

УДК 691.3

[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ НА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ З ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ ПРИКАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF DESIGNING THE COMPOSITIONS OF CONCRETE MIXTURES USING ALTERNATIVE AGGREGATES FROM THE NATURAL RESOURCES OF THE CARPATHIAN REGION

Андрусяк А. В., к.т.н., доцент, Сільчук Д. В., студент, Велічкович А. С., к.т.н., доцент (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)

Andrusyak A. V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Silchuk D. V., student, Velychkovych A. S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas)

Запроектовано склади бетонних сумішей з використанням альтернативних заповнювачів, отриманих із природних ресурсів Прикарпаття. Основним завданням було отримання сумішей з рухливістю S4 для виготовлення бетонного каменю класу міцності C32/40. Задля забезпечення потрібних фізико-механічних характеристик бетону до складу сумішей вводили оптимальну дозу добавки на основі карбоксиловмісних полімерів. Для кожного типу заповнювача підгодували серію бетонних сумішей з різним дозуванням карбоксиловмісного модифікатора. Визначали рухливість сумішей та оцінювали міцність затверділих зразків. Отримані результати підтвердили можливість виготовлення високоміцних класів бетону на альтернативних заповнювачах із природних ресурсів Прикарпатського регіону.

Today, the Precarpathian region has significant reserves of natural materials that can be used as alternative aggregates for concrete. These include a variety of rocks (limestone, sandstone, shale), gravel and sand deposits from rivers, etc. The obvious advantages of using local natural resources are cost savings on aggregate transportation and the possibility of developing new deposits, which will contribute to the development of local industry. In the study, four concrete mixtures were designed. The compositions for two mixtures were designed using traditional coarse aggregate (granite crushed stone) for the production of high-strength concrete. Two more mixtures were designed using alternative aggregates obtained from the natural resources of the Precarpathian region (crushed stone from dense sedimentary rocks). The main objective of the study was to obtain concrete mixtures with mobility S4 for the manufacture of concrete stone of strength class C32/40. The absolute volume method was used to develop the mixture formulation, with the calculations for each mixture being refined by performing trial batches. To ensure

the required physical and mechanical characteristics of concrete, the mixtures were supplemented with an optimal dose of a complex modifier based on carboxyl-containing polymers. The physical and mechanical characteristics of different types of aggregates were carefully determined and the influence of these characteristics on the behavior of the concrete mix and the properties of the hardened concrete was evaluated. For each type of aggregate, a series of concrete mixtures were prepared with different dosages of carboxyl-containing modifiers. Using the methods of current regulatory documents, the mobility of the manufactured mixtures and the strength of the hardened samples were determined. The analysis of the experimental results confirmed the possibility of manufacturing high-strength concrete classes based on alternative aggregates from the natural resources of the Precarpathian region using a complex additive based on polycarboxylates.

Ключові слова: бетонні суміші, карбоксилвмісні полімери, альтернативні заповнювачі, міцність бетону.

Keywords: concrete mixtures, carboxyl-containing polymers, alternative aggregates, concrete strength.

Вступ. Ключовими параметрами, які суттєво впливають на міцність та інші експлуатаційні характеристики затверділого бетону, є тип та властивості грубого заповнювача, кількість і тип цементу, водоцементне відношення, модифікуючі добавки, умови твердіння тощо [1, 2].

Використання міцних заповнювачів, особливо тих, які мають високу адгезію до цементного каменю, підвищує міцність бетону на стиск, розтяг і згин. Жорсткі та щільні заповнювачі знижують деформативність бетону під навантаженням, натомість пористі заповнювачі, навпаки, можуть збільшувати усадку та ефекти повзучості бетону [3]. Стійкість заповнювачів до агресивних чинників (кислот, сульфатів, морозу) позитивно впливає на довговічність бетону, натомість наявність реакційноздатних мінералів у заповнювачах може спричиняти небажані ефекти, наприклад, зниження рН-середовища в бетоні, сульфатну корозію, лужно-кремнієві та лужно-карбонатні реакції тощо [4, 5]. Теплопровідність і коефіцієнт теплового розширення заповнювачів впливають на температурні деформації бетону, а їх форма, текстура та гранулометрія – на водопотребу, в'язкість і здатність до укладання бетонної суміші [6, 7]. Таким чином, тип та характеристики заповнювача є одним з визначальних факторів, що забезпечує необхідні експлуатаційні властивості бетону, і цей фактор має бути обов'язково врахованим при розробці складу бетонної суміші.

Реалізація концепції високоякісного бетону (тип бетону з низьким співвідношенням води до цементу) стала можливою завдяки введенню в склад суміші пластифікаторів і вторинних в'язучих. Детальний огляд останніх розробок і досліджень, що стосуються модифікуючих добавок, які використовуються в композитах на основі бетону, подано в працях [8–10]. Зміцнення бетону шляхом введення в цементну матрицю добавок на

полімерній основі вивчалось у працях [11, 12]. Зокрема, увагу авторів дослідження привернули властивості карбоксилітовмісних полімерів. Ці полімери діють як пластифікатори, знижуючи в'язкість бетонної суміші та покращуючи її рухливість і здатність до перекачування [13–15]. Рациональне дозування такої добавки дозволяє зменшити кількість води у складі суміші та підвищити міцність бетону. Карбоксилітовмісні полімери сприяють формуванню щільнішої структури бетону, зменшуючи кількість капілярних пор, разом з цим вони підвищують стійкість бетону до впливу агресивних середовищ, таких як кислоти, сульфати, хлориди тощо. Це забезпечує підвищення довговічності бетонних конструкцій. Завдяки впливу на структурування, карбоксилітовмісні полімери зменшують усадку бетону під час твердіння та знижують ризик виникнення тріщин.

Ефективне проектування компонентного складу бетонних сумішей є важливим елементом сучасної будівельної галузі. Особливої актуальності ця проблематика набуває в умовах Прикарпатського регіону, де доступ до альтернативних заповнювачів з природних ресурсів визначає конкурентоспроможність виробників за умови забезпечення належної якості кінцевої продукції. Власне на території Прикарпаття вельми перспективним є виготовлення бетону високої міцності, з використанням альтернативних заповнювачів із місцевих природних ресурсів. Задля забезпечення потрібних фізико-механічних характеристик бетону до складу сумішей доцільно вводити оптимальну дозу полімерного модифікатора на основі карбоксилітовмісних полімерів. Оцінка ефективності цього процесу стає актуальною задачею, що вимагає комплексного підходу та врахування різноманітних аспектів, таких як технологічність, економічність, екологічність та якість кінцевого продукту.

Метою цього дослідження є вивчення переваг та недоліків використання альтернативних заповнювачів у бетонних сумішах, а також вплив полімерних модифікаторів на властивості цих сумішей, зокрема, на легкоукладальність, збереження пластичності за різних термобаричних умов та часових діапазонів, міцність і довговічність бетонного каменю. Використання результатів дослідження сприятиме розвитку будівельної галузі Прикарпаття, забезпечуючи рациональне використання природних ресурсів, зростання якості споруд і зменшення шкідливого сліду виробництва.

Методи та матеріали. Сьогодні у Прикарпатському регіоні наявні значні запаси природних матеріалів, які можуть бути використані як альтернативні заповнювачі для бетонів. Це, зокрема, різноманітні скельні породи (вапняки, пісковики, сланці), річкові гравійно-піщані відклади тощо. Очевидними перевагами використання місцевих природних ресурсів є економія коштів на транспортуванні заповнювачів, можливість

розроблення нових родовищ, що сприятиме розвитку місцевої промисловості.

Основним завданням статті є підтвердження можливості виготовлення високоміцних класів бетону на альтернативних заповнювачах із природних ресурсів Прикарпаття. Для проведення досліджень було запропоновано запроектувати чотири склади сумішей з рухливістю S4 для виготовлення бетонного каменю класу міцності C32/40. Склади та нумерацію пропонованих бетонних сумішей подано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Склади та нумерація бетонних сумішей

№	В'язуче (портландцемент), кг	Дрібний заповнювач (кварцовий пісок), кг	Крупний заповнювач (щебінь), кг	Вода, кг	Істинне водоцементне відношення, В/Ц	Добавка Plastidor 553, доза, (витрата)
1	СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R 510	520	Гранітний 1140	250	0.49	–
2	СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R 400	710	Гранітний 1140	180	0.45	0.9%, (3.6 кг)
3	СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R 510	580	Пісковик 1050	260	0.51	–
4	СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R 430	740	Пісковик 1050	190	0.44	1.2%, (5.16 кг)

Для отримання високоміцного бетону з-поміж традиційних крупних компонентів заповнювачів було вибрано щебінь із грубокристалічних магматичних порід генезису «інтрузивні» гірська порода «граніт» виробництва ТОВ «КОЩІВСЬКИЙ ГРАНІТНИЙ КАР'ЄР», що розміщене у селі Кошівка Фастівського району Київської області.

Як альтернативу було обрано щебінь природних ресурсів Прикарпатського регіону, а саме щебінь зі щільних осадових порід генезису «інтрузивні» гірська порода «пісковик» ТДВ «НАДВІРНЯНСЬКИЙ КАР'ЄР КАРПАТИ», розташований у селі Пасічна Надвірнянського району Івано-Франківської області.

У ролі дрібного заповнювача вибрано кварцовий пісок виробництва «КЛІЩІВНА-ПІСОК» філії ТЗОВ «КОМПАНІЯ ХІМПРОМ» (Івано-Франківська обл., Рогатинський р-н., с.Кліщівна).

Як мінеральний в'язучий матеріал під час досліджень використовувався портландцемент ПЦ II/A-B-500P-N (CEM II/A-LL 42,5 R) виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Такий цемент використовується для виготовлення бетонів класу C25/30 і вище для всіх видів будівельних робіт. Характерними особливостями цієї марки цементу є підвищена стійкість до хімічної корозії та низьке тепловиділення під час монолітного бетонування. Завдяки вмісту специфічної пуцоланової добавки цей матеріал відрізняється від аналогів меншим водовідділенням без застосування хімічних добавок.

Для проектування сумішей №2 та №4 (див. табл. 1) використовували модифікуючу добавку – полімерний модифікатор на основі карбоксилосмісних полімерів Plastidor 553 виробництва ТОВ «Доронік-Україна» (Україна). Виробник постачає добавку у вигляді світло-коричневої рідини з густиною 1.09 т/м³ та з 30% концентрацією діючої речовини. При виготовленні бетону рекомендовано вводити цю добавку одночасно з водою затворення, при цьому слід вкладатись в діапазон дозування 0.8-1.5% від маси цементу. Рекомендується для виготовлення товарного бетону, збірних виробів і конструкцій із важкого та дрібнозернистого бетону класів C8/10 і вище, виготовлення самоущільнючих бетонних сумішей SF2, SF3, зведення конструкцій монолітних споруд із підвищеним ступенем армування та складною конфігурацією тощо.

Для одержання високоміцних класів бетонів одним із ключових факторів для забезпечення щільності упаковки зерен є належний гранулометричний склад компонентів. Для отримання кривих гранулометричних складів (рис. 1 – рис. 3) досліджували описані вище поліфракційні заповнювачі (щебінь гранітний фракції 5–20 мм, щебінь гірської породи (пісковик) фракції 5–20 мм, пісок фракції 0.125–2.0 мм). Важливо оцінити, в якій області перебуває гранулометрична крива заповнювачів. Зерновий склад заповнювачів визначали методом сухого просіювання крізь стандартний набір сит (відповідно до EN 933-1:2012, IDT).

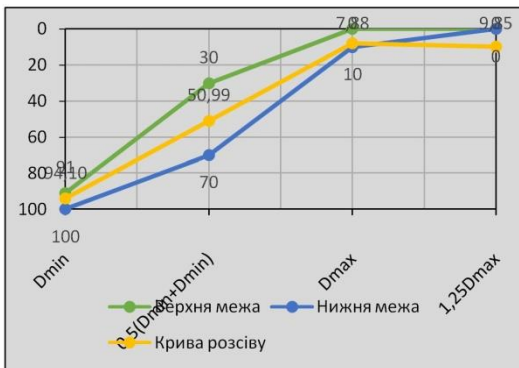


Рисунок 1 – Гранулометричний склад гранітного щебеню

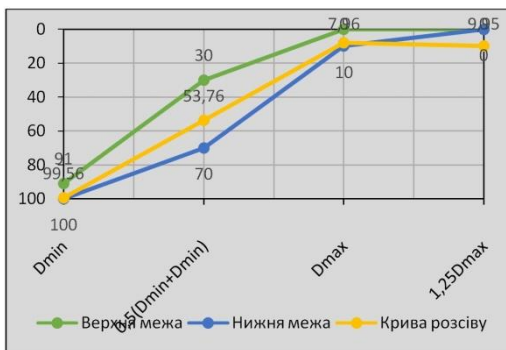


Рисунок 2 – Гранулометричний склад щебеню гірської породи (пісковик)

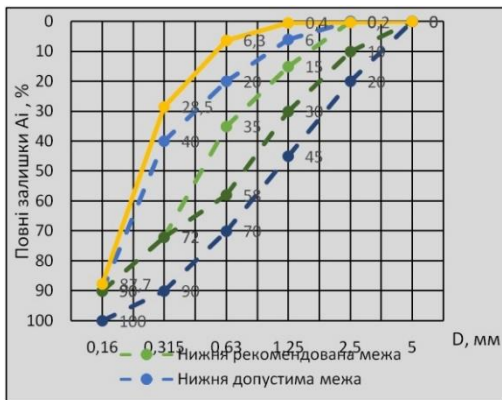


Рисунок 3 – Гранулометричний склад піску («КЛІЩІВНА-ПІСОК»)

Аналіз отриманих залежностей (рис. 1 – рис. 3) вказує на те, що гранулометричні криві заповнювачів знаходяться в областях допустимих складів, які гарантують належну консистенцію та легковкладальність бетонної суміші за мінімальної кількості води, цементу та вмісту повітря. Значення інших фізичних властивостей заповнювачів, а також нормативні документи, згідно з якими вони визначалися, подано в таблиці 2.

Таблиця 2 – Фізичні властивості заповнювачів

Назва показника, що визначається	Од. виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
Гранітний щебінь ТОВ “КОЩІВСЬКИЙ ГРАНІТНИЙ КАР’ЄР”				
Насипна густина	кг/м ³	–	1452	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	20-9	10,6 (1400)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3
Пісковик щебінь ТДВ “НАДВІРНЯНСЬКИЙ КАР’ЄР КАРПАТИ”				
Насипна густина	кг/м ³	1100	1441	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11
Модуль крупності	Мк	від 0,5 до 2,75	1,231	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	3,8	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12
Кварцовий пісок “КЛІЩІВНА-ПІСОК”				
Насипна густина	кг/м ³	1100	1441	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11
Модуль крупності	Мк	0,5–2,75	1,231	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	3,8	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12

Проектування складу сумішей проводилося з урахуванням фізико-механічних характеристик дрібного та крупного заповнювачів, особливостей поведінки мінерального в’язучого матеріалу і властивостей полімерного модифікатора на основі карбоксилівмісних полімерів.

Кількісний компонентний склад бетону розраховувався на 1 м^3 ущільненої бетонної суміші. Проектований склад бетону представили у вигляді 1:Х:У, де кількість в'язучого матеріалу прийнята за одиницю, а компоненти заповнювача (пісок та щебінь) за Х та У, при цьому у кожному випадку задавались водоцементним відношенням (В/Ц). Для обчислення невідомих Х та У витрати кожного матеріалу на 1 м^3 бетонної суміші ділили на витрати цементу у масових долях.

Слід зазначити, що на міцність затверділого бетону та рухливість бетонної суміші впливає низка факторів, які не можуть бути враховані аналітично. Тому остаточний склад бетону визначався розрахунково-експериментальним шляхом. Використовували метод абсолютних об'ємів з уточненням розрахунків по кожній суміші з допомогою виконання пробних замісів [16].

У результаті було запроєктовано та заформовано чотири склади бетонних сумішей (табл. 1). Суміш № 1: крупний заповнювач – щебінь з грубокристалічних магматичних порід генезису «інтрузивні» гірська порода «граніт»; дрібний заповнювач – кварцовий пісок; мінеральне в'язуче – портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R; вода кімнатної температури. Суміш № 2: крупний заповнювач – щебінь з грубокристалічних магматичних порід генезису «інтрузивні» гірська порода «граніт»; дрібний заповнювач – кварцовий пісок; мінеральне в'язуче – портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R; вода кімнатної температури, полімерний модифікатор на основі карбоксилівмісних полімерів Plastidor 553 виробництва ТОВ «Доронік-Україна» (Україна). Суміш № 3: крупний заповнювач – щебінь з щільних осадових порід генезису «інтрузивні» гірська порода «пісковик», дрібний заповнювач – кварцовий пісок; мінеральне в'язуче – портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R; вода кімнатної температури. Суміш № 4: крупний заповнювач – щебінь з щільних осадових порід генезису «інтрузивні» гірська порода «пісковик»; дрібний заповнювач – кварцовий пісок; мінеральне в'язуче – портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R; вода кімнатної температури; полімерний модифікатор на основі карбоксилівмісних полімерів Plastidor 553 виробництва ТОВ «Доронік-Україна» (Україна).

Результати. Рухливість бетонної суміші визначається її компонентним і кількісним складом, дисперсністю крупного та мілкого заповнювачів, відношенням об'єму матриці до твердих частинок. Будь-які сторонні вclusions (бруд, пил, глина, тонка фракція заповнювача тощо) можуть змінювати рухливість по-різному. Результати визначення рухливості бетонних сумішей при температурі $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ згідно чинних нормативних документів представлено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Визначення рухливості бетонних сумішей
(за ДСТУ Б В.2.7-114-2002)

№	Осадка конуса початкова	Розплив конуса	Осадка конуса через 60 хв.	Розплив конуса	Осадка конуса через 120хв.	Розплив конуса
1	23см	42см	22см	39см	19см	32см
2	23.5см	40см	23см	41см	21см	37см
3	23см	40см	20см	37см	17см	26см
4	23.5см	45см	23см	40см	22см	38см

Формування та випробовування контрольних зразків на міцність відбувалось згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Спосіб і режим тверднення зразків бетону, призначених для контролю міцності, прийнятий згідно з ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Для оцінки міцності бетонних зразків визначали мінімальну стискаючу силу, що спричиняла руйнування (рис. 4). Розділивши визначену силу на площу перерізу зразка, отримували значення руйнуючого нормального напруження.



Рисунок 4 – Загальний вигляд контрольних зразків-кубів до, під час та після випробування

Результати випробувань контрольних зразків на стиск представлено в табл. 4 і 5 та проілюстровано на рис. 5 - 8. Як основні показники міцності контрольних зразків-кубів розглядали характеристики міцності, отримані при випробуваннях на четверту, сьому, двадцять восьму та п'ятдесят шосту добу.

Аналіз отриманих результатів показує, що бетонні куби із сумішей №1 і №3, в рецептурі яких відсутня модифікуюча добавка, поступаються як в ранній міцності, так і в остаточно набраній міцності зразкам із сумішей, у складі яких є добавка Plastidor 553. Бетонний камінь із суміші №1, яка виготовлена на базі крупного заповнювача – гранітного щебеню трохи переважає за міцністю бетон із суміші №3, яка виготовлена на альтернативному крупному заповнювачі. В усіх сумішах швидкість набору міцності є високою до 28 дня твердіння, після цього терміну швидкість твердіння суттєво знижується.

Порівнюючи ранню міцність бетонів із сумішей №2 та №4 і швидкість набору їх міцності до 56-тої доби твердіння, можна зробити висновок, що полімерний модифікатор на основі карбоксилівмісних полімерів виявився ефективнішим для компонентного складу суміші №4.

Отже, у разі виготовлення сумішей без застосування модифікуючої добавки бетонний камінь на альтернативному заповнювачі трохи поступається за міцністю бетону на традиційному заповнювачі. Однак застосування добавки Plastidor 553 дозволяє отримати високоміцний бетон на альтернативних заповнювачах Прикарпаття. Зокрема, міцність кубів із суміші №4 уже на 28 добу твердіння переважає нормативну середню міцність бетону класу С32/40.

Таблиця 4 – Результати випробувань контрольних зразків на 4 і 7 добу

№	4 доба			7 доба		
	Маса, кг	Руйнівне навантаження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності	Маса, кг	Руйнівне навантаження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності
1	2358/2354	22,76/22,68	22,72 / 44,21	2366/2354	28,77/28,18	28,47/55,39
2	2404/2410	31,23/30,84	31,03 / 60,38	2369/2374	36,49/36,39	36,44/70,90
3	2315/2317	19,12/19,53	19,32 / 37,59	2271/2276	27,25/26,83	27,04/52,61
4	2390/2388	34,69/34,14	34,41 / 66,95	2340/2349	44,11/41,25	42,68/82,56

Таблиця 5 – Результати випробувань контрольних зразків на двадцять восьму та п'ятдесят шосту добу

№	28 доба			56 доба		
	Маса, кг	Руйнівне навантаження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності	Маса, кг	Руйнівне навантаження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності
1	2335/2340	39,21/38,62	38,91/75,71	2345/2343	41,53/40,04	40,78/79,35
2	2382/2386	51,69/51,55	51,62/100,44	2385/2380	56,43/56,39	56,41/109,76
3	2304/2277	39,08/40,66	39,87/77,58	2310/2303	41,34/41,16	41,25/80,26
4	2339/2361	55,99/53,86	54,92/106,86	2352/2365	58,11/57,98	58,04/112,94

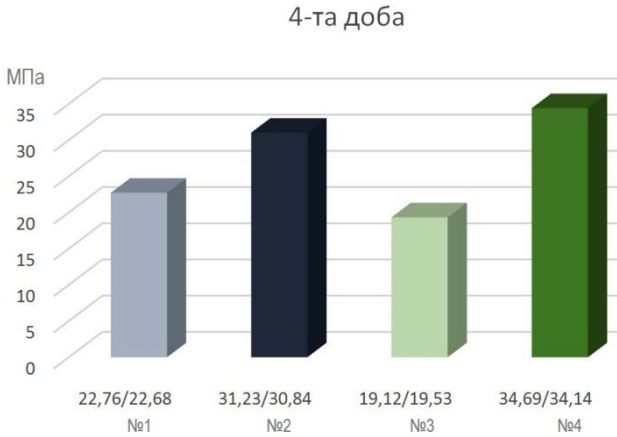


Рисунок 5 – Оцінка міцності бетонних зразків (4-та доба тверднення)

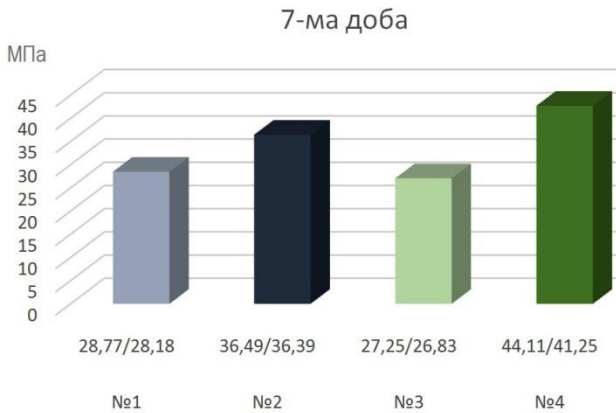


Рисунок 6 – Оцінка міцності бетонних зразків (7-ма доба тверднення)

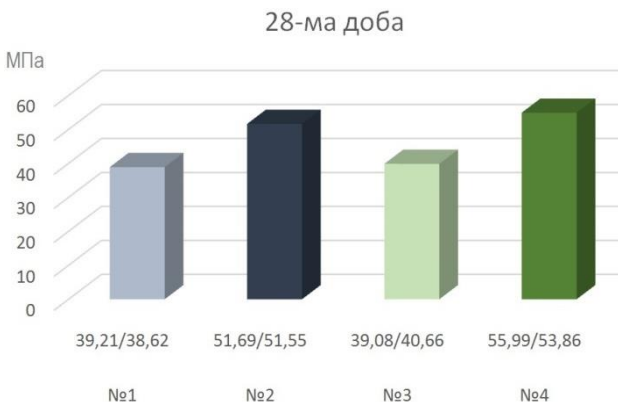


Рисунок 7 – Оцінка міцності бетонних зразків (28-ма доба тверднення)

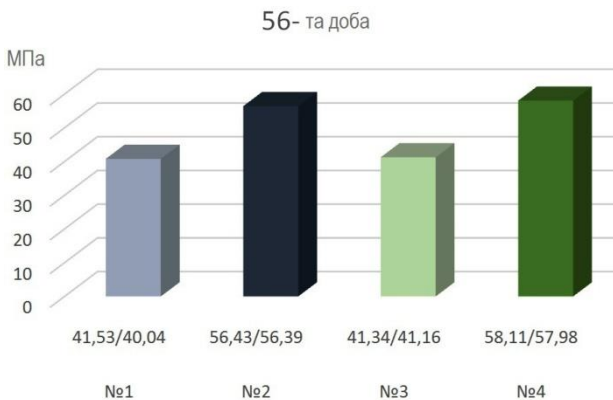


Рисунок 8 – Оцінка міцності бетонних зразків (56-та доба тверднення)

Висновки. Проведені дослідження свідчать про високий потенціал використання альтернативних заповнювачів у проектуванні складу бетонних сумішей, що експериментально було доведено в рамках представлених випробувань. Результати експерименту демонструють можливість виготовлення високоміцних класів бетону з використанням заповнювачів із природних ресурсів Прикарпатського регіону та введенням у склад сумішей

полімерних модифікаторів на основі карбоксилонмісних полімерів. Застосування полімерних модифікаторів дозволяє підвищити характеристики міцності бетонного каменю та покращити фізико-механічні властивості бетонної суміші. Застосування пропонованого підходу має потенціал для покращення якості бетонних конструкцій та зниження витрат на будівництво, зокрема, за рахунок використання місцевих ресурсів. Отримані результати мотивують до подальших досліджень і розвитку започаткованої тематики та можуть бути використані при розробці нових технологій у будівельній галузі.

References

1. Teymen A. Statistical investigation of the effects of different origin aggregate properties on the mechanical properties of concrete. *Revista de la construcción*. 2023. Vol. 22, no. 2. <https://doi.org/10.7764/rdlc.22.2.482>
2. Tugrul Tunc E., Alyamac K. E. Determination of the relationship between the Los Angeles abrasion values of aggregates and concrete strength using the Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. P. 119850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119850>
3. Influence of Coarse Aggregate Type on the Mechanical Strengths and Durability of Cement Concrete / L. Wang et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 9. P. 1036. <https://doi.org/10.3390/coatings11091036>
4. Yehia S., Abdelfatah A., Mansour D. Effect of Aggregate Type and Specimen Configuration on Concrete Compressive Strength. *Crystals*. 2020. Vol. 10, no. 7. P. 625. <https://doi.org/10.3390/cryst10070625>
5. Mechanical properties of graphene oxide modified ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate / K. Mao et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 108754. doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108754
6. Vishalakshi K. P., Revathi V., Sivamurthy Reddy S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. Vol. 194. P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.029>
7. Lee T., Jeong K., Choi H. Effect of Thermal Properties of Aggregates on the Mechanical Properties of High Strength Concrete under Loading and High Temperature Conditions. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 6093. <https://doi.org/10.3390/ma14206093>
8. Kujawa W., Olewnik-Kruszkowska E., Nowaczyk J. Concrete Strengthening by Introducing Polymer-Based Additives into the Cement Matrix – A Mini Review. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 6071. <https://doi.org/10.3390/ma14206071>

9. Jabal Q. A., Al-Dikheeli M. R. The Effect of Integral Waterproof Admixture on some Mechanical Properties of Concrete, Absorption and Sulfate Attack Using Different Mix Proportions. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 895. P. 88–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.895.88>
10. Enhancing the mechanical behavior of concretes through polymer modification of the aggregate-cement paste interface / Y. Liu et al. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 104605. doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104605
11. Tripathi B. Effects of Polymers on Cement Hydration and Properties of Concrete: A Review. *ACS Omega*. 2024, Vol. 9. P. 2014–2021. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05914>
12. Effect of Polymer Additives on the Microstructure and Mechanical Properties of Self-Leveling Rubberised Concrete / W. Kujawa et al. *Materials*. 2021. Vol. 15, no. 1. P. 249. <https://doi.org/10.3390/ma15010249>
13. A review on the modification mechanism of polymer on cement-based materials / L. Fan et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.291>
14. Effectiveness of the Use of Polymers in High-Performance Concrete Containing Silica Fume / A. Harichane et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 18. P. 3730. <https://doi.org/10.3390/polym15183730>
15. Modeling the Impact of Liquid Polymers on Concrete Stability in Terms of a Slump and Compressive Strength / A. S. Mohammed et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 1208. <https://doi.org/10.3390/app13021208>
16. Use of operational research techniques for concrete mix design: A systematic review / A. C. Rosa et al. *Heliyon*. 2023. P. e15362. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15362>