DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09

УДК 624.9

А. С. Величкович
к.т.н., доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2685-8753
Кафедра будівництва
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019
А. В. Андрусяк*
к.т.н., доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2099-9045
Кафедра будівництва
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019
Д. В. Сільчук
студент групи Бм-24-1, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0476-4361
Кафедра будівництва
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Оцінка властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України для виготовлення бетонних сумішей

Цитувати як:
Величкович А. С., Андрусяк А., Сільчук Д.В. (2025). Оцінка властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України для виготовлення бетонних сумішей. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 89-104. https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09

© 2025, Величкович А. С., Андрусяк А., Сільчук Д.В.

У статті досліджено фізико-механічні властивості крупного заповнювача, отриманого шляхом дроблення осадових і магматичних гірських порід, що широко використовуються в будівельній галузі західного регіону України. Було оцінено ключові параметри, такі як щільність, пористість, міцність на стиск та розкол, гранулометричний склад, глинисті та пилоподібні частинки, а також форма зерен, які мають критичний вплив на якість бетонних сумішей. У дослідженні розглянуто п'ять видів заповнювачів різного мінералогічного походження, включаючи гранітні, гравійні, піскові та андезитові матеріали. Виявилося, що їх фізико-механічні властивості залежать не лише від мінералогічного складу, але й від умов формування, методів видобутку та технологічної обробки. Порівняльний аналіз показав, що гранітний щебінь загалом демонструє кращі фізико-механічні характеристики, включаючи високу міцність, низький вміст шкідливих домішок та оптимальний гранулометричний склад, що забезпечує рівномірний розподіл напружень у бетоні та сприяє довговічності конструкцій. Водночас інші види заповнювачів можуть бути конкурентоспроможними завдяки своїй економічній доцільності та доступності, що робить їх ефективною альтернативою для різних

класів бетону залежно від вимог проекту. У дослідженні також враховуються екологічні аспекти використання місцевої сировини, що сприяє зменшенню вуглецевого сліду будівництва за рахунок зниження логістичних витрат та раціоналізації використання природних ресурсів. Крім того, розглянуто можливості підвищення ефективності використання заповнювачів шляхом їх модифікації, зокрема використання поверхневих обробок для покращення адгезії до цементного каменю. Представлені результати мають практичне значення для оптимізації складу бетонних сумішей, розробки нормативних вимог до якості заповнювачів та підвищення технологічності бетонних конструкцій. Результати дослідження можуть бути використані проектними організаціями, виробниками бетонних виробів та будівельними компаніями для підвищення ефективності виробництва, забезпечення довговічності будівельних проектів та зменшення впливу будівельної галузі на навколишнє середовище.

Ключові слова: заповнювач, щебінь, гравій, будівельний матеріал, граніт, бетон

Вступ

Будівельна галузь є однією з ключових сфер економіки країни, що безпосередньо впливає на розвиток інфраструктури та соціально-економічний прогрес. На сьогодні найважливішим будівельним матеріалом є бетон, якість якого значною мірою визначається властивостями крупних заповнювачів [1, 2].

Крупні заповнювачі зазвичай поділяють на природні, штучні та отримані з промислових відходів [3]. До природних належать гравій і щебінь, які отримують із магматичних (граніт, базальт, діабаз), осадових (вапняк, пісковик, черепашник) та метаморфічних порід. Окрім дроблених матеріалів у бетонних сумішах застосовують морську й річкову гальку, а для легких бетонів – пористі вулканічні породи, зокрема пемзу [4]. Штучні заповнювачі отримують термічною або хімічною обробкою природної сировини. До них відносять керамзит, спучений перліт, аглопорит і спучений сланець, що характеризуються низькою густиною та пористістю [5]. Альтернативу природному каменю становлять крупні заповнювачі з промислових відходів, зокрема металургійні та доменні шлаки, геополімерний заповнювач, перероблений бетон і цегла, що сприяє ресурсозбереженню й утилізації відходів [6].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Західний регіон України має значні поклади осадових та магматичних гірських порід, що використовуються у виробництві крупних заповнювачів для бетонів. Серед основних видів сировини виділяють граніти, гравій, пісковики, вапняки та андезити, які формують сировинну базу для будівельної галузі. Однак фізико-механічні характеристики цих матеріалів залежать не лише від їхнього мінералогічного складу, але і від умов формування порід, методів видобутку та технологічної обробки [7, 8]. Зокрема, граніти, що зазнали тривалих тектонічних навантажень, можуть мати підвищену

тріщинуватість, що знижує їхню міцність. Гравій, отриманий із руслових відкладень, характеризується природною округлістю зерен, що впливає на адгезію із цементним каменем, тоді як дроблений щебінь із пісковиків демонструє кращу зчеплюваність, але може мати вищу водопоглинальність тощо.

Дослідження показали, що мікро- та макроструктурні характеристики крупних заповнювачів – міцність, пористість, форма зерен, вміст домішок – визначають структуру міжфазної зони контакту та безпосередньо впливають на гідратацію цементу, розвиток мікротріщин і довговічність бетонних конструкцій [9, 10]. Оптимальний гранулометричний склад і текстурні особливості поверхні заповнювачів впливають на механічну стабільність матеріалу, сприяючи рівномірному розподілу напружень у бетоні та зменшенню концентрації локальних дефектів. Фізико-хімічні властивості заповнювачів також визначають їх взаємодії з цементним каменем, що може сприяти покращенню довговічності та водостійкості матеріалу [11, 12].

Зростає інтерес до альтернативних заповнювачів, зокрема рецикльованих матеріалів і промислових відходів, що дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля та знизити вартість будівельних матеріалів. Проте їх взаємодія з цементним матриксом є складним процесом, що потребує регулярних досліджень і аналізу, оскільки варіативність властивостей таких заповнювачів може призводити до суттєвої зміни характеристик бетонних сумішей [13, 14]. Для досягнення необхідних властивостей бетону, використовуються карбоксиловмісні суперпластифікатори підвищують міцність і щільність структури, що покращує довговічність матеріалу [15]. Полімерні добавки також підвищують ефективність ін'єкційних технологій для заліковування тріщиноподібних дефектів [16], що сприяє розвитку теорії граничних станів конструкцій із тріщинами [17–19] та включеннями [20–22].

Дослідження крупних заповнювачів із осадових і магматичних порід є ключовим для раціонального використання місцевих ресурсів і зменшення логістичних витрат [23, 24].

Попри значну кількість досліджень у цій сфері, відсутні систематизовані дані щодо фізико-механічних характеристик крупних заповнювачів саме з гірських порід західного регіону України, а також їхнього впливу на якість бетонних сумішей. Крім того, існують розбіжності у літературі щодо переваг різних видів заповнювачів у контексті їх застосування для конструкцій різного призначення.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є оцінка фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів, отриманих шляхом дроблення осадових та магматичних гірських порід, з метою визначення їхньої придатності для виготовлення бетонних сумішей. Особливу увагу

приділено порівняльному аналізу різних типів заповнювачів та розробці рекомендацій щодо їх використання у будівельній практиці.

Матеріали та методи

У рамках даного дослідження було обрано шість найбільш поширених видів крупного заповнювача для бетонних сумішей, що видобуваються в західному регіоні України. До переліку відібраних матеріалів увійшли:

- щебінь гранітний Клесівський кар'єр нерудних копалин "Технобуд", Рівненська обл., Сарненський р-н, смт. Клесів (зразок 1, рис. 1);
- щебінь гранітний "АТ Коростенський гранітний кар’єр", Житомирська обл., м. Коростень (зразок 2, рис. 2);
- щебінь гравійний ТОВ "Гравел груп", Івано-Франківська обл., Надвірнянський р-н, с. Фитьків (зразок 3, рис. 3);
- щебінь гравійний "Майдан-іспаський кар’єр піщано-гравійної суміші", Чернівецька обл., Вижницький р-н, с. Іспас (зразок 4, рис. 4);
- щебінь пісковик ТДВ "Надвірнянський кар’єр – Карпати", Івано-Франківська обл., Надвірнянський р-н, с. Пасічна (зразок 5, рис. 5);
- щебінь андезитовий ПрАТ "Хустський кар’єр", Закарпатська обл., Хустський р-н, с. Рокосово (зразок 6, рис. 6).

Для забезпечення об'єктивності дослідження відбір проб заповнювачів здійснювався відповідно до чинних державних стандартів, зокрема ДСТУ Б В.2.7-71-98 "Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із природного каменю для будівельних робіт. Технічні умови". Відбір проб проводився шляхом рівномірного змішування матеріалу, відібраного з різних ділянок складування та транспортування, що дозволило отримати репрезентативні зразки кожного виду заповнювача.

Для оцінки фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів було проведено низку лабораторних випробувань, що дозволяють визначити їх якісні характеристики та оцінити придатність до використання в бетонних сумішах. Методика дослідження передбачала виконання наступного комплексу експериментальних процедур.

Визначення зернового складу щебеню – гранулометричний аналіз шляхом просіювання матеріалу через набір сит для оцінки рівномірності розподілу частинок різних фракцій, що є критично важливим для щільності бетонної структури та її механічних властивостей.

Визначення дробимості – оцінка міцності зерен шляхом їх навантаження до руйнування для визначення стійкості матеріалу до механічного впливу.

Рис. 1. Щебінь гранітний смт. Клесів

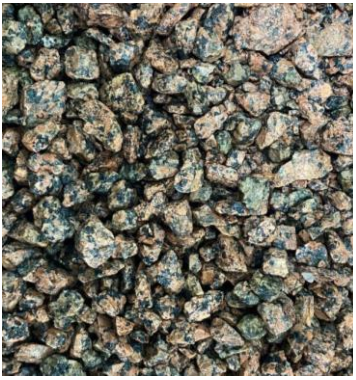

Рис. 2. Щебінь гранітний м. Коростень

Рис. 3. Щебінь гравійний, с. Фитьків

Рис. 4. Щебінь гравійний, с. Іспас

Рис. 5. Щебінь пісковик, с. Пасічна

Рис. 6. Щебінь андезитовий, с. Рокосово

Визначення вмісту пилуватих та глинистих частинок (метод відмулювання) – аналіз кількості тонкодисперсних включень, що можуть знижувати зчеплення заповнювача з цементним каменем.

Визначення вмісту зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форм – оцінка частки зерен з невідповідною геометрією, що може порушувати структуру бетонного скелету та знижувати його міцність.

Визначення середньої щільності – розрахунок щільності матеріалу на основі вимірювання маси та об'єму твердих частинок заповнювача, що впливає на розрахунок складу бетонної суміші.

Визначення насипної щільності – визначення об'ємної маси заповнювача в природному стані, що впливає на дозування компонентів бетонної суміші.

Визначення вологості матеріалу – оцінка вмісту вологи у заповнювачі для коригування водоцементного співвідношення в бетонних сумішах.

Комплексний аналіз отриманих результатів дозволить обґрунтовано визначити оптимальні типи крупного заповнювача для використання в умовах конкретних будівельних проєктів. Порівняння фізико-механічних характеристик різних матеріалів дозволить не лише забезпечити відповідність нормативним вимогам, а й оптимізувати склад бетонних сумішей для підвищення довговічності та експлуатаційної надійності конструкцій.

Результати та обговорення

На основі проведених випробувань було складено протоколи, основні результати яких представлено в таблицях 1 і 2 та на діаграмах зернового складу усіх досліджених зразків.

Одним із ключових параметрів, що визначають якість крупних заповнювачів, є їх дробимість, яка характеризує здатність матеріалу чинити опір механічним впливам, таким як стирання та руйнування під дією навантажень. Висока стійкість до дроблення є важливою для довговічності бетону, особливо в умовах інтенсивних експлуатаційних навантажень.

За підсумками дослідження дробимості (рис. 7) у табл. 1 та 2 для кожного зразка заповнювача подано два числові значення: відсоткове співвідношення роздроблених частинок після випробування (чим менше це значення, тим вища стійкість заповнювача до дроблення); показник марки дробимості (значення в дужках), який визначає міцність матеріалу за стандартизованою класифікацією.

Рис. 7. Процес визначення дробимості крупного заповнювача

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості заповнювачів (зразки 1–3)

Назва показника, що визначається	Одиниці виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
Гранітний щебінь Клесівський кар'єр нерудних копалин "Технобуд" (зразок 1)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1556	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	2,65 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,96	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	8,67	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2712	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
Гранітний щебінь "АТ Коростенський гранітний кар'єр" (зразок 2)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1451	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	10,71 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,28	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	7,21	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2620	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
Щебінь гравійний ТОВ "Гравел груп" (зразок 3)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1456	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	10,69 (800)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,76	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	17,6	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2593	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості заповнювачів (зразки 4–6)

Назва показника, що визначається	Одиниці виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
Щебінь гравійний "Майдан-іспаський кар'єр піщано-гравійної суміші" (зразок 4)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1464	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	17,88 (600)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	1,1	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	8,72	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2555	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
Щебінь пісковик ТДВ "Надвірнянський кар'єр – Карпати" (зразок 5)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1337	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	9,65 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,54	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	44,1	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2644	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
Щебінь андезитовий ПрАТ "Хустський кар'єр" (зразок 6)				
Насипна щільність	кг/м^3	–	1372	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	12,33 (1000)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилуватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,77	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	28,4	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м^3	–	2466	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16

Отже, найвищу стійкість до дроблення продемонстрував зразок 1 (2.65%), що відповідає марці дробимості 1200. Це свідчить про високу міцність матеріалу, що робить його придатним для використання в конструкціях, які зазнають значних навантажень, таких як мости, аеродромні покриття та висотні будівлі. Помірну стійкість до дроблення показали зразки 2 (10.71%), 5 (9.65%) та 6 (12.33%), які також мають порівняно хороші характеристики дробимості, а їх показники знаходяться в межах марок 1000–1200. Вони можуть бути використані в бетонних конструкціях загального призначення, включаючи житлове та комерційне будівництво. Підвищену дробимість продемонстрував зразок 3 (10.69%), що відповідає марці 800. Це вказує на дещо нижчу міцність у порівнянні з попередніми зразками. Низьку стійкість до дроблення показав зразок 4 (17.88%), що відповідає марці 600. Це означає, що даний заповнювач

схильний до значного руйнування під дією навантажень, що обмежує його застосування у високоміцних конструкціях. Він може бути використаний лише в елементах, які не зазнають значних механічних впливів, наприклад, у ненавантажених бетонних блоках.

Зерновий склад крупного заповнювача є одним із ключових параметрів, що визначає його придатність для використання в бетонних сумішах, оскільки впливає на щільність укладки зерен, водопотребу суміші та фізико-механічні властивості затверділого бетону. Результати гранулометричних досліджень подано на рис. 8–13.

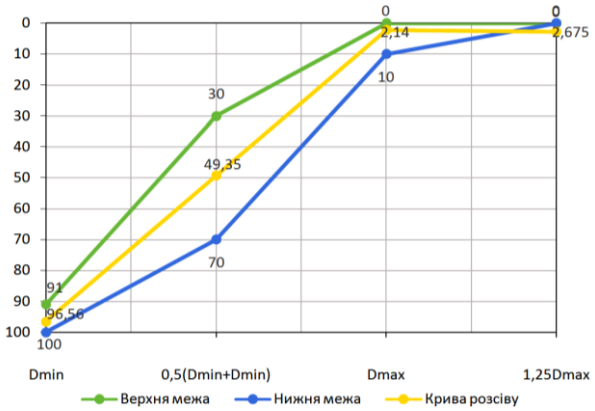

Рис. 8. Гранулометричний аналіз гранітного щебеню смт. Клесів (зразок 1)

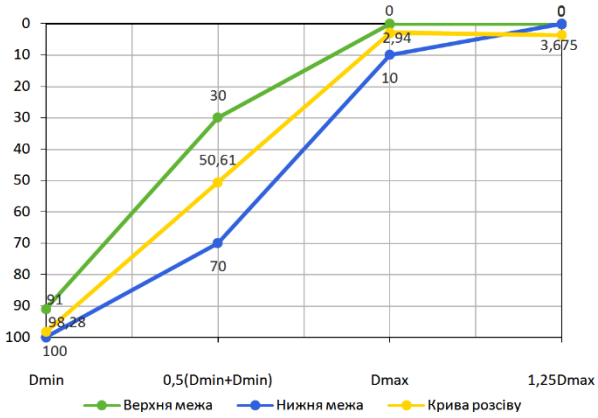

Рис. 9. Гранулометричний аналіз гранітного щебеню м. Коростень (зразок 2)

Для визначення гранулометричного складу крупних заповнювачів було проведено лабораторні випробування відповідно до чинних стандартів. Експериментальна методика передбачала розподіл проби заповнювача за фракціями шляхом просіювання через набір сит із круглими отворами (25 мм, 20 мм, 10мм, 5 мм, 2.5 мм, 1.25 мм). Відбір проби масою 10 кг для кожного заповнювача проводився методом квартування, що забезпечує репрезентативність отриманих результатів. Відібрану пробу висушували до постійної маси при температурі 105 ± 5 °С відповідно до встановлених методичних вимог. Після просіювання визначали масу залишків на кожному ситі, далі розраховували їхню відносну частку у відсотках від загальної маси проби, а також повні залишки – сумарну частку матеріалу, що залишається на даному ситі та всіх ситах з більшим розміром отворів. Графічні інтерпретації отриманих даних представлені у вигляді діаграм зернового складу. На осі абсцис графіків позначено розміри сит, що відповідають контрольним отворам Dmin, 0.5(Dmax + Dmin), 1.25Dmax. На осі ординат відкладено величини повних залишків у відсотках. Загалом, якість зернового складу крупного заповнювача оцінювали за значеннями повних залишків на ситах з контрольними отворами.

Усі представлені діаграми (рис. 8 – рис. 13) містять три криві: верхню межу (зелена лінія), яка визначає граничний рівень залишків для допустимого зернового складу; нижню межу (синя лінія), що відображає мінімально допустимі значення; фактичну криву розсіву (жовта лінія), яка характеризує реальний гранулометричний склад дослідженого матеріалу.

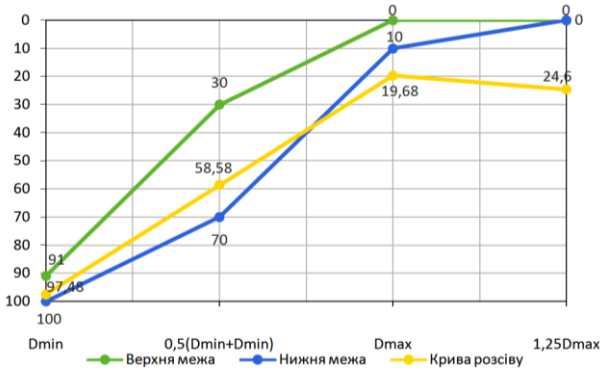

Рис. 10. Гранулометричний аналіз гравійного щебеню с. Фитьків (зразок 3)

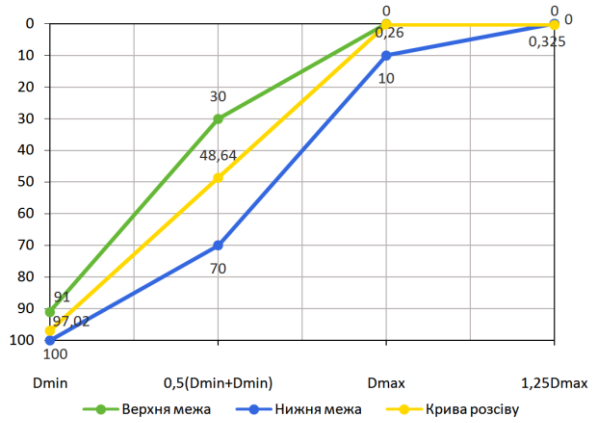

Рис. 11. Гранулометричний аналіз гравійного щебеню с. Іспас (зразок 4)

Для прикладу проаналізуємо діаграму, зображену на рис. 8. При D_{min} (найменшому контрольному отворі сит) залишок становить 96.56%**,** що свідчить про високий вміст крупних зерен у матеріалі. Це значення знаходиться між нормативними межами: верхня межа залишків становить 91%, а нижня – 100%**.** Відхилення від верхньої межі (на 5.56%) вказує на те, що матеріал містить менше дрібних зерен ніж це допускається стандартом і загалом залишається в межах допустимого діапазону. При середньому контрольному отворі сит $0.5(D_{max} + D_{min})$, залишок на ситі суттєво зменшився, склавши близько 49.35%**.** Це свідчить про значну частку зерен середнього розміру у матеріалі, що забезпечує хорошу рівномірність розподілу фракцій. При D_{max} залишки різко зменшились до 2.14%**,** що підтверджує відсутність надлишку великих зерен у пробі. Такий розподіл є типовим для добре градуйованого матеріалу з переважним вмістом середніх фракцій. При $1.25D_{max}$ залишок становить 2.675%, при цьому значення верхньої і нижньої меж – 0%. Оскільки згідно чинних ДСТУ/EN нормативний ліміт залишку на контрольному ситі $1.25D_{max}$ становить 5%, фактичне значення 2.675% відповідає вимогам і не перевищує допустиму межу відхилення. Це свідчить про відповідність матеріалу класу щебню 10–20 мм.

Аналогічним чином проаналізували зерновий склад усіх заповнювачів. У двох випадках на контрольному ситі $1.25D_{max}$ мали перевищення нормативного ліміту залишку 5%. Ймовірно це може негативно вплинути на працездатність бетонної суміші – ускладнене ущільнення, зниження однорідності, дефекти структури затверділого бетону тощо.

В такому разі можливі наступні варіанти дій. Додаткове просіювання заповнювача для вилучення надмірно великих зерен. Змішування з дрібнішою фракцією для балансування зернового складу. Зміна режиму дроблення – коригування параметрів дробильного обладнання для отримання більш рівномірного зернового складу. Обмежене використання в бетоні – застосування такого заповнювача лише для грубих, низькочутливих конструкцій (наприклад, для масивних елементів, або неструктурних елементів – перегородок, облицювання, не несучих стін, стяжок підлог тощо). Перегляд поставок – у разі систематичного перевищення слід розглянути альтернативних постачальників.

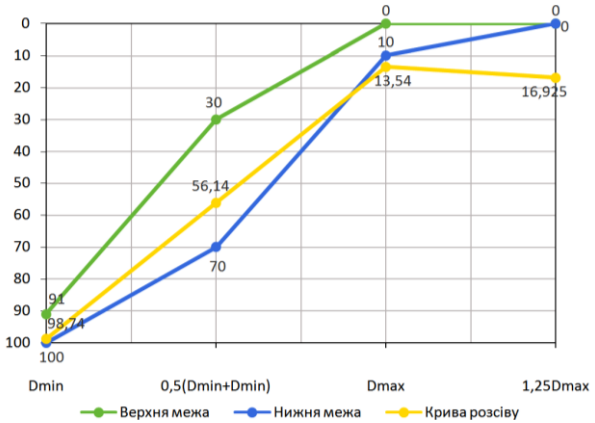

Рис. 12. Гранулометричний аналіз щебеню пісковика с. Пасічна (зразок 5)

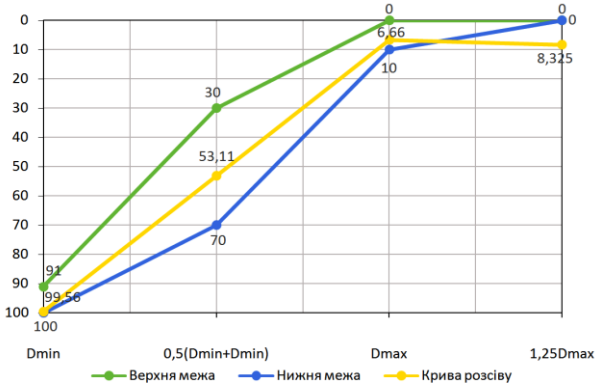

Рис. 12. Гранулометричний аналіз андезитового щебеню с. Рокосово (зразок 6)

Висновки

У ході проведеного дослідження здійснено експериментальне випробування та порівняльний аналіз фізико-механічних характеристик крупних заповнювачів, отриманих із осадових та магматичних гірських порід західного регіону України. Дослідження охопило шість видів заповнювачів, серед яких гранітні, гравійні, пісковикові та андезитові матеріали.

Результати експериментального аналізу засвідчили, що найбільш ефективним заповнювачем є гранітний щебінь, зокрема матеріал, видобутий на Клесівському кар'єрі нерудних копалин "Технобуд" (Рівненська область, Сарненський район, смт. Клесів). Висока якість цього матеріалу зумовлена його оптимальним зерновим складом, низьким вмістом глинистих і пилуватих часток, а також незначною кількістю зерен лещадної та голчастої форми. Сукупність зазначених властивостей дозволяє забезпечити раціональну рецептуру бетонної суміші, що позитивно впливає на технологічність процесу виготовлення бетонних виробів, сприяючи їхній довговічності та економічній ефективності.

Як потенційні альтернативи можуть розглядатися гранітний щебінь із Коростенського гранітного кар'єру (Житомирська область, м. Коростень) та гравійний щебінь, що видобувається компанією "Гравел Груп" (Івано-Франківська область, Надвірнянський район, с. Фитьків). Хоча фізико-механічні властивості цих матеріалів дещо поступаються характеристикам щебеню з Клесівського родовища, їх використання може бути економічно доцільним завдяки нижчій вартості, що є важливим фактором при розробці бетонних сумішей для масового будівництва. Інші досліджені заповнювачі можуть ефективно використовуватися у менш відповідальних конструкціях, зокрема в неструктурних елементах, дорожніх та гідротехнічних покриттях, а також як компонент змішаних заповнювачів.

Отримані результати підкреслюють перспективність використання місцевих сировинних ресурсів як ефективного, економічно виправданого та екологічно безпечного рішення для будівельної галузі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Література

1. Golewski G. L. Effect of Coarse Aggregate Type on the Fracture Toughness of Ordinary Concrete. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9, no. 10. P. 185. https://doi.org/10.3390/infrastructures9100185

2. Tadesse Abegaz G., Khan I., Mosisa Legese A. Investigating the Effects of Coarse Aggregate Physical Properties on Strength of C-25 Concrete. *American Journal of Engineering and Technology Management*. 2020. Vol. 5, no. 5. P. 84. https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20200505.12

3. Natural aggregates used for lightweight concrete – A Review / D. S. Vijayan et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 993. P. 012042. https://doi.org/10.1088/1757-899x/993/1/012042

4. Tanyildizi M., Gökalp İ. Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of the art. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 377. P. 131102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131102

5. Kuna E., Bögöly G. Overview of mechanical degradation of aggregates, related standards, and the empirical relations of the parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2024. Vol. 83, no. 7. https://doi.org/10.1007/s10064-024-03754-2

6. Bardan M., Czarnecki L. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 488. https://doi.org/10.3390/ma18030488

7. Telloli C., Aprile A., Marrocchino E., Petrographic and Physical-Mechanical Investigation of Natural Aggregates for Concrete Mixtures. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 19. P. 5763. https://doi.org/10.3390/ma14195763

8. The Effect of Petrographic Characteristics and Physico-Mechanical Properties of Aggregates on the Quality of Concrete / P. Petrounias et al. *Minerals*. 2018. Vol. 8, no. 12. P. 577. https://doi.org/10.3390/min8120577

9. Deng P., Xu K., Guo S. Effects of coarse aggregate morphology on concrete mechanical properties. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 105408. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105408

10. Meso-scale numerical simulation of the effect of aggregate strength on damage and fracture of high-strength concrete under dynamic tensile loading / X. Zhou et al. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022. P. 103551. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103551

11. Golewski, G. L. Effect of Coarse Aggregate Grading on Mechanical Parameters and Fracture Toughness of Limestone Concrete. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8. P. 117. https://doi.org/10.3390/infrastructures8080117

12. Three-dimensional quantification and classification approach for angularity and surface texture based on surface triangulation of reconstructed aggregates / C. Jin et al. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118120. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118120

13. Ren Q., Pacheco J., de Brito J. Mesoscale modeling of recycled aggregate concrete: A parametric analysis of the quality and shape of aggregate. *Structural Concrete*. 2024. https://doi.org/10.1002/suco.202400743

14. Velychkovych A., Ropyak L., Dubei O. Strength Analysis of a Two-Layer PETF-Concrete Column with Allowance for Contact Interaction between

Layers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–10. https://doi.org/10.1155/2021/4517657

15. Andrusyak A. V., Silchuk D. V., Velychkovych A. S. Assessment of the efficiency of designing the compositions of concrete mixtures using alternative aggregates from the natural resources of the Carpathian region. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2024. No. 21. P. 15–28. https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02

16. Shatskyi I., Kurtash I. Strength of Plate with the Filled Crack under Multiparameter Loading. *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 13. P. 1482–1487. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.305

17. Shats'kyi I.P.; Makoviichuk M.V. Contact interaction of crack lips in shallow shells in bending with tension. *Materials Science*. 2005. Vol. 41. P. 486–494. https://doi.org/10.1007/s11003-006-0006-8

18. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating / M. Dutkiewicz et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 10676. https://doi.org/10.3390/app112210676.

19. Shats'kyi I.P., Makoviichuk M.V. Analysis of the limiting state of cylindrical shells with cracks about the contact of crack lips. *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41. P. 560–565. https://doi.org/10.1007/s11223-009-9166-8

20. The stress-deformation state of an elastic half-space with a spheroidal thermal inclusion / V. S. Kolesov et al. *International Applied Mechanics*. 1992. Vol. 28, no. 7. P. 426–434. https://doi.org/10.1007/bf00847125

21. Shats'kyi I.P., Kundrat A.M. Longitudinal shear of a body with mutually immobile rigid collinear inclusions. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, no. 3. P. 376–382. https://doi.org/10.1007/s11003-005-0043-8

22. Golewski, G. L. The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 765. https://doi.org/10.3390/buildings13030765

23. Martynovych N., Boichenko E., Dielini M. Rebuilding of Ukraine After War: Special Restoration Regimes and Stimulation of Sustainable Development of Territories. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2023. Vol. 11, no. 4. P. 54–70. https://doi.org/10.14246/irspsd.11.4_54

24. Maya M., Parra J. L., Calvo B. Exploration of Natural Aggregates for a Sustainable Construction Industry in Western Colombia. *Minerals*. 2023. Vol. 13, no. 11. P. 1430. https://doi.org/10.3390/min13111430

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.02.2025	Received 19.02.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 27.04.2025	Received in revised form 27.04.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A. S. Velychkovych
Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2685-8753
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak*
Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2099-9045
Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

D. V. Silchuk
student of group B-21-2, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0476-4361
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

* corresponding author, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Evaluation of the properties of coarse aggregates produced by the crushing of rocks in the western region of Ukraine for the production of concrete mixtures

How to Cite:
Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Silchuk D. V., (2025). Numerical modeling of load-bearing corrugated board using an equivalent orthotropic plate. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 89-104. https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09

Abstract. The article investigates the physical and mechanical properties of coarse aggregates obtained by crushing sedimentary and igneous rocks, which are widely used in the construction industry in the western region of Ukraine. Key parameters such as density, porosity, compressive and split strength, grain size distribution, clay and dusty particles, and grain shape, which have a critical impact on the quality of concrete mixtures, were evaluated. The study examined five types of aggregates of different mineralogical origin, including granite, gravel, sandstone, and andesite materials. It turned out that their physical and mechanical properties depend not only on the mineralogical composition, but also on the conditions of formation, mining methods, and technological processing. A comparative analysis showed that granite crushed stone generally demonstrates better physical and mechanical characteristics, including high strength, low content of harmful impurities, and optimal grain size distribution, which ensures an even distribution of stresses in concrete and contributes to the durability of structures. At the same time, other types of aggregates can be competitive due to their economic feasibility and availability, making them an effective alternative for different classes of concrete depending on project requirements. The study also takes into account the environmental aspects of using local raw materials, which helps to reduce the carbon footprint of construction by reducing logistics costs and rationalizing the use of natural resources. In addition, the possibilities of increasing the efficiency of aggregates by modifying them, in particular the use of surface treatments to improve adhesion to cement stone, are considered. The results presented are of practical importance for optimizing the composition of concrete mixtures, developing regulatory requirements for the quality of aggregates, and improving the manufacturability of concrete structures. The findings can be used by design organizations, concrete product manufacturers, and construction companies to improve production efficiency, ensure the durability of construction projects, and reduce the environmental impact of the construction industry.

Keywords: aggregate, crushed stone, gravel, building material, granite, concrete