

УДК 691.3

**КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ  
ЗАПОВНЮВАЧІВ ПРИКАРПАТТЯ У ЗАВОДСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ І БЛОКІВ**

**COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF  
ALTERNATIVE AGGREGATES FROM THE CARPATHIAN REGION IN  
THE INDUSTRIAL PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE SLABS  
AND BLOCKS**

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; Козак О.В., к. т. н., доц.,  
ORCID ID: 0000-0002-0025-6554; (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; Kozak O.V., Ph.D.  
(Eng.), Assoc. Prof. ORCID ID: 0000-0002-0025-6554; (Ivano-Frankivsk National  
Technical University of Oil and Gas)

Представлено результати експериментальної оцінки залізобетонних дорожніх плит і стінових блоків, у яких традиційні заповнювачі замінено на місцеві заповнювачі Прикарпаття – гравійний щебінь та щебінь із пісковіку. Розроблено чотири склади бетонних сумішей (окремо для плит і блоків на кожному типі заповнювача) з підтриманням рухливості на рівні S3 для блоків і S1 для плит. Міцність бетону визначали у ранні терміни твердіння, після теплової обробки та на 28-му добу, а морозостійкість оцінювали прискореним циклічним методом у 5% сольовому розчині. Усі склади забезпечили 28-денну міцність, що перевищує нормативний рівень для бетону класу C16/20, а відносна втрата міцності після циклів заморожування й відтавання відповідала вимогам для класу F150. Результати неруйнівного контролю за склерометрією та ультразвуковою діагностикою узгоджувалися з даними руйнівних випробувань. Бетон на гравійному щебені продемонстрував вищі показники міцності та морозостійкості, водночас обидва типи

**місцевих заповнювачів підтвердили придатність для промислового виготовлення плит і блоків.**

The paper presents the results of an experimental study on factory-produced reinforced concrete road slabs and wall blocks in which conventional aggregates were replaced with alternative local aggregates from the Carpathian region, namely gravel crushed stone and sandstone crushed stone. The main objective was to determine whether the use of local aggregates can ensure the required strength, frost resistance, and concrete uniformity for factory-made slabs and blocks of strength class C16/20 with a design frost resistance class F150. To this end, four concrete mix compositions were developed: slabs and blocks produced with gravel aggregate, and slabs and blocks produced with sandstone aggregate. The workability of the mixtures was maintained at S3 for blocks and S1 for slabs by combining the superplasticizer Plastidor 5 with the air-entraining admixture Plastidor 71 at a constant water–cement ratio. Concrete strength was determined on cubic specimens after one day of curing, after heat-and-moisture treatment, and at 28 days, enabling evaluation of both early-age and long-term strength development for each composition. Frost resistance was assessed using an accelerated cyclic freezing–thawing method in a 5% saline solution, with strength changes recorded after a specified number of cycles. All tested compositions achieved 28-day compressive strength values that substantially exceeded the normative requirements for class C16/20, while the relative strength loss after freezing–thawing cycles remained within approximately 6–12%, consistent with the requirements for concrete of class F150. In parallel with destructive testing, non-destructive assessment of strength and its distribution in finished slabs and blocks was performed using rebound hammer testing and ultrasonic pulse velocity measurements, followed by conversion to equivalent strength values. Overall, concrete made with gravel aggregate exhibited slightly higher strength and lower strength loss after frost cycles than concrete made with sandstone aggregate; however, both types of local aggregates provided acceptable performance characteristics.

**Ключові слова:** заповнювач, бетонна суміш, модифікуюча добавка, міцність, стіновий блок, дорожня плита  
aggregate, concrete mix, modifying admixture, strength, wall block, road slab

**Вступ.** Залізобетонні дорожні плити та стінові блоки залишаються базовими виробами масового будівництва і відновлення інфраструктури. Їхня надійність визначається правильним проектуванням та стабільністю властивостей бетону, яку забезпечує коректно підібраний склад суміші та виробнича технологія [1–3].

У практиці заводського виготовлення важливим чинником є відтворюваність. Бетонна суміш має бути передбачуваною за рухливістю,

твердінням і структурою, а готові вироби повинні демонструвати однорідні показники міцності та довговічності в межах партії [4, 5]. Саме тому зростає практичний інтерес до повноцінних досліджень застосування місцевих заповнювачів, для яких потрібно експериментально підтвердити стабільність технологічних і експлуатаційних властивостей бетону. Для дорожніх плит і стінових блоків особливо важливими є показники, пов'язані з дією води, солей та циклів заморожування–відтавання. Саме ці чинники часто визначають темп деградації матеріалу під час експлуатації, навіть якщо проєктна міцність досягнута [6, 7].

**Аналіз останніх досліджень.** Логістика постачання сировини є самостійним практичним чинником, який визначає як собівартість, так і стабільність заводського виробництва бетонних виробів. Коли традиційні щебені транспортують з віддалених родовищ, зростають витрати та ризик перебоїв. Це створює практичний стимул переходу на місцеві матеріали за умови збереження нормативних властивостей бетону [8]. Паралельно з економічними причинами посилюється увага до енерговитрат і викидів, пов'язаних із видобутком і перевезенням заповнювачів. Тому обґрунтований вибір місцевої сировини розглядають як реальний резерв підвищення ефективності виробництва [3, 9–11].

Разом з тим заміна заповнювача не є формальною операцією. Форма зерен, шорсткість і пористість поверхні, водопоглинання та гранулометрія змінюють водопотребу і роботу хімічних добавок. Це позначається на зручності укладання, ущільненні, формуванні контактної зони “цементний камінь – заповнювач”, а в підсумку на міцності й морозостійкості [4,6]. Зміна заповнювача може по-різному впливати на міцність бетону на стиск і на розтяг при розколюванні, причому другий показник часто є чутливим до якості контактної зони та мікрodefektів структури [12, 13]. У сучасних сумішах керування реологією та повітряним вмістом часто забезпечують поєднанням суперпластифікаторів і повітровтягувальних добавок. Саме їх узгоджена дія дозволяє утримувати потрібну рухливість без надмірного збільшення водоцементного відношення та підтримувати довговічність у циклічних впливах [6].

Для заводських виробів важливо не лише отримати потрібну 28-денну міцність, а й контролювати ранній приріст, а також стабільність властивостей у межах виробу. Тому поряд із руйнівними випробуваннями широко застосовують неруйнівні методи контролю, зокрема ультразвукові та ударні методи. Вони корисні для оперативного технологічного контролю, але потребують коректного урахування впливових чинників, насамперед вологості, і калібровки за традиційними контрольними випробуваннями [13–15].

У своїх попередніх дослідженнях автори цієї статті послідовно аналізували можливість використання альтернативних заповнювачів природного походження з Карпатського регіону та інших областей України у бетонних

сумішах заводського призначення. Зокрема, було розглянуто підходи до проектування складів бетонних сумішей із застосуванням місцевих заповнювачів та показано, що за коректного підбору гранулометрії й водоцементного відношення можна забезпечити необхідний рівень технологічних і міцнісних показників бетону [9]. Окрему увагу приділено оцінці фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України [10]. У подальших роботах автори продемонстрували можливість формування бетонів одного класу міцності на заповнювачах з різних регіонів за рахунок адаптації рецептури, що підтвердило визначальну роль властивостей заповнювача і контактної зони у формуванні міцності затверділого бетону [11]. Разом з тим у цих дослідженнях основний акцент робився на лабораторних зразках і характеристиках матеріалів, що зумовлює потребу в подальшій перевірці отриманих висновків на реальних заводських виробих (рис. 1).



Рис. 1. Взірці залізобетонних виробів на місцевих заповнювачах:  
а – стінові блоки, б – дорожні плити

**Постановка мети і задач дослідження.** На Прикарпатті є власна сировинна база, а гравійний щебінь і щебінь із пісковіку місцевих кар'єрів можна отримувати з меншими логістичними витратами. У більшості виробників, які пробують переходити на місцеві заповнювачі, не вистачає систематизованих даних саме по реальних виробих, а не по лабораторних зразках. Через це є ризик недобору міцності, неоднорідного розподілу властивостей по об'єму бетонного виробу та швидшого зниження міцності в умовах дії води, солей і морозу. Отже, потрібні результати випробувань, на які можна спертися під час проектування складу суміші та налаштування технології. Метою дослідження є встановлення того, чи забезпечує використання місцевих заповнювачів необхідні показники міцності, морозостійкості та однорідності бетону для заводських плит і блоків класу C16/20 з проектним класом морозостійкості F150. Для цього у роботі

оцінюється, як вибір заповнювача впливає на властивості бетонної суміші, на розвиток міцності з часом, на поведінку бетону при циклах заморожування–відтавання в сольовому середовищі, а також на однорідність міцності в готових виробках.

### Методи і матеріали. Матеріали та склади бетонних сумішей.

Дослідження виконували з орієнтацією на заводське виготовлення залізобетонних блоків і дорожніх плит із бетону класу С16/20 з проектного морозостійкістю F150. Основним фактором порівняння був тип місцевого крупного заповнювача: гравійний щебінь чи щебінь із пісковика. Для кожного типу виробу готували два склади бетонних сумішей, які відрізнялися тільки видом крупного заповнювача, що забезпечило коректне порівняння отриманих результатів.

Для приготування бетонних сумішей використовували в'яжуче у вигляді портландцементу СЕМ II/A-M (S-LL) 42,5R, дрібний заповнювач (пісок) та крупні заповнювачі необхідних фракцій. Склади підбирали так, щоб забезпечити технологічність формування та досягнення заданих експлуатаційних показників готових виробів. Рухливість сумішей забезпечували на рівні S3 для блоків і S1 для плит, використовуючи комплекс хімічних добавок без необґрунтованого збільшення водовмісту.

Як суперпластифікатор застосовували добавку Plastidor 5 (полікарбоксилатний суперпластифікатор; виробник Доронік, Україна), що дозволяє зменшити водопотребу суміші при збереженні заданої рухливості. Для сумішей дорожніх плит додатково вводили повітровтягувальну добавку Plastidor 71, призначену для формування контрольованої пористості та підвищення морозостійкості бетону. Підсумкові склади сумішей для блоків наведено в табл. 1 і 2, а для дорожніх плит – у табл. 3 та 4.

Таблиця 1

Рецептура бетонної суміші та інтегральні гранулометричні показники заповнювачів для залізобетонних блоків на гравійному щебені

Матеріали	Вага, кг	Середня щільність, кг/м <sup>3</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	В/Ц	
Вода	160	1,0	0,160	0,53	
Цемент СЕМ II/A-M (S-LL) 42,5R ПрАТ "МИКОЛАЇВЦЕМЕНТ"	300	4,00	0,075		
Пісок Кліщівна	700	2,58	0,271		
Щебінь гравійний 2--5	200	2,59	0,075		
Щебінь гравійний 5--10					
Щебінь гравійний 5--20	960		0,362		
Plastidor 5	0,7%	2,1	1,08		0,002
Разом	2322		0,996		
Маса мінеральної частини		1860			
Маса піщаної частини <5 мм		1154			
Доля піщаної частини, % За масою		62,0			

Таблиця 2

Рецептура бетонної суміші та інтегральні гранулометричні показники заповнювачів для залізобетонних блоків на пісковикі

Матеріали	Вага, кг	Середня щільність, кг/м <sup>3</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	В/Ц
Вода	170	1,0	0,170	0,55
Цемент СЕМ ІІ/А-М (S-LL) 42,5R ПрАТ "МИКОЛАЇВЦЕМЕНТ"	310	4,00	0,078	
Пісок Кліщівна	700	2,58	0,271	
Щебінь пісковик 2--5	200	2,64	0,076	
Щебінь пісковик 5--10				
Щебінь пісковик 5--20	980		0,371	
Plastidor 5	0,7%	2,17	1,08	
Разом	2362		0,998	
Маса мінеральної частини	1880			
Маса піщаної частини <5 мм	1207			
Доля піщаної частини, %. За масою	64,2			

Таблиця 3

Рецептура бетонної суміші та інтегральні гранулометричні показники заповнювачів для залізобетонних дорожніх плит на гравійному щебені

Матеріали	Вага, кг	Середня щільність, кг/м <sup>3</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	В/Ц
Вода	110	1,0	0,110	0,34
Цемент СЕМ ІІ/А-М (S-LL) 42,5R ПрАТ "МИКОЛАЇВЦЕМЕНТ"	320	4,00	0,080	
Пісок Кліщівна	680	2,58	0,264	
Щебінь гравійний 2--5	200	2,64	0,076	
Щебінь гравійний 5--10				
Щебінь гравійний 5--20	1000		0,379	
Plastidor 5	0,7%	2,24	1,08	
Plastidor 71	0,1%	0,33	1,00	
Разом	2312		0,999	
Маса мінеральної частини	1880			
Маса піщаної частини <5 мм	1144			
Доля піщаної частини, %.	60,9			
Кількість тіста, м <sup>3</sup>	0,292			

Рецептура бетонної суміші та інтегральні гранулометричні показники заповнювачів для залізобетонних дорожніх плит на пісковику

Матеріали	Вага, кг	Середня щільність, кг/м <sup>3</sup>	Об'єм, м <sup>3</sup>	В/Ц
Вода	110	1,0	0,110	0,33
Цемент СЕМ II/A-M (S-LL) 42,5R ПрАТ "МИКОЛАЇВЦЕМЕНТ"	330	4,00	0,083	
Пісок Кліщівна	680	2,58	0,264	
Щебінь пісковику 2--5	220	2,64	0,083	
Щебінь пісковику 5--10				
Щебінь пісковику 5--20	1000		0,379	
Plastidor 5	0,7%	2,31	1,08	0,002
Plastidor 71	0,1%	0,33	1,00	
Разом	2342		1,001	
Маса мінеральної частини	1900			
Маса піщаної частини <5 мм	1213			
Доля піщаної частини, %	63,9			
Кількість тіста, м <sup>3</sup>	0,319			

**Методи випробувань та контроль якості.** Оцінювання міцності бетонів виконували шляхом руйнівних випробувань кубічних зразків 100×100×100 мм на стиск (рис. 2). Випробування проводили відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 на автоматизованому гідравлічному пресі з рівномірним наростанням навантаження.



Рис. 2. Руйнівні випробування зразків бетону: а – контроль зразків; б – випробування на автоматизованому гідравлічному пресі

Перед випробуванням контролювали геометричні розміри та масу зразків, а також забезпечували правильне розміщення зразка в плитах преса.

Міцність визначали у трьох контрольних термінах твердіння: через 1 добу, після тепловологообробки та на 28-му добу, що дозволяло охарактеризувати ранній набір міцності, ефект прискореного твердіння та нормативний рівень міцності бетону. Тепловологообробку здійснювали в режимі, прийнятому для заводської технології, із температурою близько +45 °С.

Морозостійкість бетонів оцінювали прискореним методом із циклічним заморожуванням-відтаванням у 5% сольовому розчині. Після досягнення контрольного віку зразки висушували та зважували, виконували їх насичення сольовим розчином, після чого проводили циклограму заморожування і відтавання в кліматичній камері. Після завершення циклів контролювали зовнішній стан і зміну маси та визначали залишкову міцність руйнівним методом. Отримані дані використовували для оцінки зміни міцності як інтегрального показника стійкості бетону до циклічної дії температури в умовах солевого насичення.

Для оцінки фактичної міцності безпосередньо у готових виробів та перевірки однорідності бетону додатково застосовували неруйнівні методи контролю (рис. 3). Ударну склерометрію виконували молотком Шмідта згідно з підходами EN 12504-2 / ASTM C805. Поряд зі склерометрією застосовували ультразвуковий метод, у якому вимірювали швидкість проходження імпульсу через бетон і використовували її як інформативний параметр для оцінювання стану та однорідності матеріалу. Така комбінація методів забезпечувала інженерно обґрунтовану перевірку міцності та якості виробів без їх руйнування і дозволяла зіставити результати неруйнівного контролю з даними руйнівних випробувань.

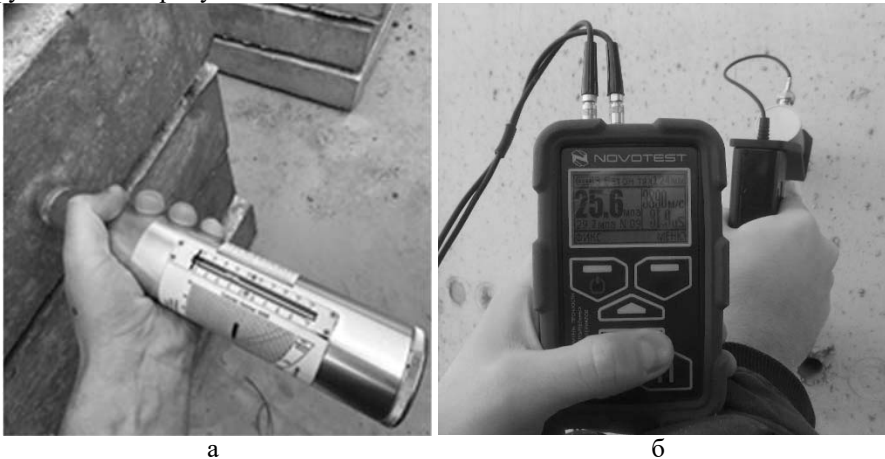


Рис. 3. Неруйнівний контроль готових виробів із бетону на місцевому гравійному щебені: а – склерометрія; б – ультразвукове обстеження

## Результати та їх аналіз.

**Набір міцності та вплив типу крупного заповнювача.** Результати руйнівних випробувань кубічних зразків розміром 100×100×100 мм показали, що всі досліджені склади формують достатній рівень міцності на стиск як для залізобетонних блоків, так і для дорожніх плит. Динаміку міцності на ранніх строках твердіння, після тепловологообробки та на 28-му добу наведено в табл. 5.

Таблиця 5.

Результати випробування на стиск бетонних зразків:

1 – на гравійному щебені; 2 – на пісковикі

№ суміші	1 доба (нормальні умови твердіння)		1 доба (після ТВО при темп. +45°C)		28 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
<b>Зразки із суміші для залізобетонних блоків</b>						
1	9,6/9,2/9,3	9,36/42,2	17,4/16,2/17,6	17,06/76,8	34,6/35,9/35,2	35,2/158,7
2	8,5/7,9/7,9	8,1/36,8	15,6/16/16,3	15,9/71,9	32,4/33,1/32,9	32,8/147,8
<b>Зразки із суміші для залізобетонних плит</b>						
1	14,4/13,9/14,2	14,1/63,8	21,4/21,3/21,1	21,3/95,9	37,8/36,8/37,2	37,1/166,9
2	12,5/12,6/13,1	12,7/57,35	19,3/19/18,7	19/85,6	34,1/33,7/34,2	34/153,1

Для залізобетонних блоків середня міцність через 1 добу твердіння в нормальних умовах становила 9,36 МПа для складу на гравійному щебені та 8,10 МПа для складу на пісковикі. Після тепловологообробки при температурі близько +45 °С міцність зросла до 17,06 МПа (гравій) та 15,90 МПа (пісковик). На 28-му добу середня міцність досягла 35,2 МПа для складу на гравійному щебені та 32,8 МПа для складу на пісковикі (табл. 5). Отже, обидва склади забезпечують 28-денну міцність, що впевнено перевищує рівень, очікуваний для бетону класу С16/20, і створює технологічний запас для серійного виробництва.

Для дорожніх плит міцність була вищою, ніж для блоків, що є законотримним з огляду на нижче водоцементне відношення та більш жорстку консистенцію сумішей. Через 1 добу міцність становила 14,1 МПа (гравій) та 12,7 МПа (пісковик), після тепловологообробки – 21,3 МПа (гравій) та 19,0 МПа (пісковик), а на 28-му добу – 37,1 МПа (гравій) та 34,0 МПа (пісковик) (табл. 5). Таким чином, застосовані склади забезпечують високий рівень міцності матеріалу, що є важливим для роботи плит у дорожніх умовах.

Порівняння складів показало стійку тенденцію: бетон на гравійному щебені демонстрував вищу міцність, ніж бетон на пісковик, як у блоках, так і в плитах. Така різниця є технічно пояснюваною і, ймовірно, пов'язана з кращими умовами формування структури бетону та контактної зони "заповнювач–цементна матриця". Водночас різниця між двома заповнювачами не має характеру критичної, а обидва матеріали є придатними для виробництва за умови коректного підбору складу.

**Морозостійкість бетонів у сольовому середовищі.** Морозостійкість бетонів оцінювали прискореним методом із циклічним заморожуванням–відтаванням у 5%-му сольовому розчині з подальшим визначенням залишкової міцності на стиск (рис. 4). Такий режим випробування одночасно моделює дію циклів температури та сольового насичення, що характерно для експлуатації дорожніх конструкцій у зимовий період.

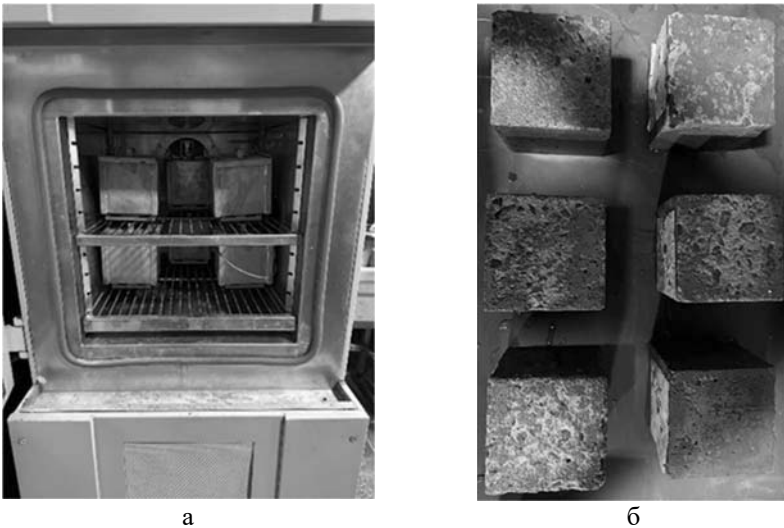


Рис. 4. Експериментальне моделювання температурних циклів: а – кліматична камера; б – вигляд зразків після циклічного заморожування–відтавання

Отримані результати засвідчили, що для всіх складів бетонних сумішей зниження міцності після циклів заморожування–відтавання залишалося в допустимих межах і не супроводжувалося ознаками інтенсивного руйнування зразків. Для блоків відносне зниження міцності становило близько 6,6% (гравійний щебень) та 8,8% (пісковик). Для дорожніх плит втрати міцності були дещо більшими – близько 10,7% (гравій) та 12,1% (пісковик) (рис. 5). Важливо, що навіть за наявності такого зниження міцності бетон зберігав працездатність, а характер руйнування залишався типовим для матеріалу без різкого погіршення механічної поведінки.



Рис. 5. Результати оцінювання морозостійкості бетонів для блоків і плит на місцевих заповнювачах (гравійний щебінь і щебінь із пісковіку)

Як і за показниками міцності, бетон на гравійному щебені продемонстрував вищу стійкість до морозного впливу, що пов'язано з більш щільною структурою та меншою часткою відкритої пористості. Бетон на пісковіку також показав прийнятний рівень морозостійкості, однак для промислового застосування доцільно передбачити підвищений контроль складу та стабільності технологічних параметрів, насамперед водовмісту і дозування добавок.

**Неруйнівний контроль міцності готових виробів.** Окремий блок результатів пов'язаний із неруйнівною оцінкою міцності безпосередньо на готових виробах. Для цього застосовували два методи контролю: ударну склерометрію (молоток Шмідта) та ультразвуковий контроль. Такий підхід дозволяв оцінити не лише рівень міцності, але й її варіативність у межах виробу (рис. 3).

За результатами випробувань молотком Шмідта середня оцінка міцності становила 35,6 МПа для блоків на гравійному щебені та 29,8 МПа для блоків на пісковіку. Для дорожніх плит отримано 40,7 МПа (гравій) та 36,4 МПа (пісковік). Зазначимо, що неруйнівний контроль ударною склерометрією відтворив ту саму тенденцію, яку встановлено руйнівними випробуваннями кубів: бетон на гравійному заповнювачі демонструє вищу міцність, ніж бетон на пісковіку.

Додатково було застосовано ультразвуковий метод контролю, який ґрунтується на вимірюванні швидкості поширення пружних хвиль у бетоні. На відміну від ударної склерометрії, що характеризує приповерхневий шар, ультразвуковий контроль виступає об'ємним індикатором якості бетону і є чутливим до зон підвищеної пористості, неоднорідної ущільненості,

мікротріщин та інших локальних дефектів. Серія ультразвукових вимірювань у різних точках виробу дала змогу оцінити рівномірність розподілу міцності, при цьому малий розкид отриманих значень розглядався нами як ознака стабільності технології формування та твердіння.

За результатами ультразвукового контролю, виконаного для залізобетонних блоків, отримано еквівалентні значення середньої міцності близько 34 МПа для виробів на гравійному заповнювачі та близько 28 МПа для виробів на пісковикі. Для дорожніх плит ультразвукові оцінки становили близько 36 МПа (заповнювач гравійний щебінь) та 30 МПа (заповнювач пісковик). Отримані значення узгоджуються із загальною тенденцією, встановленою руйнівними випробуваннями і склерометрією.

Зазначимо, що в нашому дослідженні ультразвуковий метод демонстрував дещо нижчі оцінки міцності порівняно з руйнівними випробуваннями або склерометрією. Це пояснюється тим, що на швидкість хвиль впливають вологість бетону, умови акустичного контакту перетворювачів, наявність арматури на траєкторії прозвучування, а також локальна пористість та структурна неоднорідність матеріалу. З огляду на це ультразвукові результати доцільно трактувати як консервативну оцінку фактичної міцності, яка водночас є інформативною для контролю якості й однорідності бетону у виробі.

**Висновки.** У ході дослідження було виготовлено та випробувано залізобетонні блоки і дорожні плити класу С16/20 з проєктною морозостійкістю F150 на двох видах місцевих крупних заповнювачів Прикарпаття – гравійному щебені та щебені з пісковикі. На підставі отриманих результатів можна зробити такі висновки.

1. Суміші з гравійним щебенем показали кращу укладальність за близьких значень водоцементного відношення. У твердому стані це відобразилося у вищій міцності, більшій щільності та меншій пористості порівняно з бетоном на пісковикі.

2. Бетони на гравійному та пісковиковому щебені забезпечили 28-добову міцність на стиск, що перевищує вимоги до класу С16/20 як для блоків, так і для плит. Це свідчить про можливість використання місцевих заповнювачів у заводському виробництві за умови коректного підбору складу.

3. Після прискорених циклів заморожування–відтавання в сольовому середовищі зниження міцності для всіх досліджених складів залишалось в допустимих межах, без ознак інтенсивного руйнування зразків.

4. Ударна склерометрія у поєднанні з ультразвуковими вимірюваннями на вибраних виробках відтворила ту ж ієрархію міцності між різними складами бетону, що й лабораторні випробування кубів (вищу міцність для бетонів на гравійному щебені та дещо нижчу – на пісковикі). Абсолютні значення за неруйнівними методами виявилися нижчими за результати руйнівних випробувань.

5. З урахуванням вищої міцності та кращої стійкості до морозного впливу бетон на гравійному щебені можна рекомендувати як основний варіант для відповідальних плит і блоків. Бетон на пісковику також продемонстрував прийнятні показники і може використовуватися як допустима альтернатива, за умови уточнення складу (насамперед коригування водоцементного відношення та режимів застосування добавок).

1. Jang J., Jeong E., Cho J., Kim T. W. Exploring Simultaneous Effects of Delay Factors in Precast Concrete Installation. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 12. P. 3894. <https://doi.org/10.3390/buildings14123894>

2. Liu W., Tao X., Mao C., He W. Scheduling optimization for production of prefabricated components with parallel work of serial machines. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 148. P. 104770. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104770>

3. Vijerathne D., Wahala S., Illankoon C. Impact of Crushed Natural Aggregate on Environmental Footprint of the Construction Industry: Enhancing Sustainability in Aggregate Production. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 9. P. 2770. <https://doi.org/10.3390/buildings14092770>

4. Matar M., Aday A. N., Adams C. J., Suraneni P. Salt-scaling resistance of biomimetic PEG–PVA-modified concrete. *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58, no. 4. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02623-y>

5. Yang C., Zhou W., Zhao H., Zhou M. Frost resistance improvement of recycled powder concrete by chemical admixtures. *Scientific Reports*. 2026. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35840-8>

6. Abbas M. M., Muntean R. The Effectiveness of Different Additives on Concrete's Freeze–Thaw Durability: A Review. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 978. <https://doi.org/10.3390/ma18050978>

7. Kapeluszna E. Mutual compatibility of superplasticizers (PC, SNF), grinding aids, and cement composition: Effects on rheology and air content. *Construction and Building Materials*. 2023. P. 131589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>

8. Zhang R., Feng X., Mou Z., Zhang Y. Green optimization for precast production rescheduling based on disruption management. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 420. P. 138406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138406>

9. 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)

10. Velychkovych A. S., Andrusyak A. V., Silchuk D. V. Evaluation of the properties of coarse aggregates from crushed rock in the western region of Ukraine for the production of concrete mixes. *Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*. 2025. No. 23. P. 89–104. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09)

11. Andrusyak A. V., Silchuk D. V., Velychkovych A. S. Development of concrete mixtures based on aggregates from different regions of Ukraine to produce hardened concrete of the same strength class. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures*. 2025. No. 47. P. 18–31. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.02>

12. Saeheaw T. Interpretable Machine Learning Framework for Non-Destructive Concrete Strength Prediction with Physics-Consistent Feature Analysis. *Buildings*. 2025. Vol. 15, no. 15. P. 2601. <https://doi.org/10.3390/buildings15152601>

<b>Відомості про статтю:</b>		<b>Article information</b>	
Отримано	16.02.2026	Received	16.02.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	03.03.2026	Received in revised form	03.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

### **Політика відкритого доступу**

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

### **Open access policy**

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

### **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.

### **Conflicts of Interest**

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

### **Використання штучного інтелекту**

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

### **Use of Artificial Intelligence**

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.