відсівів входять частинки розміром менше ніж 5 мм, значна частина яких має пилоподібний характер. Співвідношення таких матеріалів у загальному балансі продукції виробництва щебеню наведено на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Структура утворення відходів при переробці нерудної сировини

Утворення дрібнодисперсних фракцій зумовлене фізико-механічними процесами руйнування гірських порід під час дроблення. Під дією ударних і стискуючих навантажень відбувається розкриття природних тріщин у масиві, а також подальше подрібнення мінеральних зерен до мікророзмірів. Додаткове утворення пилу пов'язане зі стиранням частинок у процесі транспортування та грохочення матеріалу [72].

За даними дослідників, характер дроблення значною мірою визначається мінеральним складом порід, їх структурою та ступенем тріщинуватості. Типовий гранулометричний склад відсівів щебеневого виробництва наведено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4.

Гранулометричний склад відсівів щебеневого виробництва [70, 71]

Фракція, мм	Вміст, %
5–2	25–35
2–1	20–30
1–0.5	15–25
0.5–0.1	10–20
<0.1	5–10

Мінералогічні особливості гірських порід суттєво впливають на характер їх подрібнення та утворення відсівів. Зокрема, дослідження габроїдних порід свідчать, що вміст плагіоклазу та інших мінералів визначає енергоємність процесу руйнування, а також форму зерен, які утворюються після дроблення [73].

Породи з підвищеною міцністю і щільною структурою зазвичай формують більшу кількість дрібних фракцій у разі інтенсивного подрібнення, що зумовлює необхідність оптимізації технологічних параметрів їх переробки. Типовий мінералогічний склад відсівів щебеневого виробництва наведено у табл. 1.5.

Таблиця 1.5.

Мінералогічний склад відсівів магматичних порід [72, 73]

Мінерал	Вміст, %
Кварц	20–35
Польові шпати	40–60
Біотит	5–10
Амфібол	3–8

Вагомий вплив на формування кількісних і якісних показників відсівів має технологічна схема дробильно-сортувального заводу. Тип застосованих дробарок, кількість стадій дроблення, режими грохочення та особливості циркуляції матеріалу визначають гранулометричний склад готової продукції й обсяг утворення дрібних фракцій [74]. Зокрема, використання багатостадійного дроблення із замкненим циклом дає змогу отримати більш однорідний щебінь, однак одночасно сприяє збільшенню кількості пилоподібних відходів.

Крім технологічних чинників, на інтенсивність утворення відсівів впливають енергетичні характеристики процесів подрібнення. Дослідження показують, що дроблення і помел належать до найбільш енергоємних операцій у технології переробки нерудної мінеральної сировини [75]. Енерговитрати на їх здійснення можуть становити значну частку загальних виробничих витрат. У зв'язку з цим підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів, зокрема шляхом утилізації відсівів, розглядається як важливий напрям удосконалення технологічних процесів.

Суттєвим аспектом сучасних гірничих технологій є комплексне використання мінеральної сировини. У багатьох випадках відсіви щебеневого виробництва містять корисні мінеральні компоненти та можуть розглядатися як вторинна мінеральна сировина. Результати досліджень свідчать, що відвали, утворені під час видобування гранітів і габро, можуть бути джерелом матеріалів для будівельної індустрії за умови застосування відповідних технологій їх переробки [76]. Основні напрями використання відсівів щебеневого виробництва узагальнено подано на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Класифікація технологій переробки та використання відсівів щебеню

Одним із найпоширеніших напрямів використання відсівів є їх застосування як дрібного заповнювача у виробництві будівельних матеріалів. У сучасній практиці дрібнодисперсні відходи каменедроблення широко використовують під час виготовлення бетонів, сухих будівельних сумішей, дорожніх покриттів та інших композиційних матеріалів [77]. Зокрема, часткова заміна природного піску відсівами дозволяє зменшити споживання природних ресурсів і знизити собівартість продукції.

Дослідження впливу промислових відходів на властивості будівельних сумішей свідчать, що введення мінеральних добавок може позитивно позначатися на структурі та міцності матеріалів [78]. Це пояснюється здатністю дрібнодисперсних частинок заповнювати поровий простір між більшими зернами заповнювачів, що сприяє ущільненню структури композиту.

Ще одним важливим напрямом утилізації відсівів є їх застосування у дорожньому будівництві. Матеріали, отримані під час переробки гірських порід різних родовищ, використовують для формування основ дорожніх покриттів, приготування асфальтобетонних сумішей та спорудження інших інженерних конструкцій [79]. При цьому дрібні фракції можуть виконувати функції мінерального порошку або одного з компонентів дорожніх сумішей.

Окрему групу становлять технології повторної переробки відходів каменеобробної та гірничої промисловості. За даними міжнародних досліджень, дрібнодисперсні продукти дроблення, зокрема кам'яний пил, кварцові та гранітні відходи, можуть розглядатися як вторинна сировина для виробництва широкого спектра будівельних матеріалів [80]. Їх залучення у виробничі цикли сприяє суттєвому скороченню обсягів техногенних накопичень.

Світовий досвід підтверджує ефективність використання відходів каменеобробної промисловості у виробництві бетонів, штучного каменю, керамічних виробів та інших матеріалів [81]. Високий вміст кремнезему та

алюмосилікатних компонентів у таких відходах забезпечує можливість їх застосування у складі мінеральних композицій.

Особливу увагу дослідники приділяють використанню дрібнодисперсних мінеральних відходів у технології виробництва кераміки. Встановлено, що включення відходів гірничодобувної промисловості до складу керамічних мас може покращувати формувальні властивості сировини та сприяти оптимізації процесів спікання [82]. Крім того, окремі види мінеральних відходів здатні виконувати функцію плавнів, що дає змогу знижувати температуру випалу керамічних виробів.

Наукові дослідження також підтверджують можливість використання дрібнодисперсних відходів у виробництві будівельної кераміки, зокрема цегли та керамічних блоків. Введення таких компонентів у кількості 10–30 % до складу глинистої шихти дозволяє отримувати вироби з необхідними фізико-механічними характеристиками [83]. При цьому відходи виконують роль мінеральних добавок, які впливають на пористість і структуру матеріалу.

Перспективним напрямом є використання відсівів у виробництві великорозмірних керамічних виробів. Завдяки дрібній дисперсності та відповідному мінеральному складу відсіву можуть застосовуватися як компонент керамічних мас під час формування виробів методом жорсткої екструзії [84]. Це сприяє більш раціональному використанню мінеральних ресурсів і зменшенню витрат природної глинистої сировини. Узагальнену технологічну схему такого процесу наведено на рис. 1.8.

Поряд із технологічними аспектами важливу роль відіграє екологічна складова переробки відходів гірничої промисловості. Накопичення відсівів у відвалах може призводити до пилового забруднення атмосферного повітря, трансформації природних ландшафтів і деградації ґрунтового покриву. Використання таких матеріалів у промислових процесах сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля та відповідає принципам циркулярної економіки [80].

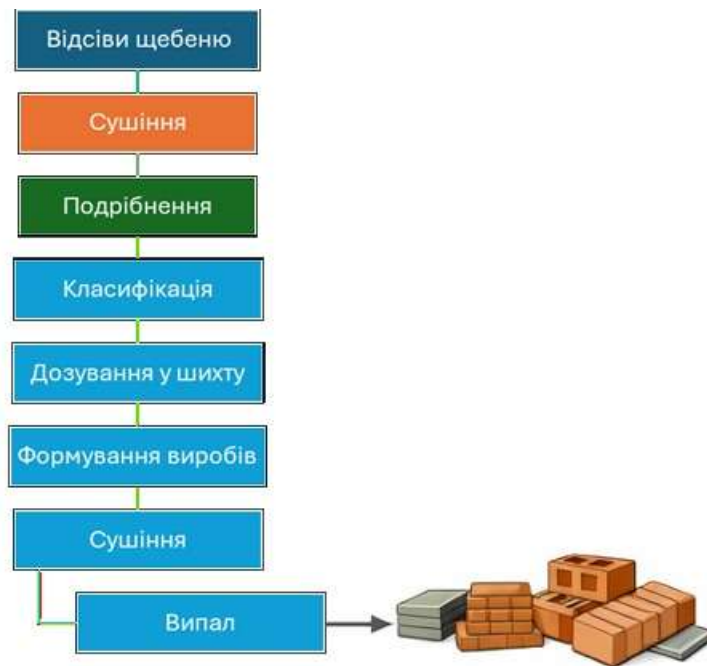


Рис. 1.8. Технологічна схема використання відсівів щебеню у виробництві керамічних матеріалів

Загалом аналіз сучасних технологій переробки відсівів щебеневої сировини свідчить про наявність широких можливостей їх утилізації. Найбільш поширеними напрямками є застосування у виробництві будівельних матеріалів, дорожньому будівництві, бетонних і сухих сумішах. Водночас значний потенціал мають технології використання дрібнодисперсних відходів у виробництві керамічних матеріалів, що відкриває нові перспективи для їх раціонального залучення у господарський обіг.

Ефективність використання відсівів значною мірою визначається їх фізико-механічними властивостями, гранулометричним складом і рівнем попередньої технологічної підготовки [71, 74]. Зокрема, результати досліджень свідчать, що застосування відсівів як вторинної мінеральної сировини сприяє підвищенню комплексності освоєння родовищ нерудних корисних копалин та зменшенню обсягів накопичення відходів у відвалах [76].

Крім того, вибір раціонального напрямку утилізації залежить від вимог до властивостей кінцевої продукції, техніко-економічних показників технологічного процесу та умов експлуатації матеріалів [77, 78]. У зв'язку з цим доцільним є узагальнення існуючих технологій переробки відсівів щебеневого виробництва з урахуванням їх переваг і обмежень.

Основні напрями використання відсівів щебеню та їх порівняльну характеристику наведено у табл. 1.6.

Таблиця 1.6.

Напрями та ефективність використання відсівів щебеневого виробництва

Напрямок використання	Матеріал / технологія	Орієнтовний вміст відсівів, %	Переваги	Недоліки
Виробництво бетонів	дрібний заповнювач	10–50	зменшення витрат природного піску	обмеження за крупністю
Сухі будівельні суміші	мінеральний наповнювач	5–30	покращення структури	потреба сушіння
Дорожні матеріали	мінеральний порошок	5–20	велике споживання	низька додана вартість
Керамічні матеріали	добавка до шихти	10–30	висока утилізація відходів	необхідність помелу
Геополімерні матеріали	активний мінеральний компонент	20–60	високі експлуатаційні властивості	складність технології

Отже, переробка відсівів щебеневого виробництва є важливим напрямом підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів. Подальші наукові дослідження доцільно спрямовувати на розроблення технологій комплексної утилізації дрібнодисперсних відходів, зокрема з їх застосуванням у виробництві керамічних матеріалів.

Реалізація таких підходів дозволить скоротити обсяги накопичення відходів, підвищити економічну ефективність виробничих процесів і зменшити антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище.

1.4. Аналіз фізико-хімічних та мінералогічних особливостей відсівів дроблення як сировини для керамічної промисловості

Відсів дроблення, що утворюються під час виробництва щебеню та переробки природного каменю, являють собою специфічний різновид техногенної мінеральної сировини. Для них характерне поєднання високої дисперсності, відносно стабільного мінерального складу та значної варіативності фізико-хімічних властивостей. На відміну від шлаків мокрого збагачення або змішаних будівельних відходів, такі матеріали формуються переважно внаслідок механічного руйнування щільних гірських порід, тому здебільшого зберігають мінералогічні особливості вихідної сировини [70, 71]. Саме ця властивість визначає перспективність відсівів для використання у силікатних технологіях, зокрема у виробництві будівельної кераміки, де склад шихти, механізми спікання та фазові перетворення безпосередньо залежать від природи мінеральних компонентів [45, 46].

Формування властивостей відсівів тісно пов'язане зі способом руйнування породи у дробильному обладнанні. Встановлено, що параметри технологічної схеми, тип застосованих дробарок, кратність дроблення та інтенсивність грохочення суттєво впливають як на вихід дрібних класів, так і на морфологію частинок [72, 74, 75]. Порівняно з природними пісками зерна відсівів, як правило, мають більш гострокутну форму, шорстку поверхню та підвищену дефектність поверхневого шару. Для керамічної технології це має подвійне значення. З одного боку, наявність мікротріщин і розвиненої поверхні підвищує енергетичну активність частинок, сприяє їх кращій взаємодії з глинистою матрицею та інтенсифікує дифузійні процеси під час випалу. З іншого боку, надлишок

найбільш тонкої фракції може погіршувати пресувальні та реологічні властивості керамічної маси, знижувати її технологічну однорідність і ускладнювати процес сушіння виробів [80, 81].

Однією з ключових характеристик відсівів дроблення є їх гранулометричний склад, який значною мірою визначає формувальні та спікальні властивості керамічних мас. Типову криву розподілу частинок за розмірами наведено на рис. 1.9. Для матеріалів, утворених під час дроблення гранітів, габро, кварцитів та споріднених порід, характерним є широкий інтервал крупності – від зерен близько 5 мм до пилоподібних частинок менше ніж 0,063 мм [71, 72]. Для керамічної промисловості така полідисперсність може мати як позитивні, так і обмежувальні наслідки. Наявність крупніших зерен виконує функцію скелетного або збіднюючого компонента, що сприяє зменшенню усадки під час сушіння та випалу, тоді як тонкодисперсна складова забезпечує формування більш щільних контактів між зернами і бере участь у реакціях спікання [46, 82]. Водночас надлишок ультрадрібних фракцій підвищує водопотребу шихти та може зумовлювати нерівномірний розподіл вологи, що призводить до зростання внутрішніх напружень у сирці. У зв'язку з цим при залученні відсівів до складу керамічних мас важливим є не лише їх загальний вміст, а й попередня класифікація або додатковий помел до керованого гранулометричного складу [84, 85].

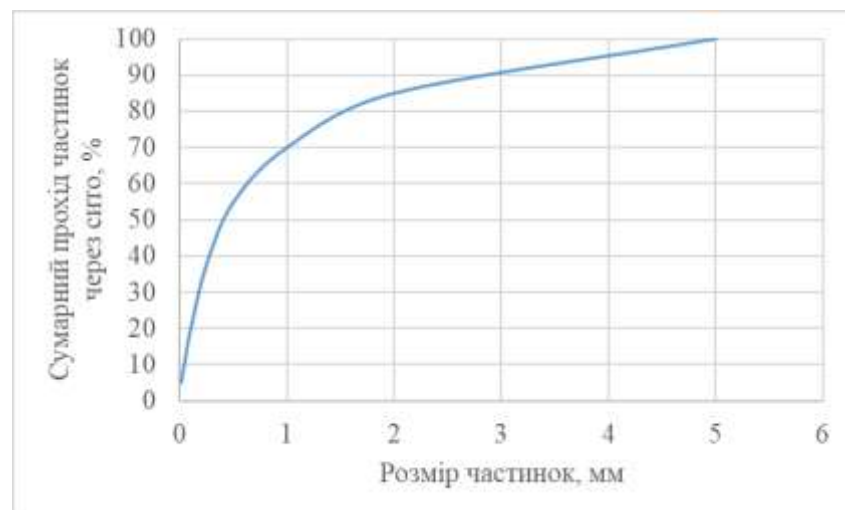


Рис. 1.9. Гранулометрична крива відсівів дроблення [71, 72]

Хімічний склад відсівів дроблення визначається передусім петрографічними особливостями вихідної гірської породи. Для матеріалів магматичного походження характерним є домінування оксидів SiO_2 та Al_2O_3 , а також наявність K_2O , Na_2O , CaO , MgO і Fe_2O_3 у кількостях, що залежать від вмісту польових шпатів, слюд, амфіболів, піроксенів і вторинних продуктів вивітрювання [45, 46, 73]. Така комбінація оксидів має принципове значення для керамічних процесів, оскільки дозволяє розглядати відсів не лише як інертний наповнювач, а й як функціональний компонент шихти. Кремнезем і глинозем формують основу вогнетривкого каркаса матеріалу, лужні оксиди сприяють зниженню температури появи рідкої фази, тоді як оксиди кальцію та магнію впливають на склад новоутворених фаз і характер спікання [46, 81, 86].

Для оцінювання придатності відсівів до використання у керамічному виробництві важливим є співвідношення каркасних і плавневих оксидів (рис. 1.10). У разі підвищеного вмісту польових шпатів такі матеріали можуть частково замінювати природні плавневі компоненти керамічних мас. Якщо ж у складі відсівів переважає кварц, вони виконують переважно функцію отощувача та стабілізатора форми виробів [87, 88]. Саме тому відсів з схожим гранулометричним складом, але з різних родовищ можуть характеризуватися суттєво відмінною технологічною поведінкою. Зокрема, для гранітних і аляскітових відходів наявність польовошпатової складової часто є перевагою, оскільки вона сприяє інтенсифікації процесів спікання та дозволяє знижувати температуру випалу [89, 90]. Натомість у матеріалах із надлишковою кварцовою складовою необхідне більш ретельне регулювання режимів нагрівання й охолодження через підвищену ймовірність виникнення термічних напружень.

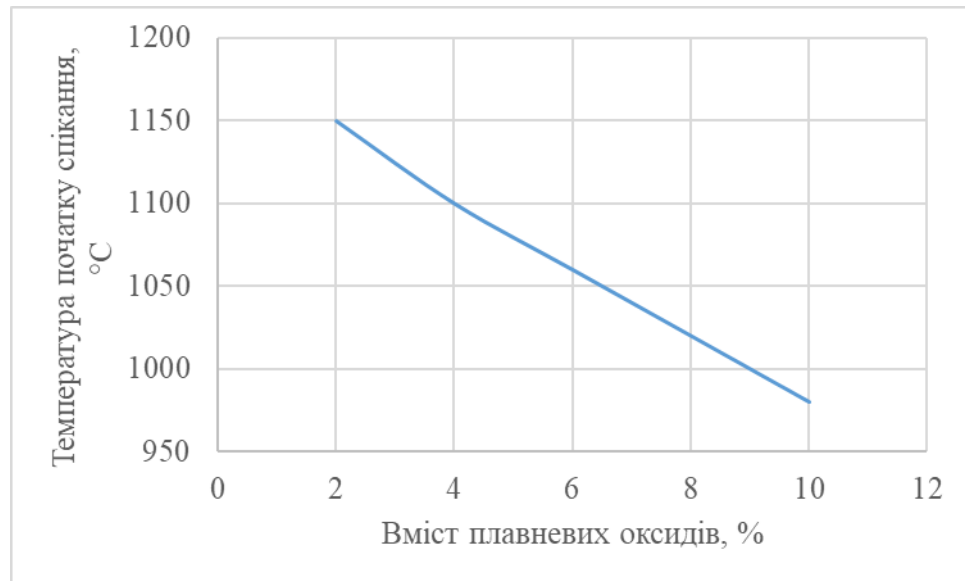


Рис. 1.10. Вплив вмісту плавневих оксидів на температуру спікання кераміки [89, 90]

Як видно з рис. 1.10, зі збільшенням вмісту плавневих оксидів температура початку спікання керамічної маси знижується, що пов'язано з інтенсифікацією процесів утворення рідкої фази.

Мінералогічний склад відсівів має не менше значення, ніж їх валовий хімічний склад. За результатами рентгенофазового аналізу та петрографічних досліджень, у відсівах дроблення гранітів і споріднених порід найчастіше виявляють кварц, мікроклін, ортоклаз, альбіт, анортотлаз, мусковіт, біотит, а також у різних співвідношеннях амфіболи й інші феромагнетизальні мінерали [73, 85, 87]. Для керамічного виробництва така мінералогія загалом є сприятливою. Польові шпати плавляться раніше за кварц і глинисті компоненти та сприяють формуванню рідкої фази, яка цементує тверді зерна під час випалу. Кварц, навпаки, виконує функцію жорсткого каркасного компонента і суттєво впливає на термічне розширення керамічної маси [88, 89]. Слюди та вторинні мінерали можуть змінювати пластичність шихти і характер фазових перетворень, тоді як наявність залізовмісних мінералів позначається на кольорі випаленого черепка.

З позицій керамічної технології важливим є не лише перелік мінералів, а й ступінь їх вивітрювання, розкриття та взаємного зрощення. У відсівах, що утворилися внаслідок інтенсивного дроблення щільних порід, частина польовошпатових зерен перебуває у мікротріщинуватому стані, що полегшує їх участь у фазових перетвореннях під час випалу [72, 73]. Ця особливість частково пояснює, чому низка досліджень фіксує позитивний ефект навіть за помірних дозувань гранітних або кварц-польовошпатових відходів у масах для виробництва цегли, плитки чи керамограніту [87–90]. Водночас домішки вторинних гідросилікатів, глинистих мінералів або карбонатів можуть істотно змінювати технологічну поведінку матеріалу: підвищувати пластичність сирцю, спричиняти газовиділення під час випалу або впливати на процеси пороутворення. Саме тому детальна мінералогічна характеристика відсівів є необхідною передумовою їх технологічної апробації [29, 30, 35].

Окремої уваги потребує термічна поведінка відсівів дроблення. Під час нагрівання в керамічній масі послідовно відбуваються видалення фізично зв'язаної вологи, дегідроксилування глинистих компонентів, поліморфні перетворення кварцу, розм'якшення та часткове плавлення польовошпатової складової, а також утворення нових високотемпературних фаз (табл. 1.7) [12, 86]. Для відсівів магматичних порід найбільш суттєвими є дві обставини. Перша – можливість раннього утворення рідкої фази завдяки наявності польових шпатів і лужних оксидів, що інтенсифікує процеси спікання. Друга – присутність кварцу, який за надлишкового вмісту або великих розмірів зерен може стати джерелом мікротріщин унаслідок α – β -перетворення та відмінностей у коефіцієнтах термічного розширення [87; 92].

У новіших дослідженнях, присвячених нагріванню гранітних відходів, показано, що їх фазовий склад і мікроструктура істотно змінюються вже у температурному інтервалі, характерному для виробництва традиційної будівельної кераміки. Це підтверджує доцільність розгляду таких матеріалів не

як пасивного заповнювача, а як активного мінерального компонента керамічної шихти [92].

Таблиця 1.7.

Стадії термічних перетворень при випалі кераміки

Температура, °C	Основний процес
20–200	Видалення фізично зв'язаної води
≈573	Поліморфний перехід кварцу
700–900	Дегідратація глинистих компонентів
≈900	Початок утворення рідкої фази
1000–1050	Інтенсивне спікання
1100–1150	Ущільнення структури

У разі використання відсівів у виробництві червоної кераміки та стінових виробів найбільш цінною є їх функція отощувача і регулятора усадки. Глиниста сировина з підвищеною пластичністю та значною сушильною усадкою зазвичай потребує введення непластичних компонентів для стабілізації форми сирцю. Відсів дроблення, особливо кварц-польовошпатового складу, можуть ефективно виконувати цю роль, водночас покращуючи процеси спікання завдяки плавневій дії польових шпатів [83, 88, 91]. Дослідження, у яких застосовували гранітний порошок і шлами природного каменю, показують, що за оптимального вмісту добавки зменшується усадка, підвищується міцність на стиск і знижується водопоглинання випалених виробів [45, 90, 91]. Водночас перевищення раціональної межі введення, як правило, призводить до погіршення формувальних властивостей маси та зниження цілісності структури через недостатню кількість глинистої зв'язуючої фази.

Для плиткових і щільноспечених керамічних матеріалів роль відсівів дещо змінюється. У цьому випадку вирішальне значення має їх плавнева активність і здатність забезпечувати формування щільного черепка з низьким водопоглинанням. Найбільший інтерес становлять відсівы або шлами гранітів, кварцитів, аляскітів та інших польовошпатовмісних порід, які можуть частково замінювати традиційні кварцові й польовошпатові компоненти шихти [89, 90]. У

роботах, присвячених виробництву плитки та керамограніту, показано, що правильно підібрані кам'яні відходи сприяють формуванню щільної мікроструктури, інтенсифікують процеси вітрифікації та в окремих випадках дозволяють знижувати температуру випалу або скорочувати тривалість ізотермічної витримки [87, 89, 90]. Для умов України це має особливе значення, оскільки відкриває можливості часткової компенсації дефіциту окремих видів природної керамічної сировини за рахунок техногенних ресурсів каменевидобування та щебеневого виробництва [24, 46].

Суттєвим чинником придатності відсівів є вміст забарвлюючих оксидів, передусім заліза і титану. Для традиційної будівельної цегли їх наявність не завжди є критичною, а іноді навіть бажаною, оскільки сприяє формуванню характерного кольору черепка. Для світлочерепкової або облицювальної кераміки, навпаки, підвищений вміст Fe_2O_3 може виступати обмежувальним фактором [46, 86]. Отже, доцільність використання конкретних відсівів необхідно оцінювати з урахуванням типу кінцевої продукції. Один і той самий матеріал може бути ефективною плавнево-отошувальною добавкою до цегельної маси, але водночас непридатним для виготовлення світлої облицювальної плитки. Саме диференційований підхід дає змогу перейти від загального твердження про можливість утилізації до практичного технологічного проєктування [45, 46, 81].

Для обґрунтування використання відсівів у керамічному виробництві важливими є також методи їх аналітичного дослідження. Окрім стандартного визначення гранулометричного складу та хімічного аналізу, дедалі ширше застосовуються рентгенофазовий і термічний аналіз, електронна мікроскопія та методи автоматизованої мінералогії [29, 30, 35]. Поєднання цих підходів дозволяє встановити форму перебування оксидів, визначити мінерали, активні у процесі випалу, оцінити рівномірність розподілу плавневих компонентів і виявити потенційно небажані домішки. Для відсівів щільних магматичних порід така інформація є особливо важливою, оскільки валовий хімічний склад не завжди

відображає їх реальну реакційну здатність. Матеріали з близьким вмістом SiO_2 та Al_2O_3 можуть демонструвати різну спікальну активність через відмінності у співвідношенні кварцу і польового шпату, ступені кристалічності та дисперсності зерен [85, 92].

Необхідно враховувати і те, що відсів дроблення рідко є абсолютно однорідною сировиною. На їх властивості впливають коливання мінерального складу в межах родовища, зміна зон видобування, ступінь вивітрювання порід, а також режими роботи дробильного обладнання [71, 73]. Це означає, що для промислового використання у керамічному виробництві потрібне не лише лабораторне підтвердження принципової придатності, а й налагоджена система вхідного контролю якості. Такий контроль має охоплювати оцінювання гранулометричного складу, вологості, вмісту пилоподібної фракції, оксидного складу та, за потреби, фазовий аналіз. Лише за стабільності цих показників відсів можуть розглядатися як повноцінний компонент шихти, а не випадкова домішка [72, 74, 75].

Узагальнюючи наведене, слід зазначити, що фізико-хімічні та мінералогічні особливості відсівів дроблення роблять їх перспективною сировиною для керамічної промисловості за умови цілеспрямованого технологічного добору. До їхніх переваг належать високий вміст алюмосилікатних компонентів, наявність польовошпатової складової, здатність виконувати функції отошувача, каркасного та частково плавневого компонента, а також доступність у регіонах із розвинутим щебеневим виробництвом [45, 46, 70]. Серед основних обмежень слід відзначити варіабельність складу, надлишок пилоподібної фракції, можливу наявність небажаних забарвлюючих оксидів і необхідність коригування режимів випалу відповідно до властивостей конкретного виду відходів [81, 86, 92].

Разом із тим результати сучасних досліджень переконливо свідчать, що за науково обґрунтованого підходу відсів дроблення можуть розглядатися не як побічний продукт щебеневого виробництва, а як цінний техногенний ресурс для виготовлення стінової, плиткової та щільноспеченої кераміки [83, 87–91].

Висновки до розділу 1

1. У результаті аналізу сучасних наукових підходів і технологічних рішень встановлено, що у світовій практиці управління техногенними відходами гірничодобувної промисловості поступово трансформується від традиційних способів утилізації до концепції ревалоризації. Такий підхід передбачає розгляд відходів як потенційного джерела вторинної мінеральної сировини та відповідає загальним тенденціям розвитку циркулярної економіки. Його реалізація сприяє не лише зменшенню антропогенного навантаження на довкілля, а й підвищенню ефективності використання природних ресурсів.

2. Проведене узагальнення показало, що відвали відходів природного каменю можуть розглядатися як своєрідні техногенні родовища зі значним ресурсним потенціалом. Їх залучення до господарського використання можливе за різними напрямками, зокрема у виробництві будівельних і керамічних матеріалів, створенні композиційних систем та здійсненні заходів із рекультивації порушених територій. Комплексне використання таких матеріалів має не лише екологічне, а й соціально-економічне значення, оскільки сприяє розвитку регіональної інфраструктури та формуванню нових сфер виробничої діяльності.

3. Аналіз технологій переробки відсівів щебеневої сировини засвідчив, що дрібнодисперсні продукти дроблення становлять істотну частку загального обсягу переробленої гірничої маси. У зв'язку з цим їх раціональне використання є важливим резервом підвищення комплексності освоєння родовищ нерудних корисних копалин. Найбільш поширеними напрямками застосування відсівів є їх використання як компонентів бетонних і сухих будівельних сумішей, матеріалів для дорожнього будівництва, а також як активних мінеральних добавок у геополімерних і керамічних технологіях.

4. Встановлено, що технологічна ефективність використання відсівів значною мірою визначається їх гранулометричним складом, мінералогічними характеристиками та фізико-механічними властивостями. Ці параметри залежать як від петрографічних особливостей вихідних гірських порід, так і від режимів дробильно-сортувальних процесів. Тому вибір раціонального напрямку ревалоризації має ґрунтуватися на комплексній оцінці властивостей техногенної сировини та умов її промислового застосування.

5. Особливу увагу приділено можливості використання відсівів дроблення магматичних порід у керамічній промисловості. Показано, що завдяки високому вмісту алюмосилікатних компонентів і наявності польовошпатової складової такі матеріали можуть виконувати функції отощувальних, каркасних і частково плавневих компонентів керамічних мас. Це створює передумови для оптимізації процесів спікання, зниження температури випалу та покращення фізико-механічних характеристик готових виробів.

6. Разом із тим використання техногенних мінеральних матеріалів потребує врахування їх природної варіабельності, можливого надлишку пилоподібних фракцій і вмісту забарвлюючих оксидів, які можуть впливати на технологічні параметри виробництва та якість кінцевої продукції. У зв'язку з цим важливим є проведення попередньої технологічної підготовки відсівів, їх класифікації та систематичного контролю складу.

7. Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують доцільність комплексної ревалоризації відходів каменевидобувної промисловості як одного з перспективних напрямів підвищення ресурсоефективності виробництва та зменшення негативного впливу гірничої діяльності на довкілля. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення оптимізованих складів керамічних мас із використанням відсівів дроблення та вдосконалення технологічних режимів їх промислового застосування.

РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВІДВАЛІВ ВИДОБУТКУ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ЯК РЕСУРСУ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ

2.1. Методологічні основи та результати комплексної оцінки відвалів видобутку природного каменю

Обґрунтування технології комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів потребує попереднього розв'язання фундаментального науково-прикладного завдання, пов'язаного з переосмисленням ролі відвалів видобутку природного каменю. Йдеться про їх ідентифікацію не як пасивних техногенних накопичень, а як повноцінного ресурсу для будівельної індустрії. Така постановка питання є принципово важливою для переходу від традиційної логіки поводження з відходами до ресурсно орієнтованої моделі, у межах якої відвали розглядаються як вторинна мінеральна сировина з визначеними кількісними, якісними та технологічними характеристиками. У цьому контексті ключового значення набуває не лише загальний аналіз можливостей ревалоризації, розглянутий у попередньому розділі, а й формування методичного інструментарію, здатного забезпечити достовірну оцінку ресурсного потенціалу відвалів для їх подальшого залучення до виробництва будівельних матеріалів [76, 93–97].

Сутність комплексної оцінки відвалів полягає у врахуванні кількох взаємопов'язаних груп параметрів: просторово-геометричних, гранулометричних, фізико-механічних, санітарно-гігієнічних і техніко-економічних. Такий підхід є необхідним, оскільки значний обсяг техногенного накопичення сам по собі не гарантує його придатності до промислового освоєння. Для прийняття обґрунтованих технологічних рішень необхідно встановити не лише об'єм відвалу, а й фракційну структуру матеріалу, ступінь його однорідності, міцнісні характеристики порід, умови безпечного використання у будівництві та потенційні переваги порівняно з первинною

сировиною. З цією метою у дослідженні застосовано методологію, що поєднує дистанційні методи інвентаризації, фотограмметричну реконструкцію геометрії об'єкта, цифрову оптичну гранулометрію та інтерпретацію фізико-механічних показників порід з позицій їх подальшої технологічної переробки [76, 98–102].

На відміну від традиційних польових підходів, які здебільшого базуються на локальних вимірюваннях, маршрутних обстеженнях і вибіркового ситовому аналізі, у роботі реалізовано концепцію формування цифрового просторово визначеного опису техногенного об'єкта. Це дозволяє суттєво підвищити точність оцінювання, охопити всю поверхню відвалу, зменшити суб'єктивність результатів і створити інформаційну основу для подальшого проєктування технологічних схем переробки. В умовах кар'єрів зі складним рельєфом, значною площею та різною висотною будовою саме дистанційні методи дають можливість перейти від фрагментарних оцінок до суцільної кількісної характеристики ресурсу [76, 98, 99].

Методологія дослідження передбачала три основні етапи: збір первинних даних, фотограмметричну обробку знімків та аналітичне визначення об'ємних і гранулометричних показників. На першому етапі виконувалися низьковисотні польоти безпілотного літального апарата над поверхнею відвалів на висоті 4–8 м. Аерозйомка проводилася з високим поздовжнім і поперечним перекриттям кадрів, що забезпечило формування зображень з надвисокою просторовою роздільною здатністю – меншою за 2 мм. Такий рівень деталізації дозволяє ідентифікувати не лише великі уламки, а й дрібні фракції, що є принципово важливим при оцінюванні технологічної придатності відвальної маси до подальшого дроблення, сортування та використання у складі будівельних матеріалів [76, 98, 99].

На другому етапі здійснювалася фотограмметрична обробка зібраного масиву зображень за алгоритмами Structure-from-Motion. У результаті було сформовано два основні цифрові продукти – високоточну цифрову модель рельєфу відвалу та безшовний ортофотоплан його поверхні. Цифрова модель

рельєфу використовувалася для визначення морфології техногенного накопичення і розрахунку його об'єму, тоді як ортофотоплан став основою для просторово деталізованого аналізу гранулометричного складу. Перевага такого підходу полягає у створенні цифрового «двійника» ресурсу, який може застосовуватися для моніторингу змін, уточнення запасів, планування вибіркової розробки та управління потоками вторинної мінеральної сировини. Для технології комплексної переробки відсівів це має особливе значення, оскільки дозволяє перейти від реактивного використання сформованих відвалів до керованої роботи з просторово локалізованими зонами, що відрізняються за крупністю матеріалу та очікуваними параметрами подальшого подрібнення [76, 98, 99].

На третьому етапі цифрову модель рельєфу використовували для визначення об'єму накопиченого матеріалу, а ортофотоплан – для проведення цифрової оптичної гранулометрії. Для цього на поверхню відвалу накладалася регулярна віртуальна сітка, у межах якої програмне забезпечення напіваавтоматично ідентифікувало окремі уламки, вимірювало їх головні осі та розподіляло матеріал за класами крупності. Такий підхід забезпечує визначення гранулометричного складу не за окремими точками відбору проб, а за статистично значущою кількістю елементів на всій доступній поверхні відвалу. Це дозволяє не лише сформувати узагальнену картину розподілу частинок, а й виявити ділянки підвищеної гомогенності або структурної неоднорідності. Для щебеневого виробництва і подальшого утворення відсівів дроблення такі результати мають безпосереднє технологічне значення, оскільки гранулометричний склад техногенної сировини істотно впливає на енергоємність дроблення, конфігурацію дробильно-сортувальних ліній і вихід кінцевих фракцій [71, 74–76, 98–102].

Важливим елементом запропонованої методології є застосування цифрової оптичної гранулометрії із використанням програмного середовища ImageJ, що дозволяє перейти від локального визначення крупності уламків до просторово

деталізованої оцінки фракційної структури техногенного накопичення. Аналіз здійснювався на основі ортофотопланів, сформованих за результатами фотограмметричної обробки аерознімків. Для забезпечення статистичної репрезентативності на поверхню відвалу накладалася регулярна сітка з розміром комірок 1×1 м, у межах яких проводилося виділення та вимірювання окремих уламків.

Подальша обробка зображень виконувалася у напівавтоматичному режимі. Перед морфометричним аналізом здійснювали калібрування масштабу, корекцію контрасту, переведення зображення у формат 8-bit та порогову сегментацію. У дослідженні застосовувався пороговий інтервал 135–255, за якого частка виділеної площі становила 42,64 %. Після сегментації програмне забезпечення автоматично формувало набір морфометричних параметрів для кожного об'єкта, зокрема площу проєкції уламка, довжину великої та малої осей, середню яскравість пікселів, периметр і відносну частку площі в межах аналізованої ділянки. На прикладі одного з фрагментів ортофотоплану було ідентифіковано 953 уламки при загальній площі досліджуваної зони $148,79 \times 107,73$ м та роздільній здатності зображення 982×711 пікселів.

Отримані морфометричні характеристики використовувалися для класифікації частинок за інтервалами крупності, зокрема 0,1–0,25 м, 0,25–0,5 м, 0,5–0,75 м і понад 0,75 м. Узагальнення результатів для всіх комірок сітки дозволило побудувати криві гранулометричного розподілу для всієї поверхні відвалів і встановити характерні особливості фракційної структури досліджуваних об'єктів.

Застосування цифрової гранулометрії має низку методичних переваг порівняно з традиційними польовими підходами, зокрема забезпечує охоплення всієї доступної площі відвалу, зменшує суб'єктивність під час визначення крупності уламків, дозволяє виконувати статистичне узагальнення великої кількості вимірювань і створює цифрову базу даних для подальшого технологічного моделювання. Водночас точність методу залежить від якості

аерозйомки, умов освітлення, ступеня перекривання уламків і правильності вибору параметрів сегментації. Тому результати цифрового аналізу додатково верифікувалися шляхом їх порівняння з даними традиційних польових досліджень гранулометричного складу.

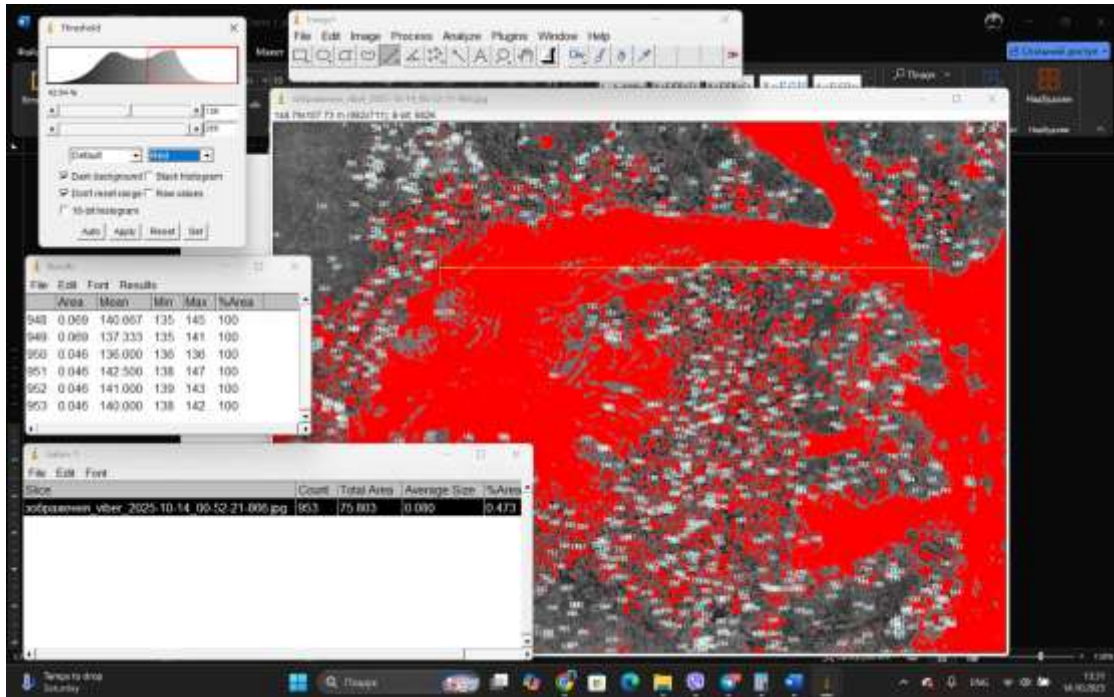


Рис. 2.1. Застосування програмного продукту ImageJ для визначення гранулометричного складу відвалу гірських порід

Об'єктами комплексної оцінки були Іллінецький кар'єр (частина Корецького родовища граніту), Шадурське родовище габро та Губенківське родовище. Їх вибір є методично обґрунтованим, оскільки ці об'єкти репрезентують типові для України умови видобутку блокового каменю, за яких основною метою гірничих робіт є отримання високоякісної облицювальної продукції. У таких умовах значні обсяги некондиційної породи, скельних розкривних матеріалів і втрат блокового каменю переміщуються у відвали.

З огляду на це досліджувані техногенні накопичення доцільно розглядати не як випадкові скупчення відходів, а як результат тривалого технологічного процесу, що вже включає стадії видобування, транспортування та часткового

первинного розкриття породи. Такий підхід дозволяє трактувати відвальну масу як специфічний вид вторинної мінеральної сировини з певними технологічними перевагами порівняно з первинним масивом. Зокрема, техногенний матеріал не потребує повторного виконання найбільш капіталомістких операцій – розкривних робіт, буріння та вибухового відокремлення гірської породи [76, 93–97].

Для Іллінецького кар'єру встановлено, що відвали сформовані переважно гранітною породою, яка утворюється під час блокового видобутку облицювального каменю. Характерною особливістю цього об'єкта є накопичення значних обсягів некондиційної сировини за відносно стабільного фракційного розподілу уламків. Побудована цифрова модель відвалів Іллінецького кар'єру (рис. 2.2) засвідчує чітко виражену морфологію техногенного накопичення та його придатність до високоточного фотограмметричного опису, що створює передумови для достовірного визначення ресурсного потенціалу відвальної маси.



Рис. 2.2. Тривимірна фотограмметрична модель відвалів Іллінецького кар'єру (частина Корецького родовища граніту)

Шадурське родовище габро є одним із найбільш показових об'єктів з позицій ресурсного змісту техногенних відвалів. За даними, наведеними у дослідженнях, середній промисловий вихід товарних блоків тут становить лише 18,3 %, тобто понад 80 % видобутої гірничої маси переміщується у відвали [76]. Така ситуація суттєво змінює підхід до інтерпретації подібних техногенних накопичень: за своїм обсягом відвал у цьому випадку є не другорядним результатом виробничої діяльності, а фактично основною масою видобутої породи, яка внаслідок прийнятої технологічної схеми не була використана для отримання блокової продукції.

З огляду на це відвали Шадурського родовища (рис. 2.3) доцільно розглядати як повноцінне техногенне родовище габро з високим ресурсним потенціалом для подальшої переробки. Наявність значних обсягів однорідної магматичної породи створює передумови для її ефективного використання у виробництві щебеню та інших видів будівельної продукції, що відповідає сучасним підходам до комплексного освоєння мінеральних ресурсів.



Рис. 2.3. Тривимірна фотограмметрична модель відвалу Шадурського родовища габро

Губенківське родовище (рис. 2.4) у межах дослідження охарактеризовано менш детально через обмеженість доступної технічної інформації. Водночас навіть наявні матеріали дали змогу включити цей об'єкт до порівняльного аналізу. Такий підхід має важливе методичне значення, оскільки підтверджує можливість застосування запропонованої методики не лише до добре вивчених кар'єрів, а й до об'єктів із неповною інформаційною базою.

Застосування дистанційних методів інвентаризації та цифрового аналізу дозволяє виконувати первинну кількісну й якісну оцінку техногенних накопичень навіть за обмежених вихідних даних, із можливістю подальшого уточнення результатів у разі надходження додаткової інформації. Це розширює сферу практичного використання запропонованого підходу та підвищує його універсальність у задачах оцінювання ресурсного потенціалу відвалів.



Рис. 2.4. Тривимірна фотограмметрична модель відвалу Губенківського родовища

Отримані результати свідчать, що обсяги досліджуваних відвалів мають промислово значущий характер. Зокрема, для Іллінецького кар'єру обсяг відвальної маси становить $119\,235,532\text{ м}^3$, для Губенківського родовища – $131\,544,33\text{ м}^3$, тоді як для Шадурського родовища розрахунковий обсяг

накопиченої сировини перевищує 955 900 м³ [76]. Уже самі ці показники підтверджують, що йдеться не про локальні техногенні накопичення, придатні лише до часткової утилізації, а про вагомий резерв вторинної мінеральної сировини для будівельної галузі. Важливо також, що залучення такої сировини не потребує повторного вилучення матеріалу з надр, а отже, потенційно дозволяє зменшити навантаження на первинні родовища, скоротити обсяг гірничопідготовчих робіт і підвищити комплексність використання мінеральних ресурсів [76, 93–97].

Не менш суттєвим результатом є встановлення гранулометричних особливостей досліджуваних відвалів. Для Іллінецького родовища характерний відносно рівномірний розподіл фракцій із домінуванням класів 0,5–0,75 м (23 %), 0,25–0,5 м (20 %) та 0,1–0,25 м (19 %). Така структура є технологічно сприятливою, оскільки свідчить про відсутність різко виражених піків крупності й дає змогу прогнозувати стабільну роботу дробильно-сортувального обладнання. Для Шадурського родовища встановлено іншу закономірність – чітке домінування фракції 0,5–0,75 м, частка якої становить близько 40 % загального обсягу. Губенківське родовище також характеризується переважанням крупних уламків: частка фракції 0,5–0,75 м становить 35 %, а класу 0,1–0,25 м – 19 % [76]. У технологічному аспекті ці відмінності є визначальними, оскільки безпосередньо впливають на вибір типу дробарок, кількість стадій дроблення, режими грохочення та прогнозований вихід відсівів дроблення, що становить предмет подальших досліджень у межах дисертаційної роботи [71, 74–76].

Особливої уваги заслуговує висока гомогенність матеріалу Шадурського родовища (табл. 2.1). Це є не лише статистичною характеристикою гранулометричного складу, а й важливим технологічним чинником. За умов переважання однієї крупної фракції зменшується потреба у проєктуванні складних багатостадійних схем переробки, характерних для дуже неоднорідної сировини. Натомість з'являється можливість застосування більш простої та цілеспрямованої технологічної схеми дроблення, що забезпечує зниження

капітальних витрат на обладнання, скорочення енерговитрат на одиницю продукції, спрощення технічного обслуговування та підвищення стабільності якісних показників готових матеріалів. У контексті теми дисертаційного дослідження це має особливе значення, оскільки однорідність вихідної техногенної сировини безпосередньо впливає на характер утворення відсівів дроблення та можливості їх подальшої цільової переробки [74–76].

Таблиця 2.1.

Зведена характеристика відвалів за даними оцінки на основі БПЛА

Назва родовища	Тип породи	Загальний обсяг (м³)	Домінуючі фракції (м) та їх частка (%)	Ключова гранулометрична особливість
Іллінецьке (Корецьке)	Граніт	119 235,53	0,5 – 0,75 (23%), 0,3 – 0,5 (20%)	Рівномірний розподіл
Шадурське	Габро	>955 900,00	0,5 – 0,75 (40%)	Висока гомогенність
Губенківське	Граніт	131 544,33	0,5 – 0,75 (35%), 0,1 – 0,3 (19%)	Переважаання великих фракцій

Для перевірки ефективності запропонованої дистанційної методики у роботі проведено порівняльний аналіз гранулометричного складу відвальної маси, визначеного за допомогою зйомки з безпілотного літального апарата та традиційних польових методів. Отримані результати (рис. 2.5) засвідчили, що загальні тенденції розподілу частинок для всіх трьох досліджуваних об'єктів є подібними, а максимальні фракційні піки фіксуються обома способами.

Найвищу збіжність показано для Губенківського родовища (рис. 2.5, в), де криві гранулометричного розподілу практично співпадають. Для Іллінецького родовища (рис. 2.5, а) кореляція результатів також є задовільною, хоча спостерігаються окремі розбіжності у визначенні пікових значень. Найбільш помітна різниця встановлена для Шадурського родовища (рис. 2.5, б), де

дистанційний підхід зафіксував дещо вищий вміст домінуючої фракції порівняно з результатами польових досліджень [76].

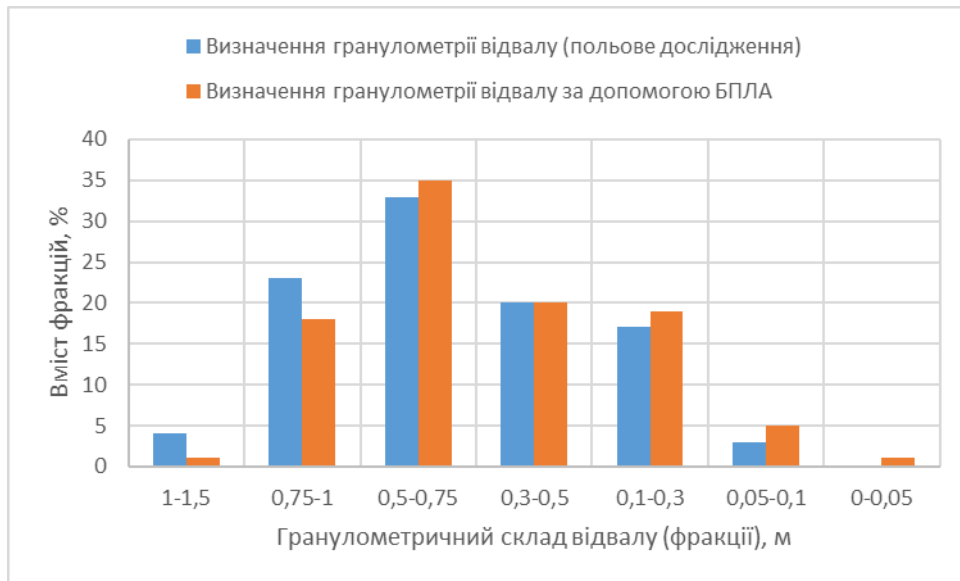
Такі відмінності свідчать не про обмеженість застосованої методики, а радше про необхідність подальшого вдосконалення алгоритмів обробки та інтерпретації зображень, особливо в умовах щільного контакту уламків і складної тіньової структури поверхні відвалів. Водночас можливість отримання близьких за характером розподілу результатів підтверджує, що цифрова гранулометрія на основі БПЛА є перспективним інструментом оперативної та об'єктивної оцінки техногенних накопичень [76, 98–102].



а



б



в

Рис. 2.5. Гранулометричний склад відвалів: а – Іллінецького родовища; б – Шадурського родовища; в – Губенківського родовища.

Поряд із кількісними характеристиками важливе значення для комплексної оцінки відвалів мають фізико-механічні властивості порід. За наведеними у дослідженнях даними, міцність на стиск габро Шадурського родовища становить 244,7 МПа, тоді як для граніту Корецького родовища цей показник досягає 1981 кгс/см² [76]. Такі значення істотно перевищують нормативні вимоги до високоміцного щебеню та підтверджують, що відвальна маса за механічними характеристиками не поступається, а інколи навіть перевершує типову первинну сировину, яка використовується у виробництві відповідальних будівельних матеріалів. Це створює об'єктивні передумови для застосування продуктів переробки відвалів у бетонних сумішах підвищеної міцності, дорожніх і аеродромних покриттях та інших конструкціях із підвищеними вимогами до навантажувальної здатності й зносостійкості [43, 44, 76].

Важливим аргументом на користь практичного використання відвальної сировини є також показники довговічності порід. Низьке водопоглинання гранітів, що перебуває в межах 0,16–0,42 %, а також висока морозостійкість на

рівні марки F-50 свідчать про здатність матеріалу забезпечувати стабільну експлуатацію в умовах циклічного заморожування та відтавання [76]. Для України, де будівельні матеріали часто працюють у складних кліматичних умовах, ці характеристики мають принципове значення. З позицій подальшої переробки відсівів дроблення це також важливо, оскільки мінеральна природа і довговічність вихідної породи істотно впливають на експлуатаційні властивості дрібнодисперсних продуктів, які можуть використовуватися як заповнювачі, мінеральні порошки або компоненти композиційних матеріалів [46, 48, 76].

Окремої уваги заслуговують радіаційно-гігієнічні та хімічні характеристики досліджуваної техногенної сировини. Згідно з отриманими даними, породи віднесено до I класу радіоактивності, а сумарна активність становить 139–159 Бк/кг, що суттєво нижче граничного нормативного значення 370 Бк/кг [76]. Це свідчить про можливість використання продуктів переробки таких відвалів без обмежень у всіх видах будівництва, включаючи житлове. Водночас низький вміст SO_3 у габро ($<0,1\%$) зменшує ризик розвитку сульфатної корозії бетонів і розширює сферу застосування отриманих матеріалів. Таким чином, комплексна оцінка підтверджує не лише ресурсну, а й експлуатаційну та екологічну придатність відвальної сировини до подальшого освоєння [76].

З економічної точки зору важливою перевагою переробки відвалів є те, що значна частина найбільш витратних гірничих операцій уже виконана на попередніх етапах освоєння родовищ. Йдеться про розкривні роботи, вилучення породи з масиву, її транспортування та формування техногенних накопичень. У багатьох випадках це робить переробку відвалів більш економічно привабливою порівняно з освоєнням нових ділянок первинної сировини [76]. Особливо виразно така ситуація проявляється на Шадурському родовищі, де переважна частина гірничої маси вже переміщена у відвали. За таких умов техногенний об'єкт фактично виступає напівпідготовленим джерелом мінеральної сировини, а основні витрати зміщуються з видобувної стадії на стадію переробки та доведення продукції до вимог ринку. Для тематики дисертаційного дослідження

це має принципове значення, оскільки дозволяє розглядати утворення дрібних фракцій відсівів як прогнозований і керований результат переробки великотоннажної техногенної сировини [70, 71, 74–76].

Водночас результати дослідження вказують на певні обмеження, які необхідно враховувати при практичному залученні відвалів у виробничий обіг. Серед них – відсутність чітко сформованої нормативної бази щодо використання вторинної мінеральної сировини техногенного походження, можливі коливання гранулометричних і фізико-механічних характеристик матеріалу в межах відвалу, а також логістичні чинники, пов'язані з умовами зберігання, зволоження та вибіркової подачі сировини на переробку. Однак ці обставини не знижують загальної перспективності техногенних ресурсів, а визначають напрями подальшої технологічної деталізації – зокрема у сфері сортування, дроблення, класифікації та цільового використання відсівів [76, 98–102].

Отже, проведена комплексна оцінка відвалів, сформованих під час видобутку природного каменю, дозволила встановити низку важливих закономірностей. Насамперед підтверджено, що відвали граніту та габро на розглянутих родовищах становлять значний за обсягом техногенний ресурс, придатний для ефективного промислового використання. Застосування сучасних інструментів дослідження – зокрема безпілотних літальних апаратів, фотограмметричних методів і цифрової гранулометрії – забезпечує достатню точність і надійність як кількісної, так і якісної оцінки такого ресурсу.

Отримані результати гранулометричних і фізико-механічних досліджень свідчать про придатність досліджуваних порід до подальшої переробки у щебенову продукцію та супутні дрібні фракції. Визначені техніко-економічні переваги освоєння відвалів створюють реальні передумови для розроблення ефективних технологій комплексної переробки відсівів дроблення на щебенових кар'єрах. Таким чином, результати цього підрозділу можна розглядати як методичну та фактичну основу для наступних етапів дослідження, пов'язаних із

вибором раціональних технологічних рішень переробки відсівів і формуванням вимог до кінцевих будівельних матеріалів [76, 93–102].

2.2. Фізико-технологічні властивості відсівів дроблення як сировини для виготовлення керамічних і композиційних матеріалів

Для обґрунтування технології комплексної переробки відсівів дроблення щебеневих кар'єрів важливим етапом є встановлення їх фізико-технологічних властивостей як вторинної мінеральної сировини. Саме сукупність гранулометричних, фізичних, хімічних і мінералогічних характеристик визначає можливі напрями промислового використання таких матеріалів, а також дозволяє оцінити, чи придатні вони для безпосереднього застосування у традиційних будівельних технологіях, чи потребують попереднього збагачення або ж повинні розглядатися як спеціалізована сировина для виробництва керамічних і композиційних матеріалів [80–92, 104–115].

У межах дослідження оцінювання якості відсівів здійснювалося за результатами лабораторного аналізу усереднених проб, відібраних із породних відвалів трьох каменевидобувних підприємств, що спеціалізуються на переробці гранітів (Підприємство 1 – ТОВ «Омелянівський гранітний кар'єр», Підприємство 2 – ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр», Підприємство 3 – ТОВ «Лезниківський кар'єр»). Відбір проводився методом конвертування з різних горизонтів відвалу, що забезпечило репрезентативність зразків та дозволило врахувати неоднорідність матеріалу, сформовану як умовами дроблення, так і процесами сегрегації під час складування [103–106]. Такий підхід дає можливість оцінити не лише поточні параметри продукції, а реальний якісний стан відсівів як сформованого техногенного накопичення, придатного для подальшого ресурсного освоєння.

Першочерговим показником при оцінці відсівів є їх гранулометричний склад, оскільки саме він безпосередньо визначає потенційні сфери застосування

матеріалу. Результати ситового аналізу (рис. 2.6) показали, що зерновий склад досліджених відсівів є неоднорідним і суттєво відрізняється між підприємствами. Так, вміст крупної фракції 2–5 мм змінюється від 23,6 % на Підприємстві 2, до 33,6 % на Підприємстві 1; подібна варіативність простежується і для фракції 1–2 мм. Водночас визначальною особливістю всіх досліджених матеріалів є стабільно високий вміст дрібної фракції 0–0,63 мм, який перевищує 29 % і досягає 32,1 % за масою.

Така структура гранулометричного складу свідчить про значну частку пилоподібного компонента у відвальній масі. Ймовірною причиною цього є зміна режимів роботи дробильно-сортувального обладнання в різні періоди експлуатації підприємств, а також природні процеси сегрегації відсівів під час їх тривалого накопичення у відвалах [103–110].

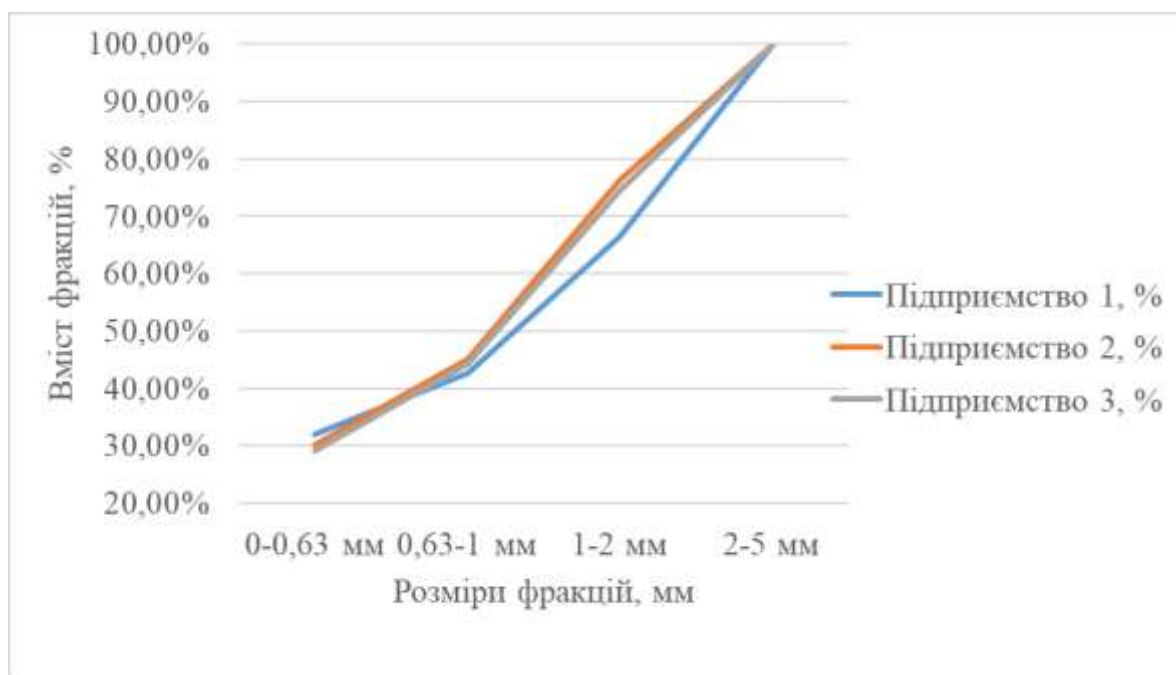


Рис. 2.6. Кумулятивні криві гранулометричного складу відсівів з відвалів (Підприємство 1–3)

З одного боку, надлишковий вміст найдрібнішої фракції є суттєвим обмежувальним чинником для традиційного використання відсівів у будівництві.

Відомо, що підвищена кількість пилоподібних і глинистих часток у складі дрібного заповнювача призводить до зростання водопотреби бетонної суміші, зниження її рухливості, підвищення схильності до розшарування, а також негативно впливає на міцність і морозостійкість готового матеріалу [104, 109, 110, 113]. Саме тому відсів з високим вмістом тонкодисперсної складової у вихідному стані не відповідають вимогам стандартів, що регламентують використання матеріалів у бетонних і асфальтобетонних технологіях.

З іншого боку, для технологічних процесів, у яких вирішальне значення має велика питома поверхня частинок і активна участь дрібнодисперсної фази у формуванні структури матеріалу, цей самий показник може розглядатися як перевага. Така подвійність є принципово важливою для коректної оцінки якості відсівів: вони не є «неякісною» сировиною в абсолютному розумінні, а характеризуються обмеженою придатністю для одних технологій і водночас значним потенціалом для інших.

Фізичні характеристики досліджених відсівів додатково підтверджують їх перспективність для використання у силікатно-керамічному напрямі (табл. 2.2). Вміст пилоподібних і глинистих часток у пробах становить 32,1 % на Підприємстві 1, 30,2 % на Підприємстві 2 та 29,2 % на Підприємстві 3, що суттєво перевищує допустимі значення для дрібного заповнювача бетонів. Водночас насипна густина матеріалу перебуває у межах 1390–1550 кг/м³, а істинна густина – 2610–2660 кг/м³. Такі показники відповідають мінеральній природі гранітної сировини та свідчать про щільну алюмосилікатну основу досліджуваних відсівів [103, 107, 108].

Для керамічної технології це є позитивною ознакою, оскільки наявність щільного мінерального каркаса і стабільність фазового складу сприяють формуванню достатньо міцного керамічного черепка після випалу.

Таблиця 2.2.

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	-

Ключове значення для оцінки відсівів як сировини для виготовлення керамічних матеріалів має їх хімічний склад. За результатами рентгенофлуоресцентного аналізу встановлено (табл. 2.3), що досліджувані відсівы характеризуються високим вмістом кремнезему SiO_2 – 70,8 % та оксиду алюмінію Al_2O_3 – 14,9 %. Сукупна частка цих компонентів перевищує 85 % маси матеріалу, що дозволяє розглядати його як якісну алюмосилікатну сировину.

Вміст інших оксидів становить: Fe_2O_3 – 2,1 %, CaO – 1,6 %, MgO – 0,9 %, K_2O – 4,2 %, Na_2O – 3,8 %, втрати при прожарюванні – 1,7 % [103]. Подібне співвідношення оксидних компонентів є технологічно сприятливим для керамічного виробництва. Високий вміст SiO_2 та Al_2O_3 формує основу силікатної й алюмосилікатної матриці майбутнього черепка, тоді як наявність лужних оксидів K_2O і Na_2O , пов'язаних із польовошпатовою складовою, сприяє інтенсифікації процесів рідкофазного спікання під час випалу [45, 46, 49, 85–92].

Таким чином, за хімічним складом досліджені відсівы можуть розглядатися не лише як інертний заповнювач, а як функціонально активний компонент керамічної шихти, здатний впливати на фазоутворення, температуру спікання та формування мікроструктури готових виробів.

Таблиця 2.3.

Усереднений хімічний склад відсівів граніту, %

Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Втрати при прожарюванні
Вміст, %	70,8	14,9	2,1	1,6	0,9	4,2	3,8	1,7

Окремої уваги потребує мінералогічний склад досліджуваного матеріалу. За результатами рентгенофазового аналізу встановлено, що основними мінеральними фазами відсівів є кварц, польові шпати – мікроклін і плагіоклаз – та слюди, передусім біотит. Відсутність аморфних або підвищено реакційноздатних форм кремнезему свідчить про мінералогічну стабільність матеріалу й водночас підтверджує його типовий гранітний генезис [103, 107, 108].

Для керамічних технологій така мінеральна асоціація є загалом сприятливою. Кварц виконує функцію жорсткого каркасного компонента, польові шпати виступають природними плавнями, а біотит та інші темноколірні мінерали можуть впливати на забарвлення виробів, особливості термічної поведінки та формування мікроструктури керамічного черепка [45, 46, 87–92]. Саме поєднання цих фаз дає підстави розглядати відсів не лише як інертну домішку, а як функціонально активний компонент керамічної маси.

Узагальнення отриманих результатів (табл. 2.4) показує, що досліджувані відсів не є універсально придатними для будь-якого напрямку використання. У традиційних будівельних технологіях, де матеріал застосовується як дрібний заповнювач, головним обмежувальним чинником виступає підвищений вміст пилоподібної фракції. Саме цей показник унеможливорює безпосереднє використання відсівів у бетонних сумішах без попереднього збагачення, зокрема промивки. Подібна ситуація спостерігається й у технології асфальтобетонів, де надлишок тонкодисперсних частинок призводить до підвищеної бітумоємності та нестабільності складу сумішей. У дорожніх основах підвищений вміст

фракцій менш як 0,63 мм може спричиняти зростання вологочутливості матеріалу та ризик морозного здирання [42, 79, 104, 109, 110].

Таблиця 2.4.

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	2	3	4	5
1. Цементний бетон (Дрібний заповнювач)	ДСТУ Б В.2.7-30:2013	$\leq 3\%$ (для критичних конструкцій) / $\leq 5\%$ (для загальних)	$\approx 30\%$	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	$\leq 5\%$ (залежно від типу суміші)	$\approx 30\%$	Непридатний у вихідному стані. Обмежуючий параметр: Неконтрольована кількість пилу, що підвищує бітумоємність та погіршує якість покриття.
3. Основи дорожнього одягу (ЩПС)	ДСТУ Б EN 13242:2013	Залежить від марки, але вміст <0,63 мм суворо контролюється для запобігання пучинності	$\approx 30\%$	Низька придатність / Ризикований. Обмежуючий параметр: Висока чутливість до вологи та ризик морозного здирання. Потребує стабілізації або збагачення.

Продовження табл. 2.4.

4. Геополімер ні композиції (Активний прекурсор)	(Міжнародні/науков і 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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.
5. Виробництв о мінеральног о порошку	ДСТУ 8772:2018	≥70% фракції <0, 071 мм	≈30% фракції <0,63 мм	Потребує додаткового додроблення/пом елу. Обмежуючий параметр: Ступінь подрібнення. Наявний матеріал є лише проміжним продуктом.

Водночас у геополімерних композиціях і, частково, у керамічних технологіях ця ж властивість набуває іншого функціонального значення. Значна частка тонкодисперсної складової збільшує реакційну поверхню матеріалу, сприяє інтенсифікації процесів розчинення, спікання або структуроутворення, тоді як алюмосилікатний склад забезпечує необхідну хімічну основу для формування міцної штучної структури [48, 85, 86, 91, 114, 115].

Для наряду виготовлення керамічних матеріалів принципово важливо розглядати відсіви гранітної сировини не як повністю готову керамічну масу, а як функціональний компонент шихти. У зв'язку з переважанням кварц-польовошпатової складової та відносно низькою природною пластичністю такий матеріал малоімовірно може бути ефективним як самостійна сировина для формування сирцю. Водночас він є перспективним як отошувальна,

алюмосилікатна або частково флюсуюча добавка до пластичних глин чи інших компонентів керамічних мас [45, 46, 83–92].

У такій ролі відсівів здатні забезпечувати низку технологічно важливих ефектів. По-перше, наявність значної частки тонкодисперсної фракції сприяє більш щільному пакуванню частинок у сирцевій масі. По-друге, польовошпатована складова та лужні оксиди інтенсифікують формування рідкої фази під час випалу, що покращує процеси спікання. По-третє, висока алюмосилікатна насиченість матеріалу створює передумови для формування достатньо міцного керамічного черепка після термічної обробки. Саме тому з позицій керамічної технології досліджувані відсівів доцільно розглядати не лише як відхід виробництва, а як спеціалізований вторинний алюмосилікатний компонент шихти.

Важливо підкреслити, що використання відсівів у керамічному виробництві може забезпечити не лише технічний, а й ресурсно-економічний ефект. Залучення таких матеріалів до складу керамічних мас дозволяє зменшити споживання природної глинистої сировини, частково замінити природні алюмосилікатні компоненти та скоротити площі, зайняті техногенними відвалами [24, 45, 46, 53, 61–65, 80–92]. У контексті циркулярної економіки це означає перехід від пасивного складування техногенного матеріалу до його функціональної ревалоризації у виробництві продукції з доданою вартістю. При цьому фізичні особливості відсівів, які обмежують їх пряме застосування у бетонних технологіях, не слід розглядати як універсальний недолік – їх необхідно оцінювати з урахуванням вимог конкретного технологічного процесу.

Отже, проведені дослідження дають підстави стверджувати, що відсівів дроблення, накопичені у породних відвалах гранітних підприємств, є цінною вторинною алюмосилікатною сировиною з вираженим потенціалом використання у силікатно-керамічних і композиційних технологіях. Їх основний обмежувальний параметр – підвищений вміст дрібнодисперсної фракції 0–0,63 мм на рівні 29,2–32,1 % – у традиційних бетонних і дорожніх технологіях

виступає негативним чинником, однак у виробництві керамічних і геополімерних матеріалів може розглядатися як технологічна перевага.

Високий вміст SiO_2 та Al_2O_3 , наявність кварцу, польових шпатів і біотиту, мінералогічна стабільність і достатня щільність матеріалу підтверджують доцільність його використання у складі шихт для виготовлення керамічних і композиційних виробів. Саме ці властивості формують наукове підґрунтя для подальшого обґрунтування складів керамічних мас, режимів формування та випалу, що становить наступний етап розроблення технології комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів [45, 46, 48, 83–92, 103–115].

2.3. Методика експериментального дослідження отримання керамічних матеріалів із використанням техногенного шламу

Експериментальні дослідження були спрямовані на встановлення технологічних закономірностей формування та термічної обробки керамічних матеріалів на основі природної алюмосилікатної сировини із залученням техногенних продуктів дроблення гірських порід. Актуальність таких досліджень зумовлена сучасними тенденціями ресурсоефективного розвитку будівельної індустрії, що передбачають розширення використання вторинних мінеральних матеріалів у виробництві будівельних виробів і зменшення обсягів накопичення гірничопромислових відходів [46, 49, 85].

Як мінеральний наповнювач у роботі використовували відсів дроблення щебеневої продукції, отримані на підприємстві ТОВ «Омелянівський гранітний кар'єр». Сировинна база підприємства пов'язана з масивами гранітів Українського щита, які характеризуються підвищеним вмістом кварцу, калієвих і натрієвих польових шпатів, а також темноколірних силікатних мінералів. У процесі механічного подрібнення гірничої маси утворюється значна кількість дрібнодисперсного матеріалу, що накопичується у вигляді відсівів і може розглядатися як перспективна вторинна алюмосилікатна сировина [45, 90].

Мінералогічний і хімічний склад таких матеріалів сприяє розвитку процесів рідкофазного спікання під час випалу, що забезпечує ущільнення структури та підвищення механічної міцності керамічних виробів [87, 91].

Пластичним компонентом формувальної маси слугував тонкомелений каолін вогнетривкого типу промислового виробництва з температурою вогнетривкості понад 1580 °С. Каолін є продуктом глибокого хімічного вивітрювання польовошпатових гірських порід і характеризується високим вмістом каолініту – шаруватого алюмосилікатного мінералу з кристалічною структурою типу 1:1 [45]. Особливості будови каолініту забезпечують поєднання достатньої пластичності при зволоженні з відносно низькою усадкою під час сушіння, що є важливою технологічною перевагою у процесі формування керамічних виробів [46, 87].

У мінералогічному складі промислового каоліну, крім каолініту, можуть бути присутні кварц, польові шпати та слюди, які впливають на спікливість і колір випаленого черепка [90, 92]. Високий вміст Al_2O_3 і SiO_2 забезпечує формування термостійкої силікатної матриці під час випалу. У температурному інтервалі приблизно 450–650 °С відбувається дегідроксилювання каолініту з утворенням метакаолініту – реакційно активної аморфної фази, що бере участь у подальших фазових перетвореннях. За подальшого підвищення температури розвиваються процеси перекристалізації з утворенням муліту та склоподібної силікатної фази, які визначають щільність, міцність і термічну стійкість керамічних матеріалів [46, 90].

Таким чином, використання тонкомеленого вогнетривкого каоліну як пластичного структуроутворюючого компонента у поєднанні з техногенними алюмосилікатними відсівами гранітного щебеню створює технологічні передумови для отримання керамічних виробів із підвищеною щільністю структури, механічною міцністю та термічною стабільністю (рис. 2.7).



а



б

Рис. 2.7. Сировинні матеріали для виготовлення керамічних зразків: а – каолінова глина; б – відсіви дроблення гранітного щебеню

Перед початком експериментальних досліджень усі компоненти формувальної маси піддавали попередній технологічній підготовці. Відсіви щебеню та каолін висушували до постійної маси при температурі 105 ± 2 °C з метою видалення фізично зв'язаної вологи (рис. 2.8). Такий режим сушіння забезпечує стабілізацію масових показників сировини та дозволяє виключити вплив залишкової вологості на результати подальших досліджень.

Контроль вологості є важливою умовою отримання однорідної формувальної маси, оскільки нерівномірний розподіл води у шихті може спричиняти дефекти сушіння, утворення тріщин та виникнення внутрішніх напружень у сирцевих виробках [87]. Крім того, попереднє висушування матеріалів забезпечує відтворюваність експериментальних умов і підвищує точність дозування компонентів під час приготування сумішей.



Рис. 2.8. Лабораторна сушильна шафа TermoLab, використана для підготовки сировинних матеріалів

Після висушування мінеральні компоненти піддавали подрібненню та просіванню через контрольне сито з розміром чарунок 0,63 мм (рис. 2.9). Формування оптимального зернового складу порошкової системи дозволяє підвищити щільність пакування частинок і зменшити початкову пористість напівфабрикату, що позитивно впливає на процеси ущільнення під час пресування та подальшого спікання [46, 92].

Гранулометричний склад мінеральних компонентів є одним із визначальних чинників формування структури керамічних матеріалів. Його вибір обумовлюється вимогами до експлуатаційних властивостей виробів, а також особливостями технологічних процесів формування, сушіння та випалу. Залежно від дисперсності частинок керамічні маси умовно поділяють на грубозернисті та тонкозернисті системи, що характеризуються різним характером структуроутворення під час термічної обробки.

Грубозернисті маси містять значну кількість фракцій розміром понад 0,63–1,2 мм і формують у структурі сирцю мінеральний каркас, який у процесі випалу зазнає відносно незначних фізико-хімічних змін. Такі системи, як правило, характеризуються меншою вогневою усадкою та підвищеною відкритою

пористістю випалених виробів. Введення грубозернистих компонентів до складу глинистих мас дозволяє регулювати їх пластичність, зменшувати внутрішні напруження під час сушіння та стабілізувати геометричні параметри виробів.

Натомість тонкозернисті та високодисперсні маси складаються переважно з частинок розміром менше 0,1 мм і характеризуються підвищеною питомою поверхнею та реакційною здатністю. У таких системах під час випалу інтенсивно розвиваються процеси твердофазної взаємодії та рідкофазного спікання, що сприяє формуванню щільної склоподібно-кристалічної структури матеріалу. Це супроводжується значними об'ємними змінами, але водночас забезпечує підвищення механічної міцності, морозостійкості та довговічності керамічних виробів.

Раціональний вибір зернового складу ґрунтується на принципі максимальної щільності пакування порошкових систем. Підвищення щільності сирцю досягається шляхом поєднання фракцій різних розмірів, коли дрібні частинки заповнюють порожнини між більшими зернами. Такий підхід дозволяє зменшити початкову пористість формувальної маси та інтенсифікувати процеси ущільнення під час пресування і спікання. Водночас надмірне подрібнення компонентів може ускладнювати формування оптимального гранулометричного складу та призводити до підвищеної усадки матеріалу.

Таким чином, керування дисперсністю мінеральної сировини виступає важливим технологічним інструментом регулювання структури й властивостей керамічних матеріалів, що дає можливість цілеспрямовано впливати на їх пористість, щільність і експлуатаційні характеристики.



Рис. 2.9. Підготовка мінеральної сировини шляхом просіювання

Дослідні формувальні суміші готували шляхом змішування каоліну та відсівів дроблення у різних масових співвідношеннях. Варіювання складу шихти дозволяло оцінити вплив техногенної мінеральної добавки на пластичність формувальної маси, величину усадки, пористість і механічну міцність випалених керамічних виробів [49, 91].

Змішування компонентів (рис. 2.10) здійснювали до отримання однорідної порошкової суміші, що забезпечувало рівномірний розподіл дисперсних мінеральних частинок у формувальній масі. Після цього до суміші вводили технологічну воду в кількості близько 10 % від маси сухих компонентів. Такий рівень зволоження сприяє активації пластичних властивостей каолінової складової, полегшує процес формування напівфабрикату та забезпечує формування більш щільної структури сирцю під час пресування [45].

Оптимальний вміст води також відіграє важливу роль у забезпеченні однорідності маси, зменшенні ризику утворення внутрішніх дефектів і підвищенні стабільності технологічного процесу.



Рис. 2.10. Просіяні компоненти формувальної маси: а – відсів гранітного щебеню; б – каолін

Після завершення операції пресування сформовані напівфабрикати піддавали стадії сушіння, яка є необхідним етапом підготовки виробів до подальшої термічної обробки. Сушіння забезпечує поступове видалення фізично зв'язаної води з порового простору сирцю та стабілізацію його структури перед випалом.

Процес сушіння проводили у лабораторній сушильній шафі при температурі 105 ± 5 °C до досягнення сталої маси зразків. Такий температурний режим дозволяє інтенсифікувати видалення води без істотного ризику виникнення внутрішніх напружень або деформацій виробів. Поступове зниження вологості сприяє формуванню більш міцної контактної структури між частинками мінеральної сировини та забезпечує підвищення механічної стійкості сирцю під час подальших технологічних операцій.

Слід зазначити, що швидкість сушіння значною мірою залежить від гранулометричного складу формувальної маси, початкової вологості та щільності напівфабрикату. У тонкодисперсних системах, які містять значну кількість дрібних

частинок, процес видалення вологи може супроводжуватися нерівномірним перерозподілом внутрішніх напружень. Це, у свою чергу, здатне спричиняти появу тріщин або викривлення виробів. Саме тому контроль режиму сушіння є важливою умовою отримання якісних керамічних матеріалів із заданими геометричними та фізико-механічними характеристиками.

Після завершення сушіння зразки піддавали стадії випалу, яка забезпечує формування остаточної мікроструктури матеріалу та визначає його експлуатаційні властивості. Термічну обробку здійснювали у лабораторній електричній печі за заданим температурним режимом із контрольованою швидкістю нагрівання та витримкою при максимальній температурі.



Рис. 2.11. Процес напівсухого пресування ручним пресом UTEST (макс. зусилля 10 т)

Після завершення термічної обробки випалені зразки піддавали комплексному дослідженню фізико-механічних властивостей з метою оцінки впливу температури

випалу та складу формувальної маси на якість отриманих керамічних матеріалів. Визначення експлуатаційних характеристик проводили після повного охолодження виробів до температури навколишнього середовища та їх стабілізації у лабораторних умовах.

Одним із основних показників, що характеризують ступінь ущільнення структури матеріалу, є величина загальної усадки після випалу. Її визначали шляхом вимірювання лінійних розмірів зразків до та після термічної обробки. Зменшення геометричних параметрів відображає інтенсивність процесів спікання, перекристалізації та формування склоподібної фази у структурі кераміки.

Водопоглинання та відкрита пористість випалених зразків визначали методом насичення водою з подальшим зважуванням у сухому та насиченому стані. Ці показники є важливими характеристиками мікроструктури матеріалу, оскільки безпосередньо пов'язані з його морозостійкістю, довговічністю та здатністю працювати в умовах змінної вологості.

Механічну міцність дослідних зразків оцінювали за результатами випробувань на стиск. Значення міцності відображають ступінь розвитку спікальних процесів і формування міцних міжзернових контактів у керамічному черепку. Підвищення температури випалу, як правило, сприяє інтенсифікації рідкофазного спікання та зростанню щільності структури, що проявляється у збільшенні механічної міцності матеріалу.

Отримані результати фізико-механічних випробувань дозволили встановити взаємозв'язок між складом формувальної маси, температурним режимом випалу та експлуатаційними характеристиками керамічних виробів, що є необхідною передумовою для подальшого обґрунтування оптимальних технологічних параметрів їх виготовлення.



а



б

Рис. 2.12. Розміщення зразків у муфельній печі: а – вигляд муфельної печі TermoLab CHO-1; б – вигляд зразків після нагрівання до 950 °С

Таким чином, розроблена методика експериментальних досліджень забезпечує можливість комплексної оцінки впливу складу формувальної маси, умов ущільнення та температурних режимів термічної обробки на процеси структуроутворення і формування фізико-механічних властивостей керамічних матеріалів на основі каоліну та техногенних продуктів дроблення гранітних порід.

Застосування запропонованого підходу дозволяє встановити технологічні закономірності спікання алюмосилікатних систем, визначити раціональні параметри підготовки сировини, формування та випалу виробів, а також оцінити можливість цільового використання відсівів як функціонального компонента керамічних мас.

Отримані результати створюють науково-практичне підґрунтя для розроблення ресурсозберігаючих технологій утилізації техногенних мінеральних матеріалів у виробництві будівельної кераміки та композиційних виробів, що відповідає сучасним вимогам підвищення ефективності використання мінеральних

ресурсів і зменшення негативного впливу гірничодобувної діяльності на довкілля [46, 85, 91].

Висновки до розділу 2

1. У результаті комплексної оцінки техногенних відвалів гранітних і габрових кар'єрів встановлено, що накопичені відвальні маси мають значний ресурсний потенціал та можуть розглядатися як перспективне джерело вторинної мінеральної сировини для виробництва будівельних матеріалів. Визначено, що обсяги досліджених відвалів становлять від 119 до 956 тис. м³, що свідчить про можливість їх залучення до промислової переробки та часткового заміщення природної сировини.

2. Підтверджено ефективність використання сучасних дистанційних методів дослідження, зокрема безпілотних літальних апаратів, фотограмметрії та цифрової оптичної гранулометрії, для інвентаризації техногенних відвалів. Використання зазначених методів забезпечує оперативне отримання достовірної інформації щодо геометричних параметрів відвалів, особливостей їх просторової будови та гранулометричного складу матеріалу.

3. Встановлено, що гранулометричний склад досліджених відвалів характеризується суттєвими відмінностями залежно від типу порід та умов формування відвальних мас. Для Іллінецького родовища характерний відносно рівномірний розподіл фракцій, для Шадурського – висока однорідність матеріалу з переважанням крупних частинок, а для Губенківського – домінування великих фракцій. Виявлені особливості визначають потенційні напрями подальшої переробки та використання техногенної сировини.

4. За результатами фізико-механічних досліджень встановлено, що породи техногенних відвалів характеризуються високими показниками міцності, низьким водопоглинанням, достатньою морозостійкістю та відповідають вимогам радіаційної безпеки. Сукупність цих характеристик підтверджує

можливість їх використання як мінеральної сировини для виготовлення широкого спектра будівельних матеріалів.

5. Дослідження фізичних властивостей відсівів дроблення показало наявність значної кількості дрібнодисперсної складової. Встановлено, що вміст частинок розміром менше 0,63 мм становить близько 29–32 %, що обмежує можливість прямого використання відсівів як дрібного заповнювача в окремих будівельних матеріалах без додаткової підготовки або коригування складу сумішей.

6. Визначено, що відсів дроблення характеризується істинною густиною близько 2650 кг/м³, насипною густиною 1410 кг/м³ та низьким водопоглинанням на рівні близько 1,5 %, що свідчить про стабільність їх фізичних властивостей та перспективність використання як вторинної мінеральної сировини.

7. За результатами хімічного та мінералогічного аналізу встановлено, що відсів дроблення містить близько 71 % SiO₂ та близько 15 % Al₂O₃, а їх основними мінералами є кварц, польові шпати та біотит. Такий склад свідчить про високий алюмосилікатний потенціал досліджуваного матеріалу та можливість його використання у технологіях виробництва керамічних, композиційних і геополімерних матеріалів.

8. Встановлено, що підвищений вміст тонкодисперсної фракції, який у традиційних технологіях часто розглядається як обмежувальний фактор, може бути використаний як технологічна перевага при виробництві матеріалів, де важливе значення мають процеси ущільнення структури, активації спікання та формування щільного мікроструктурного каркаса.

9. Узагальнення результатів досліджень дозволило встановити, що відсів дроблення магматичних порід є перспективною вторинною алюмосилікатною сировиною, придатною для використання у виробництві будівельної кераміки, геополімерних композицій, мінеральних наповнювачів та інших будівельних матеріалів із підвищеною доданою вартістю.

10. Отримані результати створюють науково-практичне підґрунтя для подальших досліджень щодо використання відсівів дроблення у складі керамічних композицій та обґрунтування технологічних параметрів їх комплексної переробки, що є предметом наступного етапу досліджень.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДСІВІВ ДРОБЛЕННЯ У КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Дослідження гранулометричних та фізико-хімічних властивостей відсівів дроблення

У сучасних умовах розвитку гірничодобувної та будівельної галузей дедалі більшої актуальності набуває питання раціонального використання техногенних мінеральних відходів. Значні обсяги дрібнодисперсних продуктів дроблення магматичних гірських порід, які утворюються під час виробництва щебеню та обробки природного каменю, накопичуються у відвалах і створюють додаткове техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Разом із тим за своїми мінералогічними особливостями, фізичними характеристиками та хімічним складом відсів дроблення можуть розглядатися як перспективна вторинна мінеральна сировина, придатна для використання у технологіях виготовлення будівельних матеріалів. Одним із найбільш доцільних напрямів їх залучення є застосування у виробництві керамічних виробів як функціональної мінеральної добавки.

Ефективність такого використання визначається сукупністю властивостей матеріалу, серед яких найбільше значення мають:

- гранулометричний склад;
- фізико-механічні характеристики;
- хімічний і мінералогічний склад;
- особливості взаємодії з глинистою сировиною у процесах формування та випалу.

У зв'язку з цим у роботі виконано комплекс лабораторних досліджень, спрямованих на встановлення технологічної придатності відсівів дроблення для їх використання у складі керамічних мас.

Методика відбору проб та підготовка матеріалів

Вихідним матеріалом для досліджень слугували відсівы дроблення гранітоїдних порід, відібрані з породних відвалів каменевидобувних підприємств.

Відбір проб здійснювався методом конвертування з різних горизонтів відвалу з метою формування усереднених зразків. Такий підхід дозволяє врахувати неоднорідність техногенного матеріалу та забезпечити репрезентативність лабораторних досліджень.

Підготовка матеріалу включала:

- сушіння до постійної маси при температурі 105 ± 5 °C;
- подрібнення агломератів;
- просіювання через стандартний набір сит.

Схема відбору та підготовки проб наведена на рис. 3.1.

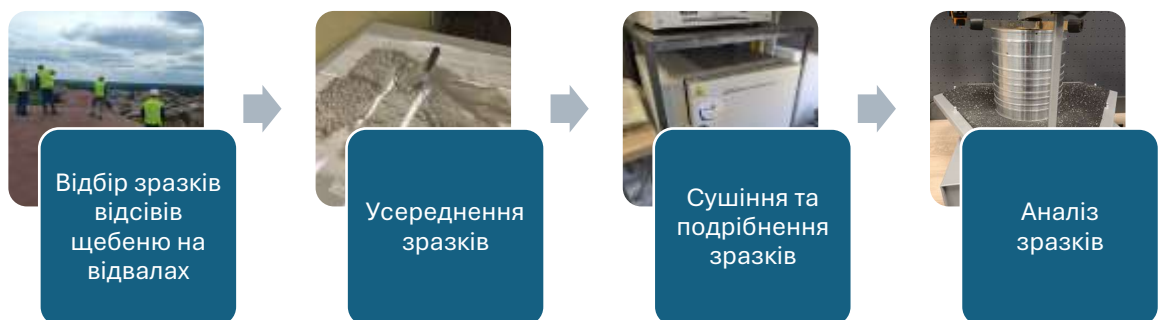


Рис. 3.1. Схема відбору та підготовки проб відсівів дроблення

Дослідження гранулометричного складу

Гранулометричний склад визначали методом ситового аналізу відповідно до чинних стандартів. Результати досліджень подано у вигляді кумулятивних кривих розподілу частинок (рис. 3.2).

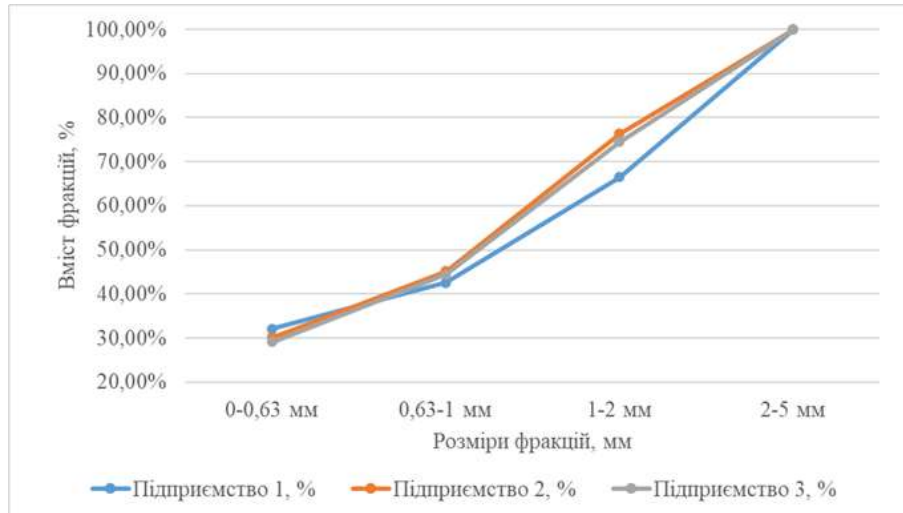


Рис. 3.2. Кумулятивні криві гранулометричного складу відсівів

Встановлено, що досліджувані відсівы характеризуються значним вмістом дрібнодисперсної фракції. Частка частинок розміром менше 0,63 мм становить у середньому 29–32 % за масою.

Для узагальнення результатів ситового аналізу сформовано таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Гранулометричний склад відсівів дроблення

Фракція, мм	Вміст, %
>5	0-1
2,5–5	24-34
0,63–2,5	37-44
<0,63	29–32

Отримані результати свідчать, що підвищений вміст пилюватих частинок обмежує використання відсівів як дрібного заповнювача бетонів, проте створює передумови для їх ефективного застосування у керамічних технологіях. Значна

питома поверхня частинок сприяє інтенсифікації процесів рідкофазного спікання та формуванню щільної структури матеріалу.

Фізичні властивості відсівів дроблення

Фізичні характеристики матеріалу визначали за такими показниками:

- насипна густина;
- істинна густина;
- вологість;
- водопоглинання.

Результати досліджень наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Фізичні властивості відсівів дроблення

Показник	Значення
Насипна густина, кг/м ³	1410
Істинна густина, кг/м ³	2650
Вологість, %	5,4
Водопоглинання, %	1,5

Встановлено, що за значеннями густини відсіву є близькими до традиційної глинистої сировини, що забезпечує їх технологічну сумісність при формуванні керамічних мас.

Дослідження хімічного складу

Хімічний склад визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу. Результати наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Хімічний склад відсівів дроблення

Оксид	Вміст, %
SiO ₂	65,8
Al ₂ O ₃	15,5
Fe ₂ O ₃	4,5
CaO	3,6
MgO	1,7
K ₂ O	4,4
Na ₂ O	3,5

Аналіз показав підвищений вміст оксидів-плавнів (K_2O , Na_2O , CaO , MgO), які знижують температуру утворення рідкої фази та сприяють формуванню склоподібної структури керамічного матеріалу.

Можливий механізм впливу відсівів на процес спікання показано на рис. 3.3.

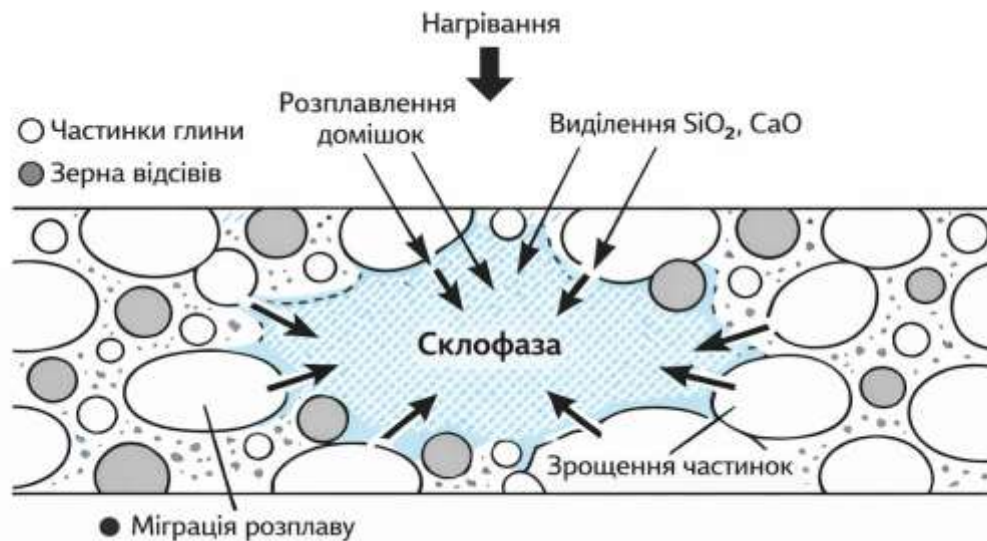


Рис. 3.3. Схема формування склофази у керамічній масі з додаванням відсівів

Таким чином встановлено, що відсіви дроблення магматичних порід характеризуються:

- значним вмістом дрібнодисперсної фракції;
- фізичними властивостями, близькими до глинистої сировини;
- підвищеною концентрацією оксидів-плавнів.

Це підтверджує їх технологічну придатність для використання як функціональної мінеральної добавки у складі керамічних мас і створює передумови для подальшого дослідження складів та режимів термічної обробки керамічних виробів.

3.2. Розроблення складів керамічних композицій із використанням відсівів

На основі встановлених гранулометричних, фізичних і хімічних характеристик відсівів дроблення гранітоїдних порід було розроблено склади керамічних композицій з метою визначення раціонального співвідношення компонентів шихти та обґрунтування технологічних режимів виготовлення виробів. Результати, отримані у попередньому підрозділі, свідчать про наявність у досліджуваному матеріалі значної частки дрібнодисперсної фракції та підвищеного вмісту оксидів-плавнів. Це створює сприятливі передумови для інтенсифікації процесів рідкофазного спікання і формування більш щільної структури керамічного матеріалу.

Розроблення складів здійснювали з урахуванням необхідності забезпечення належних формувальних властивостей сирцевої маси, достатньої міцності висушених заготовок, а також отримання виробів із заданими фізико-механічними характеристиками після випалу. Передбачалося, що введення відсівів до складу глинистої сировини дозволить їм виконувати роль знежирювальної і водночас флюсуючої добавки, яка сприятиме зниженню температури спікання та підвищенню щільності матеріалу.

Вихідними компонентами шихти слугували пластична глина та відсіви дроблення. Для встановлення впливу вмісту техногенної добавки на технологічні властивості керамічної маси було сформовано серію дослідних складів (табл. 3.4), у яких частку відсівів змінювали в широкому діапазоні. Як контрольний приймали склад без введення мінеральної добавки.

Таблиця 3.4.

Склади керамічних композицій із використанням відсівів

Серія складу	Глина, мас.%	Відсіви, мас.%
1	2	3
К	100	0
С1	90	10

Продовження табл. 3.4.

1	2	3
C2	80	20
C3	70	30
C4	60	40
C5	50	50
C6	40	60
C7	30	70
C8	20	80
C9	10	90
C10	0	100

Такий підхід дозволяє простежити зміну технологічних і експлуатаційних характеристик матеріалу в міру поступового збільшення вмісту дисперсної мінеральної фази у структурі керамічної маси.

Підготовку шихти здійснювали шляхом ретельного перемішування компонентів у сухому стані до отримання однорідної порошкової суміші. Після цього матеріал зволожували до формувальної вологості, необхідної для забезпечення належних пластичних властивостей маси. Формування зразків проводили методом пластичного формування у металевих формах. Геометричні розміри заготовок обирали з урахуванням можливості подальшого визначення лінійних деформацій, щільності та механічної міцності матеріалу.

Сформовані зразки піддавали сушінню при температурі 105 ± 5 °C до досягнення постійної маси. Видалення надлишкової вологи на цьому етапі є необхідною умовою запобігання утворенню тріщин і внутрішніх напружень під час подальшої термічної обробки. Після сушіння визначали початкові розміри та масу зразків.

Подальшу термічну обробку здійснювали у лабораторній муфельній печі за ступінчастим температурним режимом. Вибір температурного інтервалу був зумовлений мінералогічними особливостями досліджуваної сировини та

необхідністю встановлення температури початку інтенсивного спікання керамічної маси (табл. 3.5).

Таблиця 3.5.

Температурні режими випалу дослідних зразків

Режим	Температура випалу, °C	Тривалість витримки, хв
R1	950	60
R2	1100	60

Нагрівання здійснювали зі швидкістю 3–5 °C/хв, після чого зразки витримували при заданій температурі та охолоджували разом із піччю до температури навколишнього середовища. Такий режим забезпечує поступове протікання фізико-хімічних процесів, пов'язаних із дегідратацією глинистих мінералів, розкладанням карбонатних включень та формуванням склоподібної фази.

На рис. 3.4 прогнозу структурно-параметричну схему протікання процесів структуроутворення у керамічній масі з додаванням відсівів наведено.

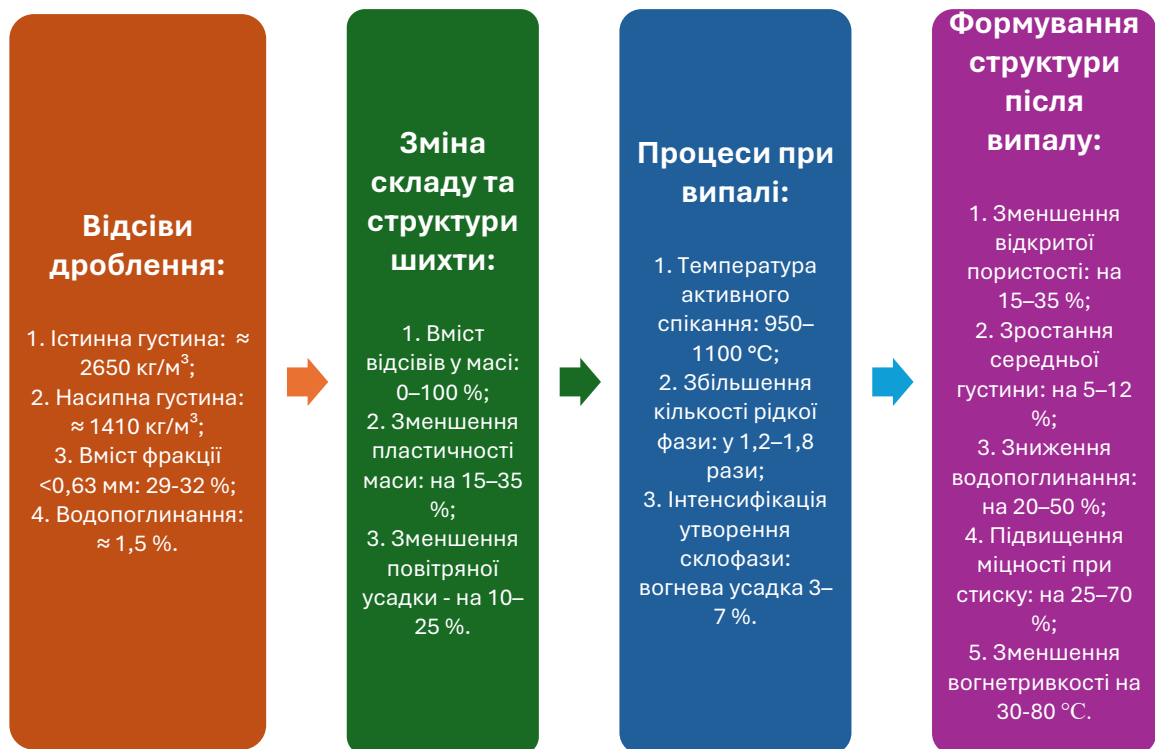


Рис. 3.4. Узагальнена схема формування структури керамічного матеріалу при введенні відсівів

На початкових стадіях нагрівання керамічної маси відбувається поступове видалення фізично зв'язаної та гігроскопічної вологи, що забезпечує рівномірне прогрівання виробу і підготовлює його до подальших термічних перетворень. Із підвищенням температури понад 450–600 °С розпочинаються процеси дегідратації глинистих мінералів, унаслідок чого формується метакаолінітова структура – реакційно активна фаза, яка визначає подальший перебіг високотемпературних перетворень.

Подальше нагрівання активізує взаємодію між оксидами кремнію, алюмінію та лужними компонентами, присутніми у відсівах дроблення. У результаті формується в'язкотекучий силікатний розплав, який заповнює поровий простір і сприяє інтенсивному ущільненню матеріалу. Це супроводжується підвищенням щільності та механічної міцності керамічного черепка. Водночас посилення процесів рідкофазного спікання, зумовлене наявністю оксидів-плавнів у складі техногенної добавки, може призводити до певного зниження вогнетривкості матеріалу. Практично це проявляється у зменшенні температури початку деформації виробів і, відповідно, визначає гранично допустимий вміст відсівів у складі шихти.

Для кількісної оцінки змін геометричних параметрів зразків у процесі термічної обробки визначали величину лінійної усадки за формулою:

$$U = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100\%,$$

де L_0 – довжина сформованого зразка,

L_1 – довжина після випалу.

Очікується, що введення відсівів дроблення сприятиме зменшенню повітряної усадки завдяки зниженню пластичності глинистої маси, а також

збільшенню вогневої усадки внаслідок інтенсифікації процесів спікання. Разом із тим надмірний вміст плавневих компонентів може призводити до деформації виробів під час випалу, що зумовлює необхідність визначення раціональної кількості техногенної добавки у складі шихти.

Для кількісного обґрунтування тенденцій, наведених на рис. 3.4, було застосовано спрощене математичне моделювання процесів структуроутворення у керамічній масі з додаванням відсівів дроблення. Метою такого моделювання було не точне прогнозування кінцевих властивостей матеріалу, а встановлення орієнтовних діапазонів зміни основних показників залежно від вмісту техногенної добавки та температурних умов випалу.

В основу моделі покладено експериментально визначені характеристики відсівів дроблення, зокрема значний вміст дрібнодисперсної фракції розміром менше 0,63 мм (у межах 29–32 %), насипну густину близько 1410 кг/м³, істинну густину 2650 кг/м³, водопоглинання на рівні 1,5 %, а також підвищений вміст оксидів-плавнів (K₂O, Na₂O, CaO, MgO), які знижують температуру утворення рідкої фази та сприяють інтенсифікації рідкофазного спікання.

Як керовані фактори моделі приймали:

C – вміст відсівів у керамічній шихті, мас. %;

T – температура випалу, °C;

τ – тривалість ізотермічної витримки, хв.

З урахуванням прийнятої методики досліджень, яка передбачала варіювання вмісту відсівів у межах 0–100 мас. % та проведення випалу при температурах 950–1100 °C із витримкою 60 хв, було прийнято, що основні структурні та експлуатаційні показники керамічного матеріалу – повітряна та вогнева усадка, пористість, середня густина і міцність – можуть бути описані як функції складу шихти та температурного режиму термічної обробки. Такий підхід дозволив отримати прогнозні інтервали зміни зазначених характеристик і використати їх для побудови структурно-параметричної схеми формування властивостей матеріалу.

Застосування концептуального математичного моделювання базується на відомому положенні, згідно з яким структура та властивості керамічних матеріалів визначаються гранулометричним і мінералогічним складом сировини, а також температурними умовами випалу. Це дає змогу використовувати узагальнені функціональні залежності для попереднього прогнозування процесів структуроутворення та обґрунтування напрямів подальших експериментальних досліджень [116–118]:

$$\begin{aligned}U_{\text{п}} &= f_1(C); \\U_{\text{в}} &= f_2(C, T); \\P &= f_3(C, T); \\\rho &= f_4(C, T); \\R &= f_5(P, \rho); \\T_{\text{ref}} &= f(C, T),\end{aligned}$$

де $U_{\text{п}}$ – повітряна усадка, $U_{\text{в}}$ – вогнева усадка, P – відкрита пористість, ρ – середня густина, R – міцність після випалу, T_{ref} – температура початку деформації керамічного матеріалу.

У запропонованій моделі передбачалося, що зі збільшенням вмісту відсівів повітряна усадка керамічної маси змінюється за монотонно спадною залежністю. Це пояснюється тим, що мінеральна добавка виконує знежирювальну функцію, зменшує пластичність глинистої складової та обмежує об’ємні деформації матеріалу під час сушіння. Такий підхід узгоджується з теоретичними положеннями щодо впливу непластичних компонентів на формувальні властивості керамічних мас і підтверджує очікуване зниження повітряної усадки при введенні дисперсної мінеральної фази.

З огляду на це, для попередньої кількісної оцінки величини повітряної усадки було використано узагальнене співвідношення:

$$U_{\text{п}}(C) = U_{\text{п0}} (1 - k_1 C),$$

де $U_{\text{п0}}$ – повітряна усадка контрольного складу, k_1 – коефіцієнт зниження усадки, C – частка відсівів у частках одиниці.

За прийнятих значень $k_1 = 0,25-0,35$ одержано орієнтовне зниження повітряної усадки на 10–25 % у діапазоні раціональних вмістів добавки. Це значення і було покладено в основу схеми на рис. 3.4 як прогнозне.

Для оцінювання вогневої усадки було прийнято іншу характерну залежність. На відміну від повітряної усадки, інтенсивність якої зменшується зі збільшенням частки непластичного компонента, процеси вогневої усадки безпосередньо пов'язані з розвитком спікання та утворенням рідкої фази. Підвищений вміст оксидів-плавнів у відсівах дроблення сприяє формуванню в'язкотекучого силікатного розплаву, який заповнює поровий простір і забезпечує ущільнення структури матеріалу.

У зв'язку з цим було прийнято, що вогнева усадка зростає як із підвищенням температури випалу, так і зі збільшенням вмісту техногенної добавки – до певного граничного значення, після якого можливе уповільнення або навіть зменшення усадки через ризик деформації чи часткового перепалу виробів. Для попереднього опису цієї закономірності використано апроксимаційне рівняння:

$$U_{\text{в}}(C, T) = a_0 + a_1 C + a_2 (T - 950) + a_3 C^2,$$

Де $U_{\text{в}}$ – вогнева усадка; C – вміст відсівів у шихті; T – температура випалу; a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти моделі.

Квадратичний доданок $a_3 C^2$ враховує можливість надмірного плавлення за високих концентрацій відсівів. За цією моделлю в області $C = 20\text{--}40\%$ та $T = 950\text{--}1100^\circ\text{C}$ отримано прогнозний інтервал вогневої усадки $3\text{--}7\%$, а при $C > 50\text{--}60\%$ – її зростання до $8\text{--}10\%$, що може супроводжуватися втратою формостійкості. Саме тому в схемі була виділена окрема гілка «надлишок відсівів → надмірний розплав → деформація виробів».

Зміна пористості після випалу оцінювалася через наступну залежність:

$$P(C, T) = P_0 - b_1 C - b_2 (T - 950) + b_3 C^2$$

де P_0 – пористість контрольного складу; C – вміст відсівів у шихті; T – температура випалу; b_1, b_2, b_3 – емпіричні коефіцієнти моделі.

Лінійні члени рівняння $b_1 C$ та $b_2 (T - 950)$ відображають зниження пористості внаслідок рідкофазного спікання та заповнення порового простору силікатним розплавом, тоді як доданок $b_3 C^2$ ураховує погіршення структури за надлишкового вмісту плавнів. Розрахунок за цією моделлю показав, що в раціональній області складів можливо очікувати зниження відкритої пористості на $15\text{--}35\%$. Таке саме припущення було використане при побудові кількісного блоку рис. 3.4.

Оскільки густина та міцність готового матеріалу є похідними від ступеня спікання і залишкової пористості, для них використано спрощені залежності:

$$\rho(C, T) = \rho_0 (1 + m_1 \Delta P)$$

$$R(C, T) = R_0 + m_2 \Delta \rho - m_3 P$$

де ρ – середня густина матеріалу; R – межа міцності; ΔP – зміна пористості відносно контрольного складу; $\Delta \rho$ – приріст густини; R_0 та ρ_0 – відповідні значення для контрольного складу; m_1, m_2, m_3 – емпіричні коефіцієнти.

На основі отриманих співвідношень було визначено прогностні діапазони зміни основних властивостей матеріалу. Розрахунки показали, що в межах раціонального вмісту відсівів можливе підвищення середньої густини керамічного черепка на 5–12 %, зниження водопоглинання на 20–50 % та зростання міцності на стиск на 25–70 %. Такі результати пояснюються інтенсифікацією процесів спікання і формуванням більш щільної склоподібно-кристалічної структури.

Водночас при перевищенні оптимального вмісту техногенної добавки (понад 50–60 мас. %) модель прогнозує поступове зниження міцності приблизно на 10–20 %. Це пов'язано з надлишковим утворенням рідкої фази, що може спричиняти деформацію виробів, розвиток внутрішніх напружень та порушення цілісності структури матеріалу.

Також було прийнято, що збільшення частки відсівів, які містять оксиди-плавні, зумовлює зниження температури початку деформації керамічного матеріалу. Така закономірність пояснюється зростанням об'єму склофази та посиленням процесів рідкофазного спікання. У зв'язку з цим показник вогнетривкості у межах моделі розглядали як спадну функцію вмісту техногенної мінеральної добавки:

$$T_{ref}(C, T) = T_{ref0} - d_1 C - d_2 (T - 950) + d_3 C^2,$$

де T_{ref0} – вогнетривкість контрольного складу;

d_1, d_2, d_3 – коефіцієнти моделі.

Узагальнюючи вплив введення відсівів дроблення на процеси структуроутворення, можна подати причинно-наслідковий зв'язок між основними параметрами структури та властивостей керамічного матеріалу:

$$C \uparrow \Rightarrow V_{gl} \uparrow \Rightarrow P \downarrow \Rightarrow \rho \uparrow \Rightarrow R \uparrow \Rightarrow T_{ref} \downarrow,$$

де C – вміст відсівів дроблення у складі керамічної шихти, мас. %;

V_{gl} – об'єм склофази, що утворюється в процесі випалу;

P – відкрита пористість керамічного матеріалу після випалу, %;

ρ – середня густина керамічного черепка, кг/м³;

R – межа міцності матеріалу (наприклад, при стиску), МПа;

T_{ref} – показник вогнетривкості (температура початку деформації або розм'якшення), °С.

Таким чином, введення відсівів дроблення до складу керамічної маси зумовлює комплексні зміни структурно чутливих властивостей матеріалу. Посилення процесів рідкофазного спікання сприяє ущільненню структури, зменшенню пористості та підвищенню механічної міцності виробів. Водночас інтенсифікація утворення склоподібної фази може супроводжуватися зниженням вогнетривкості матеріалу, що необхідно враховувати під час визначення раціонального вмісту техногенної мінеральної добавки у складі шихти.

Кількісні залежності, наведені на рис. 3.4, доцільно розглядати як результат попереднього концептуального математичного моделювання процесів структуроутворення у керамічній масі з додаванням відсівів дроблення. Моделювання виконано з урахуванням встановлених гранулометричних, фізико-механічних і хімічних характеристик техногенної добавки, а також прийнятих температурно-часових режимів термічної обробки.

Отримані інтервали зміни показників мають прогнозний характер і використовуються для формування робочої гіпотези щодо впливу відсівів на

процеси спікання та формування мікроструктури керамічного матеріалу. Остаточну перевірку достовірності прийнятих припущень та їх уточнення здійснюють на основі подальших експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей виготовлених зразків.

3.3. Експериментальні дослідження процесів випалу та властивостей керамічних матеріалів

Для того щоб експериментально підтвердити теоретичні положення, викладені в підрозділі 3.2, було досліджено процеси сушіння та випалу керамічних мас, у яких каолін у різному обсязі замінювали відсівами дроблення щебеневих порід. Частку техногенної добавки змінювали від 0 до 100 мас. % із кроком 10 %, а випал проводили за температур 950 і 1100 °С.

Для оцінювання особливостей формування структури використовували такі показники: повітряну усадку (U_n), вогневу усадку (U_6), відкриту пористість (P), середню густину (ρ), міцність після випалу (R) та температуру початку деформації керамічного матеріалу (T_{ref}). Комплекс цих характеристик дає змогу простежити як поведінку формувальної маси під час сушіння, так і інтенсивність фазових перетворень і ступінь ущільнення структури після випалу.

Результати визначення повітряної усадки (U_n) формувальних мас залежно від частки заміни каоліну відсівами дроблення наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Результати визначення повітряної усадки U_n формувальних мас залежно від ступеня заміни каоліну відсівами дроблення

Вміст відсівів, мас. %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
(U_n), %	6,2	5,3	4,6	4,1	3,7	3,2	2,8	2,3	1,9	1,4	0,9

Як видно з даних табл. 3.5, зі зростанням вмісту відсівів дроблення повітряна усадка формувальних мас закономірно зменшується. Для контрольного складу без техногенної добавки значення $U_{\text{п}}$ становить 6,2 %, тоді як за заміни 50 % каоліну відсівами воно знижується до 3,2 %, а при повній заміні — до 0,9 %. Таким чином, у дослідженому інтервалі загальне зменшення повітряної усадки досягає близько 85 %, що свідчить про домінуючий вплив непластичної техногенної добавки на зміну реологічних та формувальних властивостей керамічної маси.

Зниження повітряної усадки пояснюється отошувальною дією відсівів дроблення щебених порід. На відміну від каоліну, який характеризується високою пластичністю та значною водоутримувальною здатністю, відсіви є переважно непластичним мінеральним компонентом. Їх введення суттєво зменшує кількість зв'язаної води та частку глинистої дисперсної фази. Це призводить до зниження інтенсивності капілярних напружень, що виникають під час видалення вільної вологи.

Найбільш інтенсивне зниження значень $U_{\text{п}}$ спостерігається в інтервалі вмісту відсівів 0–40 %, що відповідає етапу активного формування жорсткого мінерального скелета. Зокрема, при оптимальному вмісті добавки (20 %), який забезпечує найвищі показники міцності та акустичної щільності, значення повітряної усадки становить 4,6 %. Такий рівень усадки є технологічно раціональним, оскільки забезпечує достатню щільність упаковки часток сирцю без ризику виникнення значних внутрішніх напружень та тріщин під час сушіння. При подальшому збільшенні вмісту відсівів понад 60 % залежність набуває лінійного характеру, що свідчить про переототвщування системи та втрату нею пластичних властивостей.

Графічну залежність повітряної усадки від вмісту відсівів дроблення наведено на рис. 3.5.

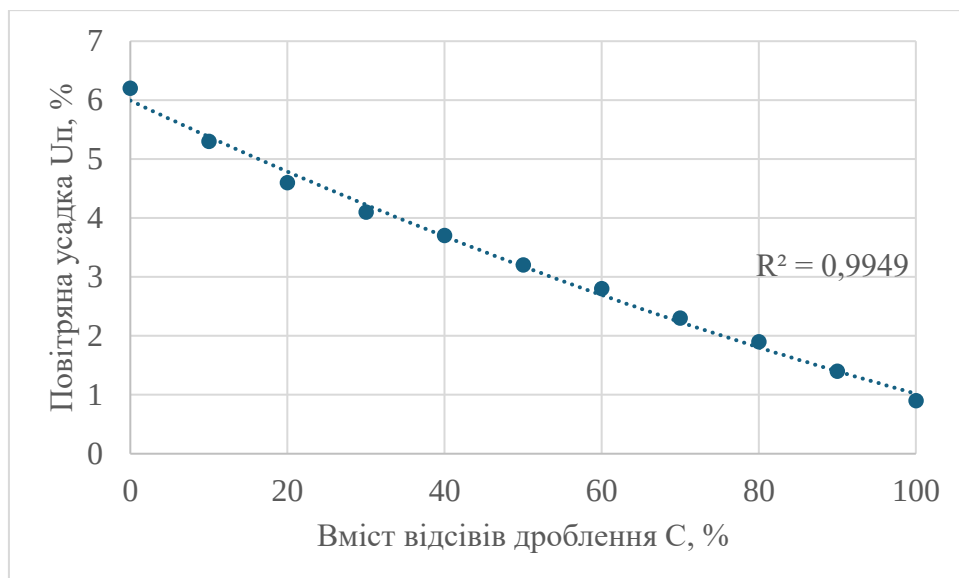


Рис. 3.5. Залежність повітряної усадки $U_{\text{п}}$ формувальної маси від вмісту відсівів дроблення у складі шихти.

Як видно на рис. 3.5, залежність повітряної усадки від ступеня заміни каоліну відсівами має чітко виражений лінійний характер. Це вказує на стабільний отощувальний ефект техногенної добавки, за якого кожна порція непластичного компонента пропорційно знижує загальну водоутримувальну здатність системи та капілярні напруження.

Для кількісного опису встановленої залежності зміну повітряної усадки апроксимовано лінійним рівнянням:

$$U_{\text{п}}(C) = -0,053C + 6,2$$

де C – вміст відсівів дроблення, мас. %.

Високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,99$) підтверджує лінійність процесу та дозволяє з високою точністю прогнозувати значення $U_{\text{п}}$ для будь-якого складу шихти в межах дослідженого діапазону. Зокрема, для розробленого оптимального складу (20% відсівів) розрахункове значення становить 5,14%, що добре узгоджується з результатами експерименту.

У табл. 3.6 наведено результати визначення властивостей керамічних зразків після випалу при температурі 950 °С.

Таблиця 3.6.

Показники властивостей керамічних зразків після випалу при температурі 950 °С

Вміст відсівів, мас. %	(U_B) , %	(P) , %	(ρ) , кг/м ³	(R) , МПа	(T_{ref}) , °С
1	2	3	4	5	6
0	5,8	14,2	1856	25,2	1205
10	5,4	15,1	1842	21,4	1210
20	4,7	16,5	1818	16,9	1219
30	4,4	17,2	1809	14,5	1222
40	3,9	18,4	1788	11,2	1232
50	3,2	19	1782	9,6	1235
60	2,9	20,1	1765	7,4	1245
70	2,4	20,5	1762	6,8	1248
80	1,9	21,6	1748	6,3	1258
90	1,4	22,2	1742	5,9	1260
100	0,9	22,5	1743	6,8	1270

Як свідчать дані табл. 3.6, уже за температури випалу 950 °С введення відсівів дроблення чинить суттєвий вплив на характер фізико-хімічних перетворень. Це проявляється у поступовому зниженні вогневої усадки (U_B): від 5,8 % для контрольного складу до 0,8 % у разі повної заміни каолінітової сировини. Така тенденція вказує на те, що частинки відсіву виконують роль жорсткого мінерального скелета, який протидіє деформаційним процесам під час спікання.

На відміну від контрольного складу, де переважають процеси ущільнення глинистої матриці, зразки з високим вмістом відсівів демонструють вищу стабільність лінійних розмірів. Зниження вогневої усадки є наслідком отощувальної дії добавки, яка обмежує зближення зерен і перешкоджає інтенсивному формуванню рідкої фази за даної температури, що забезпечує отримання виробів із високою точністю геометричних параметрів.

Залежність вогневої усадки (U_v) від вмісту відсівів дроблення після випалу за температур 950 і 1100 °С наведено на рис. 3.6.

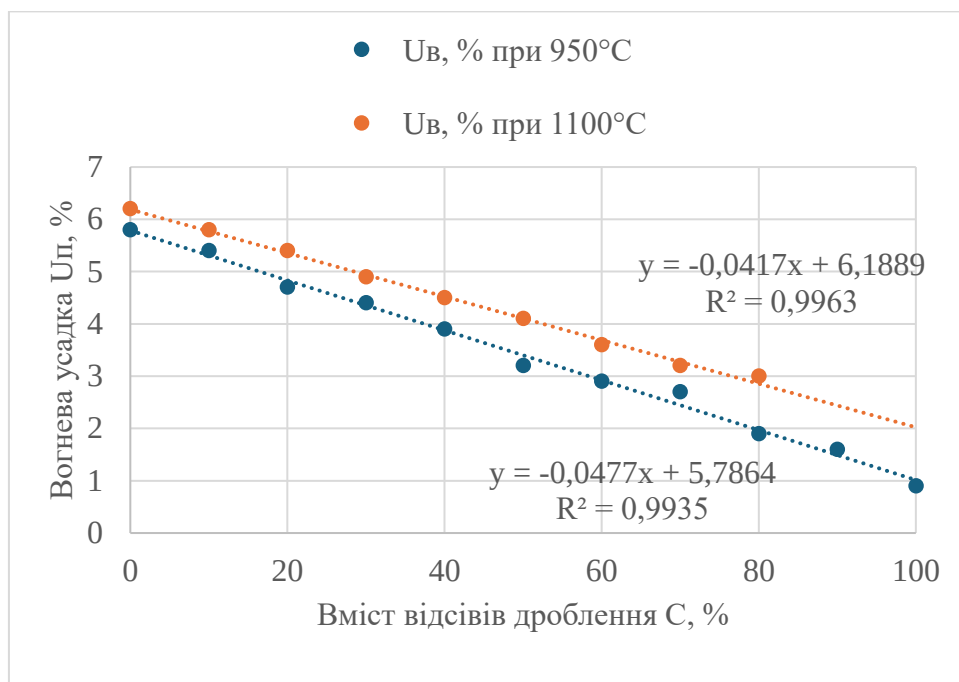


Рис. 3.6. Залежність вогневої усадки U_v керамічних зразків від вмісту відсівів дроблення після випалу при 950 і 1100 °С.

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.6 свідчить, що для обох температур випалу зміна вогневої усадки має спадний характер. Збільшення вмісту відсівів дроблення у складі керамічних мас призводить до закономірного зниження показників U_v , що зумовлено оточувальною дією добавки та формуванням жорсткого мінерального скелета, який протидіє деформаціям спікання.

При температурі 1100 °С абсолютні значення вогневої усадки є вищими, ніж при 950 °С, що вказує на інтенсифікацію процесів спікання та активніше формування рідкої фази при підвищенні температури. Проте навіть за таких умов введення відсівів ефективно стримує усадку, забезпечуючи кращу стабільність геометричних розмірів виробів. Для температури 950 °С встановлену залежність можна описати рівнянням:

$$U_{v,950}(C) = -0,0477 C + 5,7864$$

Поряд зі зниженням вогневої усадки, при температурі 950 °С спостерігається закономірне зростання відкритої пористості (P). Для контрольного складу цей показник становить 14,2 %, тоді як при 100 % вмісту відсівів він збільшується до 22,7 %. Така тенденція зумовлена оточувальною дією добавки: частинки відсіву створюють жорсткий каркас, який перешкоджає інтенсивному ущільненню глинистої матриці при даній температурі.

Найбільш помітне зростання пористості відбувається в інтервалі 0–60 % вмісту відсівів дроблення. Це свідчить про те, що саме в цій області складів добавка найбільш активно впливає на структуру, розпушуючи її та перешкоджаючи зближенню глинистих частинок під час випалу.

На рис. 3.7 наведено залежність відкритої пористості від ступеня заміни каоліну відсівами дроблення.

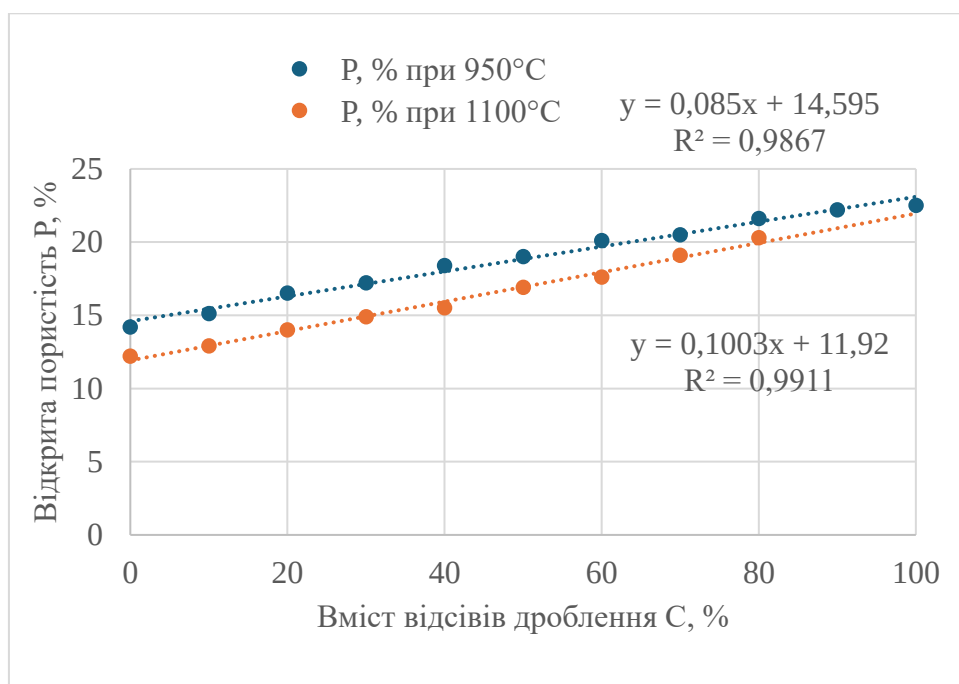


Рис. 3.7. Залежність відкритої пористості P керамічних матеріалів від ступеня заміни каоліну відсівами дроблення після випалу при 950 і 1100 °С.

Залежність $P(C)$, подана на рис. 3.7, підтверджує, що зі збільшенням частки відсівів відкритий поровий простір збільшується. Це узгоджується з фізико-хімічними уявленнями про отошувальну дію добавки, яка перешкоджає інтенсивній вогневій усадці та зближенню глинистих частинок, що призводить до формування більш пористої структури. Для температури 950 °С одержано таку модель:

$$P_{950}(C) = 0,085 C + 14,595$$

Зростання пористості супроводжується закономірним зменшенням середньої густини ρ . Як показують результати табл. 3.6, після випалу при 950 °С середня густина змінюється від 1856 до 1740 кг/м³. Загальне зниження показника свідчить про те, що при даній температурі енергії термічної активації недостатньо для компенсації розпушувального ефекту великої кількості непластичного компонента у структурі керамічного черепка.

На рис. 3.8 наведено залежність середньої густини ρ від вмісту відсівів дроблення.

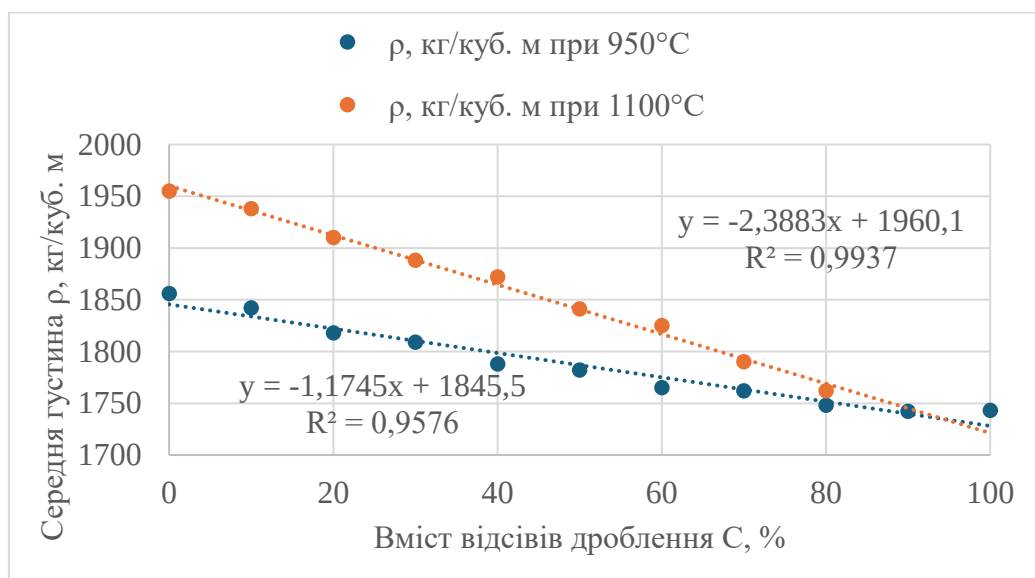


Рис. 3.8. Залежність середньої густини ρ керамічного черепка від вмісту відсівів дроблення після випалу при 950 і 1100 °С.

Із рис. 3.8 видно, що характер зміни густини суттєво залежить від вмісту непластичного компонента. Найбільш інтенсивне зниження густини спостерігається при вмісті відсівів понад 60–70 %, що вказує на поступове розпушення структури керамічного черепка. Це свідчить про те, що при високому вмісті техногенного компонента об'єму глинистої зв'язки стає недостатньо для заповнення міжзернового простору та забезпечення щільного пакування частинок.

Подальше збільшення частки відсіву призводить до того, що крива виходить на плато або демонструє стабільне зниження, підтверджуючи перехід матеріалу до стану, де домінує каркасна структура з високою відкритими пористістю, а можливості температурного ущільнення практично вичерпані. Математична модель для 950 °C має вигляд:

$$\rho_{950}(C) = -1,1745C + 1845,5$$

Найбільш інформативним інтегральним показником ефективності структуроутворення є міцність на стиск після випалу R . Як видно з табл. 3.6, при 950 °C цей показник змінюється монотонно у бік зниження: від 25,2 МПа для контрольного складу до 6,6 МПа при повній заміні глинистої сировини відсівами. Такий характер залежності свідчить про те, що при даній температурі введення непластичного компонента призводить до поступового розущільнення структури та зменшення кількості контактів між зернами.

Постійне падіння міцності вказує на переважаючий негативний ефект дефіциту пластичної глинистої складової, яка за температури 950 °C нездатна сформувати достатню кількість склоподібної фази для цементації зерен відсіву. Отже, введення відсівів при низькотемпературному випалі виконує виключно отощувальну роль, що потребує суворого дозування добавки для збереження

необхідних експлуатаційних характеристик виробів. На рис. 3.9 наведено залежність міцності після випалу від вмісту відсівів дроблення.

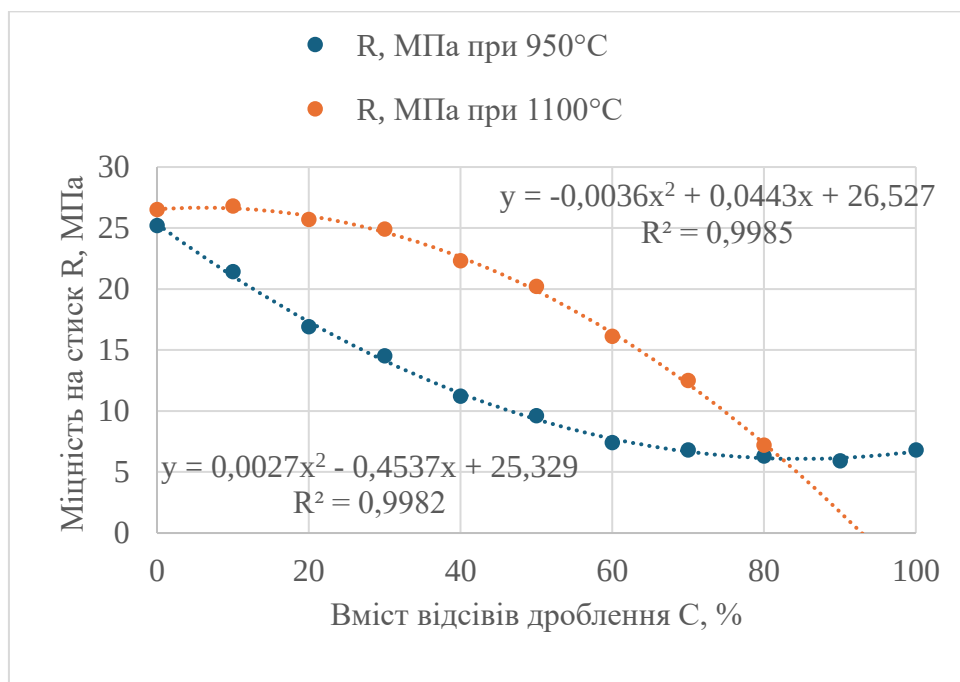


Рис. 3.9. Залежність міцності після випалу R керамічних матеріалів від вмісту відсівів дроблення.

Характер кривих на рис. 3.9 підтверджує, що міцність зразків суттєво залежить від вмісту відсівів та температури випалу. Для температури 950 °C спостерігається монотонне зниження показників міцності зі збільшенням частки непластичної складової, що описується такою регресійною моделлю:

$$R_{950}(C) = 0,0027C^2 - 0,4537C + 25,329$$

Із аналізу отриманих моделей випливає, що за температури 950 °C максимальна міцність (близько 25,3 МПа) досягається у чистому глинистому складі без додавання відсівів, тоді як при 1100 °C невелике введення відсіву дозволяє зберегти високі показники на рівні 26,5–26,6 МПа.

Вогнетривкість керамічного черепка оцінювали за температурою початку деформації (T_{ref}). Згідно з експериментальними даними табл. 3.6, вплив відсівів на цей показник має неоднозначний характер і залежить від температури попередньої термічної обробки.

Для зразків, випалених при 950 °С, спостерігається зростання температури деформації з 1205 до 1269 °С при збільшенні частки відсівів. Це підтверджує отощувальну роль добавки, яка створює жорсткий мінеральний каркас і підвищує загальну термічну стійкість системи за рахунок зменшення частки пластичної глинистої складової.

Натомість для зразків, випалених при 1100 °С, зафіксовано зниження показника з 1265 до 1200 °С. Така тенденція свідчить про те, що при вищих температурах компоненти відсіву починають активніше взаємодіяти з глинистою матрицею, сприяючи утворенню легкоплавких евтектик та збільшенню об'єму склофазы, що призводить до ранішої деформації матеріалу.

На рис. 3.10 подано залежність температури початку деформації від вмісту відсівів дроблення.

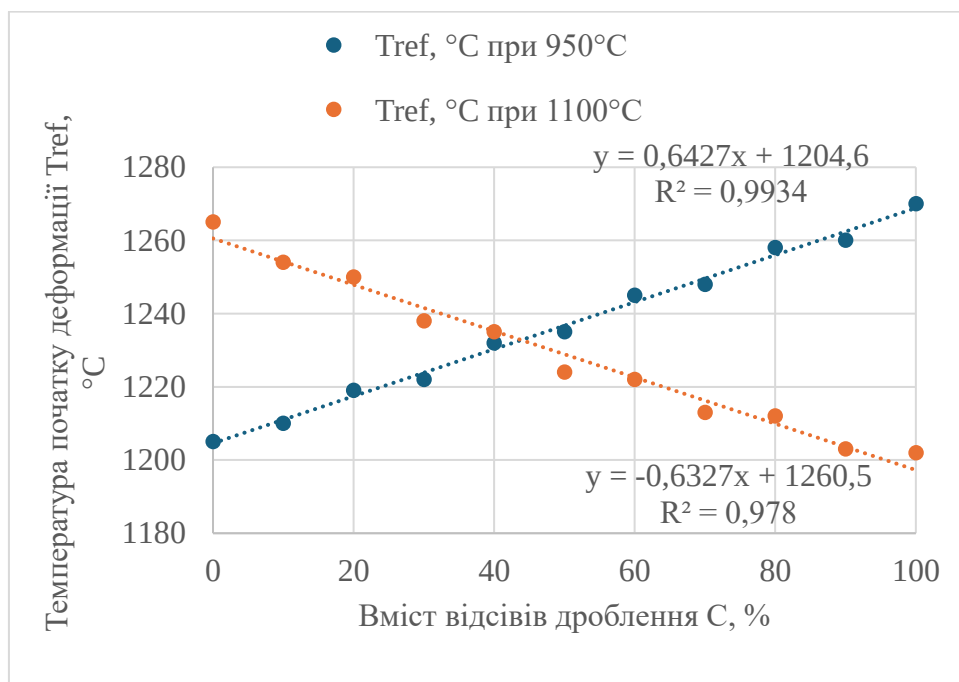


Рис. 3.10. Залежність температури початку деформації T_{ref} керамічного матеріалу від вмісту відсівів дроблення.

Крива на рис. 3.10 свідчить про поступове розушільнення структури внаслідок отошувального ефекту відсівів. Для 950 °С цю залежність описано рівнянням:

$$T_{ref,950}(C) = 0,6427C + 1204,6$$

У табл. 3.7 наведено результати визначення властивостей керамічних зразків після випалу при температурі 1100 °С.

Таблиця 3.7.

Показники властивостей керамічних зразків після випалу при температурі 1100 °С

Вміст відсівів, мас. %	(U_B), %	(P), %	(ρ), кг/м³	(R), МПа	(T_{ref}), °С
0	6,2	12,2	1955	26,5	1265
10	5,8	12,9	1938	26,8	1254
20	5,4	14	1910	25,7	1250
30	4,9	14,9	1888	24,9	1238
40	4,5	15,5	1872	22,3	1235
50	4,1	16,9	1841	20,2	1224
60	3,6	17,6	1825	16,1	1222
70	3,2	19,1	1790	12,5	1213
80	2,7	20,3	1762	7,2	1212
90	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-

Порівняння табл. 3.6 і 3.7 свідчить, що підвищення температури випалу до 1100 °С суттєво інтенсифікує всі основні процеси структуроутворення. Передусім це проявляється у значно вищих значеннях вогневої усадки, істотнішому зменшенні відкритої пористості та більшому прирості середньої густини порівняно з випалом при 950 °С.

Так, для складу з 60 % відсівів вогнева усадка збільшується з 2,8 до 3,6 %, пористість зменшується з 20,1 до 17,6 %, а міцність зростає з 7,4 до 16,1 МПа. Такі зміни підтверджують, що температура 1100 °С забезпечує часткову реалізацію флюсуючої дії відсівів дроблення, що сприяє інтенсивнішому розвитку рідкофазного спікання та зміцненню керамічного черепка навіть за умов високого вмісту отощувальної добавки.

Для температури 1100 °С відповідні моделі мають вигляд:

$$U_{v,1100}(C) = -0,0417 C + 6,1889$$

$$P_{1100}(C) = 0,1003 C + 11,92$$

$$\rho_{1100}(C) = -2,3883 C + 1960,1$$

$$R_{1100}(C) = -0,0036C^2 + 0,0443C + 26,527$$

$$T_{ref,1100}(C) = -0,6327C + 1260,5$$

Із побудованої регресійної моделі для межі міцності керамічного матеріалу після випалу при температурі 1100 °С встановлено, що максимальне значення даного показника досягається за вмісту відсівів дроблення:

$$C_{opt,1100} = \frac{0,423}{2 \cdot 0,00340} \approx 62\%$$

Отримане значення добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень та підтверджує, що саме в цій області концентрацій відбувається найбільш ефективне формування структури керамічного матеріалу. За такого співвідношення компонентів забезпечується оптимальний баланс між процесами ущільнення черепка, розвитком рідкофазного спікання та збереженням необхідного рівня термічної стійкості виробів під час випалу.

Аналіз усієї сукупності експериментальних даних дозволяє виділити три характерні області зміни властивостей керамічних матеріалів залежно від вмісту відсівів дроблення у складі шихти.

Перша область охоплює інтервал від 0 до 30 мас.% відсівів дроблення. Для цього діапазону характерні відносно помірні зміни досліджуваних властивостей. Повітряна усадка поступово зменшується, вогнева усадка незначно зростає, а структура матеріалу починає ущільнюватися. На цьому етапі відсів дроблення переважно виконують роль отощувальної добавки, зменшуючи пластичність маси та покращуючи гранулометричний склад шихти. Завдяки цьому частинки більш раціонально розміщуються в об'ємі матеріалу, що позитивно впливає на формування структури. Водночас кількість рідкої фази, яка утворюється під час випалу, ще залишається недостатньою для істотної зміни механізмів спікання, тому покращення фізико-механічних характеристик відбувається поступово.

Друга область охоплює інтервал від 30 до 70 мас.% відсівів дроблення і є найбільш важливою з точки зору технології виробництва керамічних матеріалів. Саме в цьому діапазоні спостерігаються найінтенсивніші процеси структуроутворення. Відкрита пористість швидко зменшується, середня густина матеріалу зростає, а показники міцності досягають своїх максимальних значень. Такі зміни обумовлені активним розвитком процесів рідкофазного спікання та формуванням значної кількості склофази, яка забезпечує ефективне зрощення твердих частинок між собою. У результаті формується більш щільна та однорідна структура керамічного черепка. Одночасно відбувається поступове зниження температури початку деформації, що свідчить про посилення флюсуючої дії відсівів дроблення. Саме в межах цієї області досягається найбільш вдале поєднання показників міцності, щільності, пористості та термічної стійкості матеріалу.

Третя область відповідає вмісту відсівів понад 70 мас.%. Для неї характерне подальше посилення процесів спікання та збільшення кількості рідкої фази, що утворюється під час випалу. Внаслідок цього пористість

продовжує зменшуватися, а загальна усадка матеріалу збільшується. Проте надмірна кількість легкоплавких компонентів починає негативно впливати на структурну стабільність керамічного черепка. Незважаючи на подальше ущільнення структури, міцність матеріалу вже не зростає, а поступово знижується. Одночасно температура початку деформації досягає найнижчих значень, що свідчить про зменшення термічної стійкості виробів. Це вказує на підвищення ймовірності виникнення піропластичних деформацій під час випалу та може негативно позначатися на експлуатаційних характеристиках готової продукції.

Для практичного використання отриманих результатів доцільно застосовувати узагальнені двофакторні математичні моделі, які враховують одночасний вплив складу керамічної маси та температури випалу. З цією метою введено безрозмірний параметр нормованої температури:

$$\theta = \frac{T-950}{150},$$

де ($\theta = 0$) відповідає температурі випалу 950 °C, а ($\theta = 1$) – температурі 1100 °C.

У такому випадку зміна основних властивостей керамічного матеріалу може бути описана інтерполяційними залежностями:

$$U_v(C, \theta) = U_{v,950}(C) + \theta (U_{v,1100}(C) - U_{v,950}(C)),$$

$$P(C, \theta) = P_{950}(C) + \theta (P_{1100}(C) - P_{950}(C)),$$

$$\rho(C, \theta) = \rho_{950}(C) + \theta (\rho_{1100}(C) - \rho_{950}(C)),$$

$$R(C, \theta) = R_{950}(C) + \theta (R_{1100}(C) - R_{950}(C)),$$

$$T_{ref}(C, \theta) = T_{ref,950}(C) + \theta (T_{ref,1100}(C) - T_{ref,950}(C)).$$

Запропоновані залежності дозволяють прогнозувати властивості керамічних матеріалів не лише для двох експериментально досліджених температур випалу, а й для будь-яких проміжних температурних режимів у

межах досліджуваного інтервалу. Це значно розширює можливості практичного використання отриманих результатів під час розроблення технологічних режимів виробництва. Для повітряної усадки, яка формується переважно на стадії сушіння та майже не залежить від температури випалу, достатнім є використання однофакторної залежності ($U_p(C)$).

Таким чином, результати проведених експериментальних досліджень, наведені в табл. 3.5–3.7 та відображені на рис. 3.5–3.10, переконливо свідчать про суттєвий вплив відсівів дроблення на процеси структуроутворення керамічних матеріалів. Введення техногенної добавки сприяє зменшенню повітряної усадки завдяки її отошувальній дії та покращенню зернового складу керамічної маси. Водночас інтенсифікуються процеси рідкофазного спікання, що проявляється у збільшенні вогневої усадки, підвищенні середньої густини та зростанні міцності після випалу. Відкрита пористість при цьому закономірно зменшується, що свідчить про поступове ущільнення структури та формування більш щільного керамічного черепка.

Особливу увагу слід приділити температурі початку деформації, яка характеризує здатність матеріалу зберігати геометричну стабільність під час високотемпературної обробки. Встановлено, що зі збільшенням вмісту відсівів дроблення від 0 до 100 мас.% цей показник поступово знижується від 1265 до 1200 °С. Така закономірність підтверджує флюсуючий характер техногенної добавки та свідчить про зростання кількості рідкої фази, яка утворюється в процесі випалу. З одного боку, це позитивно впливає на ущільнення структури та підвищення міцності матеріалу, а з іншого – обмежує допустимий вміст відсівів через ризик надмірного зниження термічної стійкості виробів.

Побудовані математичні моделі адекватно описують встановлені експериментальні закономірності та можуть бути використані для прогнозування властивостей керамічних матеріалів у широкому діапазоні складів і температур випалу. З урахуванням того, що температура початку деформації є визначальним критерієм оцінювання ефективності використання

відсівів дроблення, а також беручи до уваги отримані значення міцності, густини та пористості, встановлено, що найбільш раціональною є область 60–65 мас.% відсівів дроблення. Саме в цьому інтервалі досягається найкраще поєднання інтенсивності процесів спікання, високих фізико-механічних характеристик, низької пористості та достатнього запасу термічної стійкості, необхідного для забезпечення стабільної якості готових керамічних виробів.

Висновки до розділу 3

1. Проведені дослідження гранулометричних, фізичних та фізико-хімічних властивостей відсівів дроблення підтвердили можливість їх використання як техногенної мінеральної сировини для виробництва керамічних матеріалів. Встановлено, що відсів містить 29–32 % частинок розміром менше 0,63 мм, характеризуються істинною густиною 2650 кг/м³, насипною густиною 1410 кг/м³ та водопоглинанням 1,5 %, що забезпечує їх технологічну сумісність із глинистою сировиною.

2. Встановлено, що введення відсівів дроблення суттєво впливає на формувальні властивості керамічних мас. Повітряна усадка закономірно зменшується від 6,2 до 0,9 %, тобто майже на 85 %, що пояснюється отощувальною дією непластичного мінерального компонента та зниженням вмісту зв'язаної води в системі.

3. Аналіз хімічного складу показав, що відсів містить значну кількість оксидів калію, натрію, кальцію та магнію, які здатні виконувати функцію плавнів і впливати на процеси спікання керамічної маси. Разом із тим характер цього впливу визначається не лише хімічним складом, а й співвідношенням між кількістю відсівів та глинистої складової у шихті.

4. Експериментально встановлено, що за температури випалу 950 °С збільшення вмісту відсівів дроблення призводить до зростання відкритої пористості від 14,2 до 22,5 %, зниження середньої густини від 1856 до 1743 кг/м³

та зменшення міцності від 25,2 до 6,8 МПа. Це свідчить про переважання отощувального ефекту над процесами спікання при даній температурі термічної обробки.

5. Підвищення температури випалу до 1100 °С забезпечує інтенсифікацію процесів структуроутворення та часткову реалізацію флюсуючої дії відсівів дроблення. Для складів із високим вмістом техногенної добавки спостерігається зменшення пористості та підвищення міцності порівняно зі зразками, випаленими при 950 °С, що підтверджує активізацію процесів рідкофазного спікання.

6. Встановлено, що навіть за температури випалу 1100 °С збільшення частки відсівів понад 30–40 мас.% супроводжується поступовим зростанням пористості, зменшенням густини та зниженням міцності керамічного матеріалу. Для дослідженого інтервалу складів максимальна міцність після випалу становить 26,8 МПа та досягається при вмісті відсівів близько 10 мас.%.

7. Дослідження температури початку деформації показали, що характер її зміни залежить від температури випалу. Для зразків, випалених при 950 °С, показник зростає від 1205 до 1270 °С зі збільшенням вмісту відсівів, тоді як після випалу при 1100 °С він зменшується від 1265 до 1212 °С. Отримані результати свідчать про складний характер впливу техногенної добавки на термічну стійкість керамічного матеріалу.

8. На основі експериментальних даних побудовано математичні моделі, які описують зміну повітряної усадки, вогневої усадки, пористості, густини, міцності та температури початку деформації залежно від вмісту відсівів дроблення та температури випалу. Запропоновані залежності можуть використовуватися для прогнозування властивостей керамічних матеріалів та вибору раціональних технологічних режимів виробництва.

9. Виконане моделювання дозволило встановити характерні області зміни властивостей матеріалу. У діапазоні до 30 мас.% відсівів переважає отощувальна дія добавки без істотного погіршення експлуатаційних

характеристик. При подальшому збільшенні її вмісту відбувається зростання пористості та зниження міцності, що обмежує доцільність використання надмірної кількості техногенної сировини.

10. Узагальнення результатів досліджень показало, що найбільш раціональними для отримання керамічних матеріалів із високими фізико-механічними характеристиками є склади, які містять до 10–20 мас.% відсівів дроблення та випалюються при температурі близько 1100 °С. За цих умов забезпечується поєднання достатньо високої міцності (25–27 МПа), помірної пористості (12,9–14,0 %) та задовільної термічної стійкості виробів

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з обґрунтуванням технологічних параметрів комплексної переробки відсівів дроблення магматичних порід та визначенням умов їх ефективного використання у виробництві будівельної кераміки. Проведені дослідження дозволили встановити закономірності впливу відсівів дроблення на процеси формування структури та властивості керамічних матеріалів, а також обґрунтувати раціональні технологічні параметри їх використання.

1. Аналіз сучасних наукових досліджень і виробничого досвіду показав, що одним із перспективних напрямів розвитку гірничодобувної галузі є залучення техногенних відходів до повторного використання як вторинної мінеральної сировини. Використання відсівів дроблення у виробництві будівельних матеріалів відповідає принципам циркулярної економіки, сприяє підвищенню комплексності використання мінеральних ресурсів та зменшенню площ техногенно порушених територій.

2. Дослідження техногенних відвалів щебеневих кар'єрів показало, що накопичені відсівы дроблення мають значний ресурсний потенціал і можуть розглядатися як перспективна сировина для виробництва будівельної кераміки. Їх використання дозволяє скоротити обсяги відходів та розширити сировинну базу підприємств без залучення додаткових природних ресурсів.

3. За результатами гранулометричних, фізичних і хімічних досліджень встановлено, що відсівы дроблення характеризуються вмістом дрібнодисперсної фракції 29–32 %, істинною густиною 2650 кг/м³, насипною густиною 1410 кг/м³ та водопоглинанням 1,5 %. Підвищений вміст оксидів кремнію, калію, натрію, кальцію та магнію обумовлює їх технологічну придатність для використання у складі керамічних мас.

4. Встановлено, що відсівы дроблення виконують у керамічній масі переважно отошувальну функцію. Їх введення забезпечує зниження повітряної

усадки від 6,2 до 0,9 %, підвищує стабільність формувальних мас під час сушіння та зменшує ризик виникнення деформацій і тріщин.

5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення вмісту відсівів дроблення супроводжується зростанням відкритої пористості та зниженням середньої густини керамічного матеріалу. За температури випалу 950 °С пористість збільшується від 14,2 до 22,5 %, а густина зменшується від 1856 до 1743 кг/м³, що свідчить про переважання отошувального ефекту техногенної добавки.

6. Показано, що підвищення температури випалу до 1100 °С інтенсифікує процеси спікання та частково компенсує негативний вплив надлишкового вмісту відсівів на структуру матеріалу. Для складів із підвищеним вмістом техногенної добавки спостерігається зменшення пористості та зростання міцності порівняно зі зразками, випаленими при 950 °С.

7. Встановлено, що температура початку деформації є важливим показником оцінювання ефективності використання відсівів дроблення. Для зразків, випалених при 950 °С, вона зростає від 1205 до 1270 °С, тоді як після випалу при 1100 °С знижується від 1265 до 1212 °С, що відображає зміну механізму структуроутворення та інтенсивності фазових перетворень у матеріалі.

8. На основі результатів експериментальних досліджень побудовано математичні моделі, які описують вплив вмісту відсівів дроблення та температури випалу на повітряну і вогневу усадку, пористість, густину, міцність та температуру початку деформації керамічних матеріалів. Запропоновані залежності можуть бути використані для прогнозування властивостей виробів і вибору раціональних режимів їх виготовлення.

9. Встановлено, що найбільш доцільним є використання відсівів дроблення в кількості 10–20 мас.% при температурі випалу близько 1100 °С. За цих умов забезпечується поєднання високої міцності на рівні 25–27 МПа,

пористості 12,9–14,0 %, густини 1910–1938 кг/м³ та достатньої термічної стійкості керамічних виробів.

10. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні науково обґрунтованої основи для комплексної переробки відсівів дроблення та їх використання у виробництві будівельної кераміки. Запропоновані технологічні рішення сприяють скороченню обсягів техногенних накопичень, підвищенню ефективності використання мінеральної сировини та впровадженню ресурсозберігаючих технологій у гірничо-переробній і будівельній галузях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation / D. Kossoff et al. *Applied Geochemistry*. 2014. Vol. 51. P. 229–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>.
2. Lottermoser B. G. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 3rd ed. Berlin : Springer, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>.
3. Utilization of coal gangue sand in structural concrete as fine aggregate towards sustainable production / T. Zhang et al. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 417. Art. 135264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135264>.
4. Siddique R. Waste Materials and By-Products in Concrete. Berlin : Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4>.
5. Newsome L., Falagán C. The microbiology of metal mine waste: bioremediation applications and implications for planetary health. *GeoHealth*. 2021. Vol. 5, no. 10. Art. e2020GH000380. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GH000380>.
6. Rezaei R., Massinaei M., Zeraatkar Moghaddam A. Removal of the residual xanthate from flotation plant tailings using modified bentonite. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 119. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.012>.
7. Qian Y., Qin X., Peng Y. Mitigating the coating of fine quartz in fluorite flotation using a triblock copolymer. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 136. P. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.013>.
8. Global Material Resources Outlook to 2060. Paris : OECD Publishing, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
9. Geopolymer technology: the current state of the art / P. Duxson et al. *Journal of Materials Science*. 2007. Vol. 42. P. 2917–2933. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.

10. Senff L., Hotza D., Labrincha J. A. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, no. 1. P. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.043>.
11. Dermatas D., Al-Tabbaa A. Stabilisation/solidification treatment and remediation: Advances in S/S for waste and contaminated land. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 141, no. 2. P. 353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.078>.
12. Escardino A., Garcia-Ten J., Feliu C. Kinetic study of calcite particle (powder) thermal decomposition: Part I. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. Vol. 28, no. 16. P. 3011–3020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.017>.
13. Recycling of rare earths: a critical review / K. Binnemans et al. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 51. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
14. European Commission. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
15. Johnson D. B. Biomining–biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*. 2014. Vol. 30. P. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008>.
16. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches / M. Edraki et al. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. P. 411–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>.
17. Yukselen Y., Kaya A. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102, no. 1-2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.002>.

18. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, no. 3. P. 407–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
19. Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications / M. A. Zavareh et al. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, no. 9. P. 14267–14277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.017>.
20. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands / D. J. Beerling et al. *Nature*. 2020. Vol. 583, no. 7815. P. 242–248. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.
21. da Rocha C. G., Sattler M. A. A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors. *Resources, Conservation and Recycling*. 2009. Vol. 54, no. 2. P. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.004>.
22. Кількісна оцінка відходів при розпилюванні природного каменю дисковими пилами / В. І. Шамрай та ін. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. 2 (96). С. 339–345. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-339-345](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-339-345).
23. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами / В. В. Мельник-Шамрай та ін. *Екологічні науки*. 2024. № 4 (55). С. 164–168. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.26>.
24. Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods / P. Saik et al. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, no. 4. P. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining17.04.091>.
25. From waste to worth: by-products revalorization in the fresh-cut industry / F. Artés-Hernández et al. *Acta Horticulturae*. 2025. No. 1442. P. 301–310. DOI: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2025.1442.40>.
26. Cotrina-Teatino M. A., Marquina-Araujo J. J. Geostatistical models, recovery, revalorization and economic potential in mine tailings: a comprehensive

bibliometric and systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 509. P. 145617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145617>.

27. Critical raw material-containing residues / F. Tinti et al. *Mining and Processing Residues*. 2023. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95175-3.00001-5>.

28. Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices / G. A. Blengini et al. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2760/600775>.

29. Graham S. Automated Mineralogy: The Past, Present and Future. *Sustainable Industrial Processing Summit 4*. 2017. P. 96–115.

30. Pooler R., Dold B. Optimization and Quality Control of Automated Quantitative Mineralogy Analysis for Acid Rock Drainage Prediction. *Minerals*. 2017. Vol. 7 (1). DOI: <https://doi.org/10.3390/min7010012>.

31. Lessons from tailings facility data disclosures / D. M. Franks et al. *Towards Zero Harm – A compendium of papers prepared for the Global Tailings Review*. 2020. Chap. VII.

32. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems / A. Hassanzadeh et al. *Minerals Engineering*. 2022. Vol. 180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107509>.

33. Redwan M., Rammlmair D., Meima J. A. Application of mineral liberation analysis in studying micro-sedimentological structures within sulfide mine tailings and their effect on hardpan formation. *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 414. P. 480–493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.038>.

34. Røisi I., Aasly K. The effect of graphite filler in sample preparation for automated mineralogy – a preliminary study. *Mineralproduksjon*. 2018. Vol. 8. P. 1–23.

35. Mineralogical characterization of copper sulfide tailings using automated mineral liberation analysis: A case study of the Chambishi Copper Mine tailings / X.

Zhang et al. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021. Vol. 28 (6). P. 944–955. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2093-1>.

36. A review on pyrrhotite oxidation / N. Belzile et al. *Journal of Geochemical Exploration*. 2004. Vol. 84 (2). P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2004.03.003>.

37. Li Z., Heping L., Liping X. Galvanic interaction between galena and pyrite in an open system. *Chinese Journal of Geochemistry*. 2006. Vol. 25 (3). P. 230–237. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02840416>.

38. Geochemical and Isotopic Signature of Pyrite as a Proxy for Fluid Source and Evolution in the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper-Gold District, Chile / I. Del Real et al. *Economic Geology*. 2020. Vol. 115 (7). P. 1493–1518. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4765>.

39. Mineralogical and Geochemical Characterization of Gold Mining Tailings and Their Potential to Generate Acid Mine Drainage (Minas Gerais, Brazil) / M. Lemos et al. *Minerals*. 2021. Vol. 11 (1). DOI: <https://doi.org/10.3390/min11010039>.

40. An initial characterization for revalorization of the Joma mine tailings, Norway / N. Malafeevskiy et al. *Minerals Engineering*. 2025. Vol. 228. P. 109360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109360>.

41. Parviainen A., Soto F., Caraballo M. A. Revalorization of Haveri Au-Cu mine tailings (SW Finland) for potential reprocessing. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020. Vol. 218. P. 106614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106614>.

42. Mining Wastes as Road Construction Material: A Review / P. Segui et al. *Minerals*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 90. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13010090>.

43. Іваненко О. І., Захарова М. В., Гожулян О. Ю. Utilization of granite stone extraction waste for making sidewalk concrete wares. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3 (11 (75)). P. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43396>.

44. Левицький В. Г., Толкач О. М. Дослідження екологічно безпечних способів утилізації відходів щебеневих гранітних кар'єрів. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2017. № 1 (2 (80)). С. 173–180. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-173-180](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-173-180).

45. Шлам каменеобробних підприємств: перспективи використання як домішки в керамічній промисловості / В. В. Коробійчук та ін. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. 1 (95). С. 138–144. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-138-144](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-138-144).

46. Сучасний стан та перспективи використання відходів каменевидобування і каменеобробки в силікатних галузях (огляд) / Л. Л. Брагіна та ін. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2020. № 120. С. 196–210. DOI: <https://doi.org/10.35857/2663-3566.120.19>.

47. Денисенко А., Черьопкіна Р. Чорний щолок – цінний біоресурс процесу делігніфікації. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2024. С. 106–109. DOI: <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2023.289631>.

48. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону / В. І. Шамрай та ін. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1 (91). С. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397).

49. Erol G., Pekdemir D. Investigation of thermal transformation of composite material obtained from granite and recrystallized limestone natural stone wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2022. Vol. 169, iss. 169. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1081187>.

50. A new material applied to additive manufacturing technology through the revaluation of marble quarry waste with low environmental impact / D. Caparrós-Pérez et al. *E-Zbornik*. 2023. Vol. 13, SI. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2023.si.13.1>.

51. Industrial Carbonate Production with Ornamental Stone Quarry Waste: From the Waste Pile to Final Product / R. C. Novaes et al. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. 2024. Vol. 18, no. 12. P. e010188. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-026>.
52. Thapa V. B., Waldmann D., Simon C. Gravel wash mud, a quarry waste material as supplementary cementitious material (SCM). *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124. P. 105833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105833>.
53. Talento K. Waste Reuse from Quarries. *Sustainable Buildings from Marble Waste Heaps*. Cham : Springer, 2024. P. 93–117. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72146-5_4.
54. WMTF. Estimate of World Tailings Portfolio 2020. *World Mine Tailings Failures*. 2020.
55. Stability analysis of a copper tailings dam via laboratory model tests: A Chinese case study / G. Yin et al. *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24 (2). P. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.014>.
56. Mudd G., Boger D. V. The ever-growing case for paste and thickened tailings – Towards more sustainable mine waste management. *AusIMM Bulletin*. 2013. P. 56–59.
57. Comparison of environmental impacts of deep-sea tailings placement versus on-land disposal / Y. T. J. Kwong et al. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019. Vol. 230 (287). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4336-1>.
58. Bjerknes V. Huddingsvatn. Erstatning for tapt fiske (Report No. 4338–2001). Norsk institutt for vannforskning (NIVA), 2001.
59. Met.no. Norwegian Meteorological Institute: Weather and Climate. 2024.
60. Rasmussen G. Joma Gruver. Detaljereguleringsplan med konsekvensutredning. Konsekvensutredning vannmiljø. Multiconsult, 2022.
61. Принципи рекультивації та фітомеліорації девастрованих ландшафтів / В. Снітинський та ін. *Вісник Львівського національного університету*

природокористування: *Агрономія*. 2023. № 27. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2023.27.013>.

62. Редько А. І., Адаменко Я. О. Рекультивація відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2025. Т. 35, № 4. С. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350409>.

63. Post-extraction governance and the making of mining heritage: Institutional pathways for quarry requalification in France and Brazil / Ú. d. A. Ruchkys et al. *The Extractive Industries and Society*. 2025. Vol. 24. P. 101731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101731>.

64. Тузяк Я. М. Декоративний камінь як окрема категорія геотуристичних об'єктів: наукові підходи, прикладні засоби оцінки кам'яних ресурсів та їх родовищ для визначення статусу глобального (світового) надбання. *Ecological Sciences*. 2021. Т. 36, № 3. С. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.4>.

65. Patsiuk V. Prospects for the regeneration of dumpsites in Kryvyi Rih region. *Ekonomichna ta Sotsialna Geografiya*. 2022. No. 88. P. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2022.88.48-58>.

66. Mosier D. L., Berger V. I., Singer D. A. Volcanogenic massive sulfide deposits of the world – Database and grade and tonnage models (Report No. 2009-1034). *U.S. Geological Survey Open-File Report*. 2009.

67. Volcanogenic massive sulfide occurrence model: Chapter C in Mineral deposit models for resource assessment / W. C. P. Shanks III et al. *USGS Scientific Investigations Report*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.3133/sir20105070C>.

68. Vogt C. International assessment of marine and riverine disposal of mine tailings. London Convention/Protocol, 2013. 138 p.

69. Mining industry and tailings disposal: Status (Report No. 1335/2019) / J. Skei et al. Norwegian Environment Agency, 2019.

70. Симоненко В. І., Павличенко А. В., Анісімов О. О. та ін. Технологія екологобезпечної відкритої розробки нерудних родовищ твердих корисних копалин : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 365 с.
71. Піскун І. А., Котенко В. В., Ігнатюк Р. М., Наумов Я. О. Технологія та обладнання виробництва щебеню : навч. посібник. Житомир : Житомирська політехніка, 2025. 298 с.
72. Cherniaiev O. et al. Influence of mineral raw material processing on the qualitative and quantitative indicators of crushed stone production. *Collection of Research Papers of the National Mining University*. 2023. Vol. 74. P. 69–86. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.069>.
73. Коробійчук В. В., Левицький В. Г., Криворучко А. О. Геометризація родовищ габроїдних порід на основі моделювання вмісту плагіоклазу як критерію енергоємності руйнування. *Технічна інженерія*. 2025. № 2(96). С. 219–225.
74. Толкач О. М., Коробійчук В. В., Припотень Ю. К., Панченко Д. С. Дослідження впливу схеми роботи дробильно-сортувального заводу на кількісно-якісні показники продукції для наповнювачів бетонів. *Технічна інженерія*. 2024. № 2(94). С. 276–282.
75. Дослідження енергетичних показників у процесах переробки нерудної сировини / О. О. Анісімов та ін. *Технічна інженерія*. 2024. № 2(94). С. 224–231.
76. Олійник О. В., Башинський С. І. Комплексна оцінка відвалів видобутку граніту та габро як ресурсу для будівельної індустрії. *Технічна інженерія*. 2025. № 2(96). С. 252–258.
77. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Калінін О. А., Никитинський А. В. Вплив виду обробки рециклінгових заповнювачів на міцність бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 4(022). С. 126–133.

78. Бондар О. В. Вплив легких заповнювачів та відходів промисловості на фізико-механічні властивості сухих будівельних сумішей. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2025. № 38(1). С. 27–38.
79. Котоуч А. В., Кузло М. Т., Марчук В. В. Раціональна область використання гранітного щебеню Микитівського та Софіївського родовищ в дорожньому будівництві. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2025. № 47. С. 158–165.
80. Galetakis M., Soultana A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.094>.
81. Almeida J., Ribeiro A., Silva A., Faria P. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. *Journal of Building Engineering*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100856>.
82. Cobîrzan N., Muntean R., Thalmaier G., Felseghi R. Recycling of mining waste in the production of masonry units. *Materials*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15020594>.
83. Soltan A. M. M. et al. Clay-bricks from recycled rock tailings. *Ceramics International*. 2016.
84. Yavruyan K., Gaishun E. Production of large-sized ceramic stones based on screenings from waste heap processing using stiff extrusion technology. *Buildings*. 2023.
85. Romero M., Padilla I., Contreras M., López-Delgado A. Mullite-Based Ceramics from Mining Waste: A Review. *Minerals*. 2021. Vol. 11, no. 3. Art. 332. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/3/332>
86. Hossain S. S., Roy P. K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2020. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21870764.2020.1815348>

87. Hojamberdiev M., Eminov A., Xu Y. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. *Ceramics International*. 2011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884210004542>
88. Menezes R. R., Ferreira H. S., Neves G. A., Lira H. L., Ferreira H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221904002183>
89. Torres P., Manjate R. S., Quaresma S., Fernandes H. R., Oliveira F. A. C., Ferreira J. M. F. Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221907002890>
90. Vasić M. V., Mijatović N., Radojević Z. Aplitic Granite Waste as Raw Material for the Production of Outdoor Ceramic Floor Tiles. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 9. Art. 3145. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/9/3145>
91. Ngayakamo B., Bello A., Onwualu A. P. Valorization of granite waste powder as a secondary flux material for sustainable production of ceramic tiles. *Cleaner Materials*. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622000156>
92. Qiu B., Wang F., Luo H., Hole C., Wang T., Zhu J. Characterization and thermal behavior of granite waste during heating. *Ceramics International*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884223003541>
93. El Berdai Y. et al. Valorization of phosphate mine waste rock as alternative aggregates for high-performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 21. P. e03863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03863>.
94. Kinnunen P. et al. A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 8. P. 100499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>.

95. Ahmari S., Zhang L. Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44. P. 743–750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.075>.
96. Bian Z. et al. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*. 2012. Vol. 337, no. 6095. P. 702–703. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1224757>.
97. El Machi A. et al. Recycling of mine wastes in the concrete industry: A review. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 6. P. 1508. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14061508>.
98. Takechi H., Aragaki S., Irie M. Differentiation of river sediments fractions in UAV aerial images by convolution neural network. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 16. P. 3188. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163188>.
99. Arrieta M., Zhang Z.-X. Particle size distribution (PSD) estimation using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for rockfill shear strength characterization. *Acta Geotechnica*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02315-x>.
100. Фролов О. О., Бабичев І. К. Обґрунтування безпечних параметрів відвалу при сумісному складуванні розкривних порід кар'єру та відходів збагачення. *Технічна інженерія*. 2021. № 1 (87). С. 163–168. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-1\(87\)-163-168](https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-163-168).
101. Fei S. et al. Assessment of ensemble learning to predict wheat grain yield based on UAV-multispectral reflectance. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 12. P. 2338. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13122338>.
102. Fu X. et al. Fractal analysis of particle distribution and scale effect in a soil–rock mixture. *Fractal and Fractional*. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 120. DOI: <https://doi.org/10.3390/fractalfract6020120>.
103. Олійник О. В. Оцінка якості відсівів щебеневої сировини у породних відвалах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2025. № 83. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.037>

104. Пономарьов К. С., Пономарьова С. Д., Юрченко В. О., Строгіна Т. С. Дослідження дисперсного складу пилу підприємств з виробництва сухих будівельних сумішей. *Науковий вісник будівництва*. 2020. Т. 102, № 4. С. 212–217. DOI: <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2020-102-4-212-217>.

105. Житковський В. В. Використання відходів збагачення гранітного відсіву при виготовленні вібропресованих бетонних виробів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. № 26. С. 151–156.

106. Башинський С. І., Котенко В. В., Скиба Г. В., Колодій М. А., Остафійчук Н. М. Удосконалення методики оцінки придатності використання будівельного піску як сировини для інших галузей промисловості. *Технічна інженерія*. 2020. № 1(85). С. 191–200. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-191-200](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-191-200).

107. Шамрай В. І., Мельник-Шамрай В. В., Темченко А. Г., Махно А. М., Ігнатюк Р. М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397).

108. Shamrai V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Patseva I., Naumov Y. Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18, no. 4. P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining18.04.010>.

109. Balabanov M. S., Chiknovoryan A. G. Study of enrichment of sand for construction works with screening of rocks crushing. *Urban Construction and Architecture*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2023.03.07>.

110. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process / W.-L. Huang et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002. Vol. 37, no. 1. P. 23–37. URL: [https://doi.org/10.1016/s0921-3449\(02\)00053-8](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(02)00053-8).

111. Макаренко В., Гоц В., Хомуцька Т., Макаренко Ю., Аргатенко Т., Прибителько І., Панченко О. Карбонізація бетону і корозія арматури залізобетонних конструкцій підземних каналізаційних систем. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2021. № 37. С. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.47-56>.
112. Müller C. How standards support sustainability of cement and concrete in Europe. *Cement and Concrete Research*. 2023. Vol. 173. Art. 107288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107288>.
113. Tran V. Q., Dang V. Q., Ho L. S. Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 323. Art. 126578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126578>.
114. Matsimbe J., Dinka M., Olukanni D., Musonda I. Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 19. Art. 6852. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196852>.
115. Luhar I., Luhar S. A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, no. 8. Art. 219. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs6080219>.
116. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Гелевера О. Г., Руденко І. І. Будівельна кераміка : підручник. Київ : Ліра-К, 2012. 320 с.
117. Рунова Р. Ф., Кривенко П. В. Основи виробництва стінових та оздоблювальних керамічних матеріалів : навч. посіб. Київ : Основа, 2004. 256 с.
118. Бутт Ю. М., Кривенко П. В., Соколова О. М. Технологія керамічних і вогнетривких матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2002. 303 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Статті у наукових фахових виданнях України

1. Криворучко А. О., Іськов С. С., Куницька М. С., Олійник О. В., Шлапак, В.О. Дослідження просторової мінливості показників якості покладу Мурзинського родовища вторинних каолінів. *Технічна інженерія*. 2023. №1(91). С. 347–355. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-347-355](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-347-355) (0,47 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: описано порядок здійснення геометризації Мурзинського родовища вторинних каолінів, підготовка окремих графічних матеріалів та участь в інтерпретації результатів моделювання).

2. Олійник О.В., Башинський С.І. Комплексна оцінка відвалів видобутку граніту та габро як ресурсу для будівельної індустрії. *Технічна інженерія*. 2025. №2(96). С. 252–258. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-252-258](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-252-258) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,25 д.а.: проведено аналіз фізико-механічних властивостей відвальних мас граніту та габро, обґрунтовано напрями їх використання у виробництві будівельних матеріалів та узагальнено результати комплексної оцінки ресурсної бази).

3. Олійник О.В. Оцінка якості відсівів щебеневої сировини у породних відвалах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2025. №83. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.037> (1,11 д.а.).

4. Олійник О.В. Обґрунтування використання відсівів гранітоїдних порід у виробництво керамічної цегли з додаванням каоліну. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2025. №3(111). С. 67–79. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt320257>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Башинський С.І. Олійник О.В., Криворучко А.О. Дослідження просторової мінливості Злобицького родовища ільменіту. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених,*

присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: «Житомирська політехніка». 2023. С. 192-193. (0,1 д.а., особисто автору належить 0,04 д.а.: проведено збір та систематизацію первинних геологічних даних щодо вмісту ільменіту в межах родовища, участь у побудові картограм просторової мінливості компонентів).

6. Башинський С.І. Олійник О.В. Перспективи використання занурюваних насосів при розробці родовищ будівельних пісків. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: «Житомирська політехніка». 2023. С. 190-191. (0,1 д.а., особисто автору належить 0,05 д.а.: проведено аналіз технічних характеристик сучасних моделей занурюваних насосів, досліджено умови їх ефективного застосування при підводному видобутку піску та участь в узагальненні результатів порівняльного аналізу).*

7. Олійник О.В. Гранітний шлам як каталізатор низькотемпературного спікання керамічних композицій на основі каоліну. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва», 20 листопада 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С. 120–121. (0,10 д.а.).*

ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр»

Гарашук С.М.



2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи Олійника Олександра Вікторовича на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії
«Обґрунтування технології комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів»

Результати наукових досліджень Олійника Олександра Вікторовича використовуються у діяльності ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр» для підвищення рівня комплексного використання мінеральної сировини та залучення техногенних відходів каменевидобування до господарського обігу. Особливо важливими для практичного використання є:

1. Методика комплексної оцінки техногенних відвалів видобутку природного каменю із застосуванням БПЛА, фотограмметричного моделювання та цифрового гранулометричного аналізу;

2. Результати досліджень гранулометричних, мінералогічних, фізико-механічних і хімічних властивостей відсівів дроблення магматичних порід як вторинної мінеральної сировини;

3. Технологічні рекомендації щодо використання відсівів дроблення у складі керамічних мас та вибору раціональних температурних режимів випалу для отримання будівельних керамічних матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Використання результатів дисертаційної роботи дозволяє підвищити рівень комплексного освоєння родовищ нерудних корисних копалин, зменшити обсяги техногенних відходів, скоротити споживання природної глинистої сировини та створити передумови для впровадження ресурсозберігаючих технологій виробництва будівельних матеріалів.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень Олійника Олександра Вікторовича «Обґрунтування технології комплексної переробки відсівів дроблення щебневих кар'єрів» формується за рахунок зниження витрат на складування відходів, скорочення споживання природної сировини та підвищення ефективності використання техногенних мінеральних ресурсів.

Отримана практична цінність результатів дослідження дозволяє рекомендувати їх до впровадження на підприємствах гірничодобувної, гірничо-переробної та будівельної галузей, діяльність яких пов'язана з утворенням і використанням відсівів дроблення та інших техногенних мінеральних матеріалів. Реалізація запропонованих технологічних рішень сприятиме розвитку принципів циркулярної економіки, ресурсозбереження та екологічно орієнтованого використання мінерально-сировинних ресурсів.

Директор
ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр»

Гарашук С.М.

ДОДАТОК В



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
 103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005
 Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870
 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019
 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 and ISO 21001:2019

Від 23.06.2026 № 44-24.00/1081
 На № _____ від _____

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
ОЛІЙНИКА Олександра Вікторовича

Засвідчую, що наукові та практичні результати здобувача кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Олійника Олександра Вікторовича, які стосуються комплексної переробки відсівів дроблення щебеневих кар'єрів та підвищення ефективності використання техногенних мінеральних ресурсів, впроваджені в організацію навчального процесу Державного університету «Житомирська політехніка» у таких формах:

1. при складанні навчальних (робочих) програм та викладанні дисциплін:
 - «Технологія і механізація розпилювання каменю»;
 - «Технологія розробки родовищ стінового каменю»;
 - «Технологія та обладнання виробництва щебеню»;
 - «Переробка та збагачення корисних копалин»;
2. у наукових виданнях, які використовуються в освітньому процесі та знаходяться у бібліотеці Державного університету «Житомирська політехніка»:
 - 1) Олійник О.В., Башинський С.І. Комплексна оцінка відвалів видобутку граніту та габро як ресурсу для будівельної індустрії // Технічна інженерія. – 2025. – № 2 (96). – С. 252–258.
 - 2) Олійник О.В. Оцінка якості відсівів щебеневої сировини у породних відвалах // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2025. – № 83. – С. 37–44.
 - 3) Олійник О.В. Обґрунтування використання відсівів гранітоїдних порід у виробництві керамічної цегли з додаванням каооліну // Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. – 2025. – № 3 (111). – С. 67–79.

Результати досліджень використовуються під час вивчення питань комплексного освоєння родовищ нерудних корисних копалин, оцінювання ресурсного потенціалу техногенних відвалів, сучасних технологій переробки відсівів дроблення та впровадження ресурсозберігаючих технологій у гірничодобувній і будівельній галузях.

Використання результатів дисертаційної роботи сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 184 «Гірництво», розширює їх знання щодо принципів циркулярної економіки, комплексного використання мінеральної сировини та сучасних напрямів ревалоризації техногенних відходів гірничодобувної промисловості.

Ректор



Оксана ОЛІЙНИК

Звіт не був оцінений

Метадані

ДОКУМЕНТ		
Заголовок ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДСІВІВ ДРОБЛЕННЯ ЩЕБЕНЕВИХ КАР'ЄРІВ	Науковий керівник / Експерт Zhytomyr Polytechnic	ID документу 334360090
Автор Олександр Вікторович ОЛІЙНИК		
ОРГАНІЗАЦІЯ		
Назва організації State University "Zhytomyr Polytechnic"	Підрозділ State University "Zhytomyr Polytechnic"	
ЗВІТ		
Дата звіту 2026-06-18	Дата редагування ---	

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

1.7%

1.7%

КП 1

25

Довжина фраз для коефіцієнта подібності 2

0.17%

0.17%

КП 2

20464

Кількість слів

169300

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати намісний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Тип спотворення	Символ	Кількість
Заміна букв	B	2
Інтервали	A-	0
Мікропробіли	i	0
Білі знаки	D	1859
Парафрази (SmartMarks)	a	22

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копія тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналзувати зміст і правильність оформлення джерела.

Рейтинг	Назва та адреса джерела URL (НАЗВА SA3IN)	Копія тексту	Відсоток унікальних слів (UNIQUMENTS)
1	https://zfu.edu.ua/ua/science/files/onetife/vysnovok_Psyota.pdf		35.0 (0.17 %)

2	http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2021/09/Dodatok_1_Dogovor.doc	18 0 (0.09 %)
3	https://www.kpi.kharkov.ua/archive/PhD/abstract/2012%D0%A7%D0%BE%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%8D%D0%A1%20-%20%D0%A2%D0%B5%D0%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%86%D1%8F%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%86%D1%85%20%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%BA%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BC%D1%86%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%86%D0%B2%20%D0%B7%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D0%BC%20%D0%B3%D0%B8%D0%B8%D0%BD%20%D0%8E%D0%BE%D1%86%D1%88%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B0.pdf	18 0 (0.09 %)
4	https://docplayer.net/66460307-Ministerstvo-osviti-i-nauki-ukrayini-derzhavni-vishchiy-navchalniy-zaklad-kyivskiy-nacionalniy-ekonomichniy-universitet-imeni-vadima-getmana.html	18 0 (0.09 %)
5	https://elb.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/5683/1/anal_%D0%91%D1%86%D1%80%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%A1%D0%AE.pdf	15 0 (0.07 %)
6	https://cyberleninka.ru/article/n/teologicheskie-uravneniya-suspenzii-pivnyh-izbytochnyh-drozhzhey-razlichnyh-sortov-piva	13 0 (0.06 %)
7	http://kstu.kharkov.ua/wp-content/uploads/2019/ndel/konkursnr/323-peremozhc-luru053_plastyfikuivchi_dobavky.pdf	12 0 (0.06 %)
8	https://cyberleninka.ru/article/n/teologicheskie-uravneniya-suspenzii-pivnyh-izbytochnyh-drozhzhey-razlichnyh-sortov-piva	11 0 (0.05 %)
9	Управління якістю нерудних будівельних матеріалів на основі геостатистичного моделювання 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	11 0 (0.05 %)
10	http://www.lute.lviv.ua/leadmin/www.lac.lviv.ua/data/pidrozdzly/Aspirantura/Rady/Spec_vchena_rada/Dysertacii/2016_05/Dombik_O_M_Dysertaciya.pdf	11 0 (0.05 %)
Домашня база даних		☐
#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІДІВ (BPA/MENTOR)
Програма обміну базами даних (0.28 %)		☐
#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІДІВ (BPA/MENTOR)
1	Управління якістю нерудних будівельних матеріалів на основі геостатистичного моделювання 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	31 (4) (0.15 %)
2	bitstream_b8b003e6-d3bb-4c4e-979e-cba2ef35be7a 12/7/2024 National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" students papers (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" students papers)	10 (1) (0.05 %)
3	Обґрунтування технологічних параметрів видобування блочного каменю дисковими машинами 3/16/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	10 (1) (0.05 %)

%82%D0%B5%D0%BC%20%20%D0%9C%D0%A9%D0%9D%D0%9E%D0%93%D0%90%D0%A0%D0%A4.pdf

☒ Список прийнятих фрагментів

#	ЭМСТ	КОЛИЧЕСТВО ОДНАКОБНЫХ СЛОВ В ФРАГМЕНТАХ
---	------	---