

РОЗРОБКА РЕЦЕПТУРИ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ НА ЗАПОВНЮВАЧАХ З РІЗНИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЗАТВЕРДІЛОГО БЕТОНУ ОДНАКОВОГО КЛАСУ МІЦНОСТІ

DEVELOPMENT OF CONCRETE MIXTURES BASED ON AGGREGATES FROM DIFFERENT REGIONS OF UKRAINE TO PRODUCE HARDENED CONCRETE OF THE SAME STRENGTH CLASS

Андрусяк А. В., к. т. н., доц., ORCID ID: 0000-0003-2099-9045; Сільчук Д. В., студент, ORCID ID: 0009-0001-0476-4361; Величкович А. С., к. т. н., доц., ORCID ID: 0000-0003-2685-8753, (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)

Andrusyak A. V., Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID ID: 0000-0003-2099-9045; Silchuk D. V., student, ORCID ID: 0009-0001-0476-4361; Velychkovych A. S., Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof. ORCID ID: 0000-0003-2685-8753, (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas)

Представлено результати проєктування бетонних сумішей із заповнювачами з чотирьох регіонів України та використанням карбоксиловмісних полімерів як модифікаторів. Дослідження спрямоване на забезпечення однакової рухливості S₄ запроєктованих сумішей і єдиного класу міцності C32/40 затверділого бетону з урахуванням особливостей місцевих заповнювачів. Експериментально підібрано оптимальні дози модифікатора для кожного складу та встановлено, що необхідна кількість добавки суттєво залежить від властивостей регіональних компонентів. Отримані результати підтверджують важливість адаптивного підходу до проєктування бетонних сумішей.

The use of regional aggregates reduces logistics costs and increases the profitability of construction work, but requires an individual approach to the design of concrete mixtures. The article presents the results of designing the composition of concrete mixtures using aggregates from four different regions of Ukraine using carboxyl-containing polymers as modifiers. The main purpose of the study was to ensure the same mobility of mixtures and strength class of hardened concrete stone, taking into account the characteristics of regional ingredients, namely local fine aggregate. The coarse aggregate chosen as a constant was crushed stone from igneous and sedimentary rocks, fraction 5-20, and binder (Portland cement) CEM II/A-LL 42.5 R. The experimental

part involved the selection of the recipe, in particular the optimal dose of the modifying additive for each composition of the concrete mix. In general, the composition of concrete mixtures was determined by the calculation and experimental method with the preliminary application of the absolute volume method and further refinement of the recipe based on trial batches, which made it possible to optimize the content of components taking into account the actual properties of materials and ensure compliance with design requirements. The main physical and mechanical characteristics of concrete mixtures were determined, including fresh mobility and hardened concrete strength. Tests have shown that all developed concrete mixtures compositions correspond to mobility class S4, and hardened concrete corresponds to strength class C32/40 with a certain margin, which confirms the effectiveness of the proposed design approach. It was found that the optimal dosage of the carboxyl-containing modifier required to achieve this goal significantly depends on the properties of the regional components of the mixture. The results confirm the need for an individual approach to designing the composition of concrete mixtures, even with the same requirements for their performance.

Ключові слова: заповнювач, бетонна суміш, міцність, цемент, модифікуюча добавка, карбоксиловмісні полімери;
aggregate, concrete mixture, strength, cement, carboxyl-containing polymers, modifying additive.

Вступ. Будівельна галузь є однією з ключових сфер економіки країн, яка активно використовує природні ресурси. Зростання обсягів будівництва в Україні стимулює пошук ефективних рішень для використання місцевої сировини під час спорудження бетонних конструкцій [1, 2]. Зокрема, застосування заповнювачів, видобутих у межах свого регіону, дозволяє суттєво знизити логістичні витрати та підвищити рентабельність будівництва, але водночас вимагає індивідуального підходу до проектування бетонних сумішей [3–5].

Заповнювачі, які отримано з різних кар'єрів в Україні можуть суттєво відрізнятися за своїми фізико-механічними властивостями, такими як щільність, форма зерен, гранулометричний склад, міцність і водопоглинання тощо. Ці відмінності впливають на поведінку бетонних сумішей в процесі приготування, використання та твердіння, а також спричиняють значний розкид властивостей затверділого бетону [6, 7]. Водночас для забезпечення якості та довговічності будівель кінцевий продукт повинен відповідати єдиним стандартам за рухливістю бетонної суміші та міцністю затверділого бетону.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні існує низка технологічних підходів для оптимізації складу бетонних сумішей, з-поміж яких

використання модифікуючих добавок відіграє ключову роль. На ринку доступний широкий спектр добавок від різних виробників, включаючи суперпластифікатори, прискорювачі твердіння, повітровтягувальні та водоредукуючі добавки [8, 9]. Хоча виробники надають загальні рекомендації щодо дозування таких добавок, результатом використання типової рецептури часто є суттєвий розкид характеристик бетону залежно від властивостей конкретних компонентів суміші. Це створює потребу у проведенні експериментального підбору оптимальних дозувань для конкретних матеріалів і експлуатаційних вимог до кінцевого продукту.

Огляд сучасних досягнень і досліджень, присвячених модифікуючим добавкам для бетонних композитів, представлений у роботах [10, 11]. Використання полімерних добавок для вдосконалення цементної матриці бетону активно досліджувалось, зокрема у працях [12, 13]. Особливу увагу привернули карбоксилівмісні полімери, які виконують роль пластифікаторів, зменшуючи в'язкість бетонної суміші та покращуючи її текучість і перекачувальність [14, 15]. Рациональне введення таких добавок дозволяє знизити водоцементне відношення, що підвищує кінцеву міцність бетону. Окрім цього, ці полімери сприяють формуванню щільної мікроструктури, знижуючи кількість капілярних пор, що позитивно впливає на довговічність бетону та його стійкість до дії агресивних середовищ. Полімерні добавки для бетонних сумішей здатні покращити ефективність ін'єкційних технологій щодо заліковування тріщиноподібних дефектів [16], що вимагає розвитку теорії оцінки граничних станів конструкцій із тріщинами [17–19] та включеннями [20–22].

Карбоксилівмісні полімери, які належать до класу суперпластифікаторів, стали нашим вибором для даного дослідження завдяки їх універсальності та ефективності у забезпеченні потрібної рухливості бетонної суміші при мінімальному водоцементному співвідношенні. Ці добавки дозволяють отримати бетон з високими показниками міцності, зберігаючи його однорідність навіть за значних відмінностей у властивостях заповнювачів [23, 24]. Додатково, використання карбоксилівмісних полімерів сприяє зменшенню утворення тріщин у процесі твердіння завдяки оптимізації реологічних властивостей суміші.

Постановка мети і задач дослідження. Мета нашого дослідження полягає у створенні ефективної рецептури бетонних сумішей на заповнювачах, які видобуто в чотирьох різних регіонах України. Основним завданням є те, що запропонована рецептура повинна забезпечувати однакову рухливість S4 бетонних сумішей у свіжому стані та єдиний клас міцності C32/40 затверділого бетону незалежно від особливостей місцевих заповнювачів. Ми прагнемо продемонструвати, що завдяки правильному вибору модифікуючих добавок та адаптації технології виготовлення можна досягти високої якості бетонних конструкцій, зберігаючи економічну ефективність та екологічну раціональність будівельних процесів.

Методи і матеріали. У дослідженні застосовано методологію проектування складу бетонної суміші, орієнтовану на досягнення заданих експлуатаційних характеристик кінцевого продукту. Такий підхід базується на ітераційній експериментальній стратегії, за якої остаточні параметри бетонної суміші визначаються не за фіксованими розрахунковими співвідношеннями, а шляхом лабораторних випробувань пробних замісів. Це дозволяє поступово уточнювати базові пропорції складових, доки не буде досягнуто необхідних характеристик суміші. Методика виявилась ефективною у випадках, коли для проектування суміші використовуються місцеві матеріали, зокрема заповнювачі з регіональних кар'єрів. Використання такої адаптивної методики, орієнтованої на кінцеві характеристики бетону, дозволяє скоригувати склад суміші відповідно до специфічних властивостей доступної сировини, що забезпечує стабільність характеристик кінцевого матеріалу незалежно від походження заповнювачів.

Основним завданням нашого дослідження є проектування складу бетонних сумішей на основі заповнювачів із різних регіонів України, що дозволяє забезпечити однакову рухливість суміші та єдиний клас міцності затверділого бетонного каменю. У рамках дослідження було запроєктовано чотири склади бетонних сумішей з рухливістю S4 для отримання бетону класу C32/40. При цьому використовувалися чотири різні види дрібного заповнювача, кожен із яких походив з окремого географічного регіону країни. Через складність процесів гідратації цементу та взаємодії між компонентами, повноцінний аналітичний розрахунок складу бетонної суміші не завжди дає точні результати. Тому остаточний склад визначався розрахунково-експериментальним шляхом. Процес проектування здійснювався за методом абсолютних об'ємів, що є загальноприйнятим підходом у технології бетону. Остаточні розрахунки уточнювалися на основі пробних замісів, що дозволило врахувати реальні властивості матеріалів та скоригувати вміст компонентів для досягнення заданих характеристик. Остаточні встановлені склади бетонних сумішей та їх нумерацію наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Склади та нумерація бетонних сумішей

№	Регіон	В'язуче (портландцемент) , кг	Дрібний заповнювач, кг	Крупний заповнювач (щебінь 5-20), кг	Вода, кг	Добавка Plastidor 551, доза, (вигра)
1	Миколаївська область	CEM II/A-LL 42,5R 380	Олександрівка, 890	Гранітний, 980	180	0.8%, (3.04 кг)
2	Рівненська область	CEM II/A-LL 42,5R370	Клесів, 830	Гранітний, 1050	170	0.8%, (2.96 кг)

Продовження таблиці 1						
3	Хмельницька область	CEM II/A-LL 42,5R 380	Славута, 760	Гранітний, 1120	175	0.9%, (3.04 кг)
4	Полтавська область	CEM II/A-LL 42,5R 390	Кременчук, 720	Гранітний, 1140	180	0.9%, (3.12 кг)

Для всіх варіантів бетонних сумішей як крупний заповнювач застосовували щебінь з грубокристалічних магматичних порід генезису “інтрузивні” гірська порода “граніт” виробництва ТОВ “КОЦІВСЬКИЙ ГРАНІТНИЙ КАР’ЄР”, що розміщене у селі Коцївка, Фастівського району, Київської області. Такий крок забезпечив стабільну зернову структуру бетонної матриці.

Як мінеральний в’язучий матеріал під час досліджень використовувався портландцемент ПЦ II/A-B-500P-H (CEM II/A-LL 42,5 R) виробництва ПрАТ "Івано-Франківськцемент". Такий цемент використовується для виготовлення бетонів класу В30 і вище для всіх видів будівельних робіт.

Як модифікуючу добавку використовували полімерний модифікатор на основі карбоксилізованих полімерів Plastidor 551 виробництва ТОВ "Доронік-Україна" (Україна). Полімерна добавка "PLASTIDOR 551" є комплексною добавкою на основі полікарбоксилатів, модифікатора набору міцності та сповільнювача тужавлення. Основний механізм дії добавки базується на здатності карбоксильних груп забезпечувати ефективну дисперсію цементних частинок, що сприяє покращенню реологічних характеристик бетонних сумішей, зменшенню їхньої водопотреби та підвищенню кінцевих міцнісних характеристик. Завдяки зниженню внутрішнього тертя в структурі суміші, "PLASTIDOR 551" дозволяє збільшити її рухливість від класу S1 до S5 без шкоди для якісних характеристик бетонного каменю, а також забезпечує стабільність пластичного стану впродовж 5 годин, що є важливим для транспортування та укладання. Застосування цієї добавки ефективно для товарного бетону, самоущільнювальних бетонних сумішей (SF2, SF3), а також для збірних та монолітних конструкцій із важкого і дрібнозернистого бетону класів міцності C8/10 і вище. Використання "PLASTIDOR 551" дозволяє знизити кількість води затвердіння на 25% і скоротити витрати цементу до 21%, що оптимізує виробничі витрати та водночас покращує довговічність конструкцій за рахунок підвищення водонепроникності та морозостійкості. Добавка забезпечує ранню розпалубну міцність при здійсненні монолітних робіт та високу якість поверхні формованих виробів, що робить її актуальною для широкого спектра будівельних завдань.

Як дрібний заповнювач використано чотири різні варіанти (табл. 1):

- кварцовий пісок "Клесів" ТОВ КЛЕСІВСЬКИЙ КАР'ЄР НЕРУДНИХ КОПАЛИН "ТЕХНОБУД", Рівненська обл., Сарненський р-н, смт. Клесів;
- пісок будівельний "Славути" ПП СЛАВУТА-ПІСОК Хмельницька обл., Славутиський р-н, с. Улашанівка;
- пісок річковий "Кременчук" ПрАТ Кременчуцький річковий порт, Полтавська обл., Кременчуцький р-н, м. Кременчук;
- кварцовий пісок "Олександрівка" ПрАТ МИКИТІВСЬКИЙ ГРАНІТНИЙ КАР'ЄР, Миколаївська обл., Вознесенський р-н, смт. Олександрівка.

Одним із ключових факторів забезпечення щільної упаковки зерен та оптимальної реології бетонної суміші є гранулометричний склад заповнювачів. Для його оцінки були проведені дослідження, результати яких наведено у вигляді гранулометричних кривих (рис. 1 – рис. 5). Зерновий склад визначали методом сухого просіювання через стандартний набір сит відповідно до EN 933-1:2012, IDT, що забезпечує високу точність аналізу та відтворюваність результатів. Значення інших фізико-механічних характеристик заповнювачів, а також відповідні нормативні вимоги, подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Фізичні властивості заповнювачів

Назва показника, що визначається	Одиниці виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
Гранітний щебінь ТОВ КОЩІВСЬКИЙ ГРАНІТНИЙ КАР'ЄР				
Насипна густина	кг/м ³	–	1556	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	20–9	2,65 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3
Кварцовий пісок "Клесів" ТОВ ККНК "ТЕХНОБУД"				
Насипна густина	кг/м ³	1100	1411	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11
Модуль крупності	Мк	від 0,5 до 2,75	2,01	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	5,4	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12
Пісок будівельний "Славути" ПП СЛАВУТА-ПІСОК				
Насипна густина	кг/м ³	1100	1314	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11
Модуль крупності	Мк	0,5–2,75	1,45	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	2,96	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12
Пісок річковий "Кременчук" ПрАТ Кременчуцький річковий порт				
Насипна густина	кг/м ³	1100	1503	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11

Продовження таблиці 2				
Модуль крупності	Мк	0,5–2,75	1,21	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	0,76	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12
Кварцовий пісок "Олександрівка" ПрАТ Микитівський гранітний кар'єр				
Насипна густина	кг/м³	1100	1427	ДСТУ Б В.2.7-232:2010 п.11
Модуль крупності	Мк	0,5–2,75	2,5	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.5
Визначення вологості	%	–	2,2	ДСТУ Б В.2.7- 232:2010 п.12

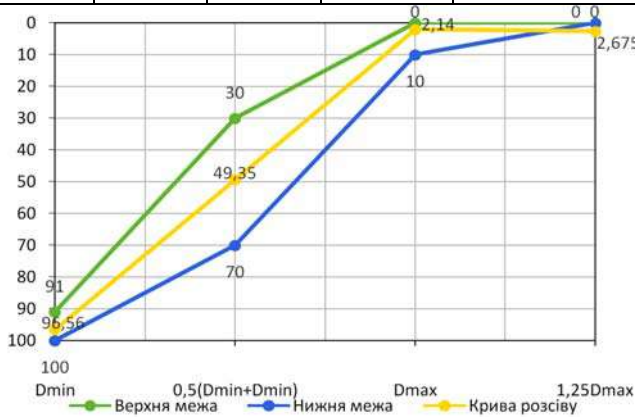


Рис. 1. Гранулометричний склад гранітного щебеню

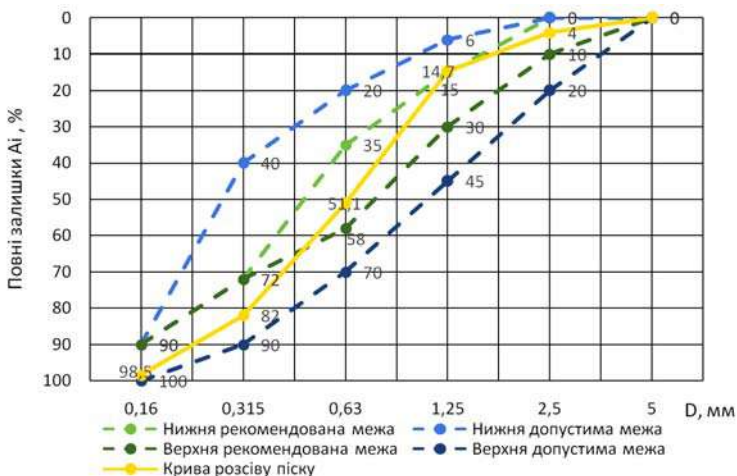


Рис. 2. Гранулометричний склад піску "Олександрівка"

Для прикладу, проаналізуємо гранулограму, подану на рис. 2. Значна частина матеріалу представлена дрібними зернами (менше 0,63 мм), що проявляється у високих значеннях повних залишків на відповідних ситах. У межах рекомендованого діапазону розташування кривої здебільшого задовільне, хоча у діапазоні 0,315–1,25 мм часткові залишки наближаються до верхньої межі або перевищують її. Це може свідчити про підвищену кількість дрібнозернистих фракцій, що можуть впливати на водопотребу та пластичність будівельних сумішей. Важливим аспектом аналізу є порівняння фактичних результатів із допустимими межами, які встановлюють граничні відхилення для фракційного складу. Незважаючи на те, що загалом пісок відповідає вимогам, концентрація часток у діапазоні 0,16–0,315 мм є відносно високою і місцями наближається до гранично допустимих значень. Це може свідчити про підвищений вміст пилюватих часток, що може впливати на якість цементно-піщаних сумішей, зокрема знижуючи їхню міцність та адгезійні характеристики. Загалом гранулометричний склад піску, поданий на діаграмі, свідчить про його відповідність встановленим вимогам, оскільки крива розсіву розташовується в межах допустимого діапазону. Таким чином, цей пісок може бути використаний для виготовлення бетонних сумішей.

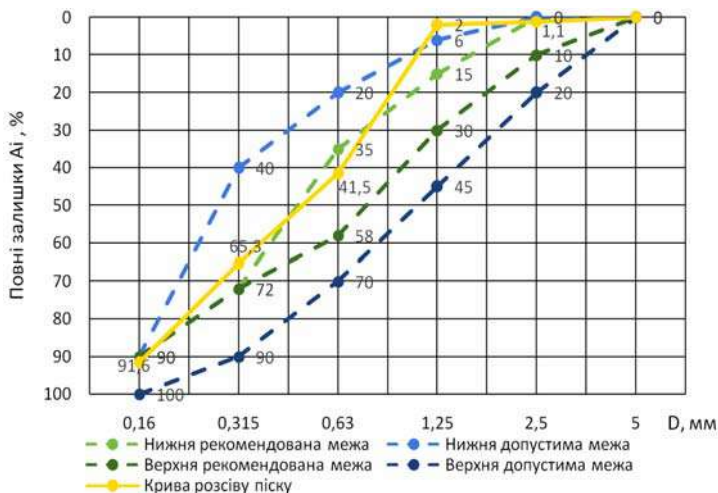


Рис. 3. Гранулометричний склад піску "Клесів"

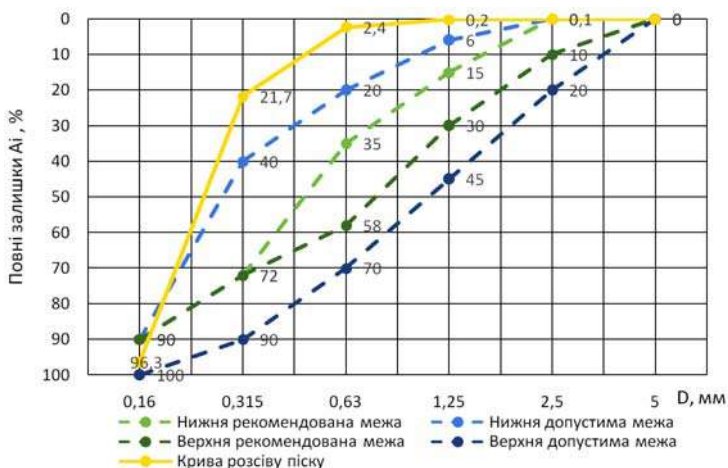


Рис. 4. Гранулометричний склад піску "Кременчук"

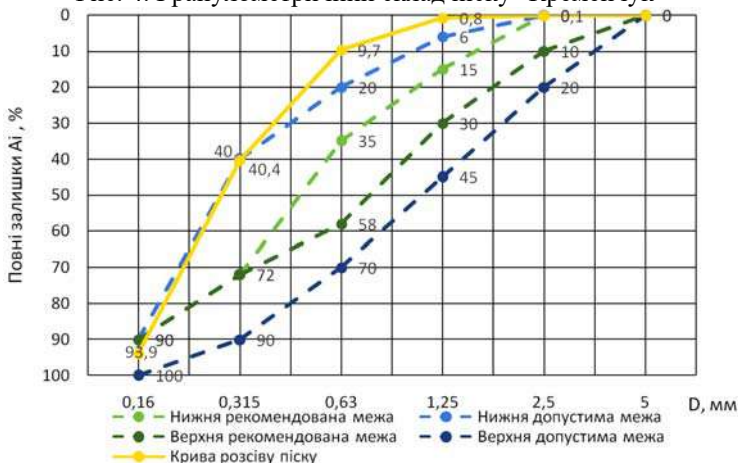


Рис. 5. Гранулометричний склад піску "Славута"

У підсумку, аналіз усіх гранулометричних діаграм (рис. 1 – рис. 5) показав, що досліджувані заповнювачі перебувають у межах рекомендованих фракційних діапазонів, що гарантує необхідну щільність укладання зерен, мінімізує пористість структури бетону та забезпечує легковкладальність суміші при мінімальному вмісті води, цементу та повітря.

Результати та їх аналіз. Для оцінки реологічних властивостей бетонних сумішей було застосовано метод конуса Абрамса, що є стандартним випробуванням для визначення осідання та розпливу конуса. Цей тест дозволив об'єктивно оцінити рухливість кожної суміші, забезпечуючи

коректне порівняння отриманих результатів для всіх чотирьох варіантів складу.

Результати визначення рухливості бетонних сумішей при температурі $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$, відповідно до чинних нормативних документів, наведено в таблиці 3. Всі розроблені склади бетонних сумішей відповідають класу рухливості S4, що підтверджує правильність вибору складу та його відповідність проєктним вимогам.

Таблиця 3

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

№ бетонної суміші	Середня щільність, кг/м^3	Осадка конуса початкова	Розплив конуса	Осадка конуса (60 хв.)	Розплив конуса	Осадка конуса (120хв.)	Розплив конуса
1	2403	24см	53см	22см	41см	20см	34см
2	2424	24см	53см	22см	42см	20см	36см
3	2411	24см	54см	22см	41см	20см	35см
4	2415	24см	56см	23см	44см	20см	36см

Оцінку **міцності на стиск** проводили шляхом випробування **кубічних зразків ($100 \times 100 \times 100$ мм)** згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Випробування виконували на **автоматизованому гідравлічному пресі**, який забезпечує **рівномірне наростання навантаження** відповідно до нормативних вимог (рис. 6). Перед випробуванням **поверхні зразків очищували** від залишків цементного молока та **контролювали їх масу і геометричну правильність**, що є критично важливим для забезпечення рівномірного розподілу навантаження.



Рис. 6. Процес випробування зразків

Зразки випробовували на стиск уздовж осі куба, прикладаючи навантаження з контрольованою швидкістю згідно з нормативними вимогами. Прес автоматично фіксував максимальне руйнівне навантаження, визначене за критерієм різкого зниження сили після досягнення пікової міцності, або руйнування структури зразка. Отримані результати реєструвалися в цифровому форматі, що дозволяло мінімізувати похибки, виключити вплив людського фактора та забезпечити високу точність вимірювань. Випробування виконували для трьох вікових періодів (7, 28 і 56 діб), що дозволяло оцінити динаміку набору міцності бетону та його відповідність проєктним вимогам (табл. 4). Такий підхід гарантував об'єктивність оцінки міцності та забезпечував відповідність методики сучасним стандартам випробувань.

Таблиця 4

Результати випробувань на стиск бетонних зразків

№ суміші	7 доба		28 доба		56 доба	
	Руйнівне напруження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності	Руйнівне напруження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності	Руйнівне напруження, МПа	Сер. значення, МПа / % від класової міцності
1	44,32/43,98	44,15/85,91	54,13/53,68	53,91/104,89	57,81/59,34	58,57/113,98
2	41,99/42,15	42,07/81,86	54,94/53,10	54,02/105,12	57,77/58,03	57,9/112,66
3	43,44/44,6	44,02/85,65	54,18/54,78	54,48/106,01	58,58/59,3	58,94/114,69
4	43,75/44,91	44,33/86,26	57,27/56,88	57,07/111,06	61,33/59,75	60,54/117,8

Дослідження динаміки наростання міцності бетонних зразків показало, що всі чотири складі сумішей продемонстрували високий рівень початкового набору міцності. На 7-му добу зразки досягли від 81.86% до 86.26% від класової міцності, що вказує на інтенсивний ранній гідратаційний процес (рис. 7). Найвищий рівень міцності на цьому етапі спостерігався у суміші № 4, а найнижчий – у суміші № 2 (нумерацію сумішей див. табл. 1) .



Рис. 7. Оцінка міцності затверділого бетону на 7 добу

На 28-му добу всі досліджувані склади бетону перевищили проєктну міцність і знаходились у діапазоні від 104.8% до 111.06%, що свідчить про ефективну взаємодію в'язучого матеріалу із заповнювачами. Найвищу міцність у цей період показала суміш № 4, а найнижчу – суміш № 1 (рис. 8).



Рис. 8. Оцінка міцності затверділого бетону на 28 добу

На 56-ту добу наростання міцності продовжилося, досягнувши 112.66% – 117.8% від класової міцності (рис. 9). Найвищий кінцевий показник отримано для суміші № 4, тоді як інші склади демонстрували наближені значення в межах 113–115% від проєктного рівня.

Таким чином, всі варіанти спроектованих бетонних сумішей забезпечили відповідність бетонного каменю класу міцності С32/40 з певним запасом. Найбільш рівномірне та стабільне наростання міцності продемонстрували склади № 3 та № 4, що може бути обумовлено оптимальною зерною будовою заповнювачів та їх сприятливими адгезійними властивостями.



Рис. 9. Оцінка міцності затверділого бетону на 56 добу

Висновки та рекомендації. Розроблено рецептуру бетонних сумішей на основі місцевих заповнювачів із різних регіонів України, що забезпечують однаковий клас міцності затверділого бетону С32/40 при збереженні необхідної рухливості S4. Встановлено, що якість дрібного заповнювача суттєво впливає на кінцеву міцність бетону. Чистіші та краще градуйовані піски забезпечують рівномірне наростання міцності та вищі остаточні характеристики. Визначено, що дозування карбоксилосумішного модифікатора для досягнення однакової рухливості сумішей та міцності бетону суттєво залежить від фізико-хімічних характеристик регіональних заповнювачів. Дослідження підтверджує необхідність індивідуального підходу до проектування бетонних сумішей з урахуванням місцевих матеріалів, що дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів та економічну доцільність будівництва.

1. Onyshchenko V., Zahorelska T., Klymenko D. Using strategic analysis to assess the construction industry in Ukraine. *Economics and region*. 2024. no. 1(92). P. 26–32. [https://doi.org/10.26906/eir.2024.1\(92\).3305](https://doi.org/10.26906/eir.2024.1(92).3305)
2. Martynovych N., Boichenko E., Dielini M. Rebuilding of Ukraine After War: 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
3. 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>
4. Prikryl R. Geomaterials as construction aggregates: a state-of-the-art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. Vol. 80, no. 12. P. 8831–8845. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02488-9>
5. 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](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02)
6. Influence of Mechanical Screened Recycled Coarse Aggregates on Properties of Self-Compacting Concrete/ W. Tang et al. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/ma16041483>

7. De Brito J., Kurda R., Raposeiro da Silva P. Can We Truly Predict the Compressive Strength of Concrete without Knowing the Properties of Aggregates. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, no. 7. P. 1095. <https://doi.org/10.3390/app8071095>
8. A Review on Concrete Superplasticizers and Their Potential Applications for Enhancing the Performance of Thermally Activated Recycled Cement / R. Huang et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 17. P. 4170. <https://doi.org/10.3390/ma17174170>
9. DeRousseau M. A., Kasprzyk J. R., Srubar W. V. Computational design optimization of concrete mixtures: A review. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 109. P. 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.007>
10. Enhancing the mechanical behaviour 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. 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>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
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 with regard for 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: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 765. <https://doi.org/10.3390/buildings13030765>
23. 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>
24. Moeinian M., Ardjmand M., Nosratinia F. Evaluating the operational properties of concrete admixtures containing molecularly modified polycarboxylate superplasticizers. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71078-y>