

УДК 69.059.4:625.84

ВПЛИВ ПОВІТРОВТЯГНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ

Канд. техн. наук Г. В. Бражник

INFLUENCE OF AIR CONTENT OF CONCRETE MIXTURE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT CONCRETE

PhD (Tech.) H. Brazhnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351822>



Анотація. У статті розглянуті питання про підвищення морозостійкості бетонів за рахунок введення в бетонну суміш повітровтягувальних добавок. Розглянуті гіпотези руйнування цементобетонів за дії від'ємних температур. Показано, що поровий простір у бетоні, як і тверда фаза, має кілька параметрів – розміри, обсяг і форма пор, розподіл пор за розмірами, що значно важливо задля загального оцінювання процесів структуроутворення бетону і впливає на фізико-механічні характеристики бетону. Наведено приклади суцільності дослідження мікроструктури дорожнього бетону, оскільки саме з характером і особливостями мікроструктури пов'язані основні властивості цементного каменю та бетону. Показано, що немає єдиної теорії «морозної» деструкції цементних бетонів, а розглянуті в статті гіпотези неспроможні пояснити деякі явища, які спостерігають із дією негативних температур на бетон. Експериментально доведено, що з введенням повітровтягувальної добавки кожен додатковий відсоток повітря викликає зниження міцності бетону. Встановлено існування трьох областей зниження міцності бетонів на кожен відсоток залученого повітря. Також зі збільшенням залученого повітря більше 4 % зростає водопоглинання і водонасичення. Дослідження морозостійкості бетону за різної кількості залученого повітря показали, що без повітровтягувальної добавки і надмірному вмісті повітря морозостійкість різко знижується. Бетони з повітровтягненням у діапазоні від 3,2 до 6 % мають максимальну морозостійкість F400. Показано, що зниження міцності бетону призводить до зниження його експлуатаційних показників і збільшення вартості готової продукції через необхідність збільшення витрат цементу.

Ключові слова: цементобетон, повітровтягнення, пористість, бетонна суміш, пори, міцність, морозостійкість, коефіцієнт морозостійкості, водопоглинання, водонасичення.

Abstract. The article examines the benefits of increasing the frost resistance of concrete due to the introduction of water-strengthening additives into the concrete mix. Hypotheses for the degradation of cement concrete under varying temperatures are considered. It has been shown that the pore space in concrete as well as the solid phase is characterized by a number of parameters - size, size and shape of pores, distribution of pores by size, which is important for the overall assessment of the processes of structure formation of concrete and pouring on the physical and mechanical characteristics of concrete. An application has been made to investigate the microstructure of road concrete, since the very nature and characteristics of the microstructure are related to the main properties of cement stone and concrete - ductility, gas impermeability, chemical properties durability, frost resistance, resistance to aggressive media. It is shown that there is no single theory of «frosty» destruction of cement concrete, and the hypotheses considered in the statistics are impossible to explain a number of phenomena that can be avoided when negative

temperatures affect concrete (with increased fluidity The frozen ruin will speed up, because the pressure on the ice will not grow, and the frost will ruin the concrete, which is sometimes less than 90 % filled with water. It has been experimentally proven that when a water-strengthening additive is introduced, the leather additive again causes a decrease in the value of concrete. It has been established that there are three areas of decreased value of concretes on the skin of the resulting surface: in the first – the value decreases by 8...10%, in the other – by 7...8 %, in the third – by 5 %. Also, with an increase in the received air of more than 4 %, the water content increases by 19 %, which also characterizes the open porosity, and the water saturation increases by 24 %, which also characterizes the openness and, in part, intellectual property. closed porosity. Studies of the frost resistance of concrete with varying amounts of wind received have shown that without a water-tempering additive and above-ground air, the frost resistance sharply decreases. Cured concrete in the range of 3.2 to 6 % has a maximum frost resistance of F400. It has been shown that the value of concrete is reduced, leading to a decrease in its performance indicators and to an increase in the quality of the finished product through the need for increased waste of cement. Therefore, the most important point in the technology of road concrete is the correct selection and optimization of the number of additives that can be cured, primarily the water-strengthening ones.

Keywords: cement concrete, hardening, porosity, concrete mix, pores, softness, frost resistance, frost resistance coefficient, water-claying, water saturation.

Вступ. Основним показником довговічності дорожніх цементних бетонів є їхня здатність чинити опір впливу змінного заморожування-відтавання в насиченому водою (розчином солі) стані, тобто морозостійкість. Із часом за такого циклічного впливу можливе руйнування бетону, ступінь та інтенсивність якого визначає власне його морозостійкість.

На сьогодні відомо, що підвищити морозостійкість бетонів можна за рахунок використання повітровтягувальних добавок. Із перемішуванням у бетонну суміш потрапляє повітря, яке розподілено у вигляді пор різного діаметра у всіх типах структури дорожніх цементних бетонів (мікро- (цементний камінь), мезо- (цементний розчин) і макроструктури (безпосередньо бетон)).

Поровий простір у бетоні, як і тверда фаза, має кілька параметрів – розміри, обсяг і форма пор, розподіл пор за розмірами, що значно важливо задля загального оцінювання процесів структуроутворення бетону і впливає на фізико-механічні характеристики бетону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якщо розглянути цементний камінь, що твердіє, із позицій поверхневих

явищ з урахуванням специфіки взаємодії твердої та рідкої фаз, то, за П. А. Ребіндером, у цементному камені є кілька видів води, які обумовлені різним ступенем взаємодії з поверхнею твердого тіла. Відповідно, розрізняють хімічно та фізично пов'язану, порову та об'ємну вологу.

Хімічно зв'язана вода є частиною гідратних новоутворень цементного каменю. Фізично зв'язана вода – адсорбована поверхнею твердого тіла рідина, не бере участі в хімічних реакціях цементу з водою. Структурна вода відрізняється від вільної внаслідок спотворення її структури зі взаємодією з поверхнею стінок пор. Як результат, зміна густини, в'язкості, температури кристалізації. Чим менший розмір пор, тим сильніше змінюються властивості порової рідини.

Отже, між розмірами пор і температурою кристалізації порової води цементного каменю може бути встановлена характерна залежність.

Н. Стокхаузен провів відповідність між розміром пор і водою, що знаходиться в них:

- у капілярах радіусом понад 100 нм спостерігають вільну воду;

- вода, конденсована в капілярах із радіусом 10...100 нм, має знижений хімічний потенціал, унаслідок чого знижена її точка кристалізації, а пори заповнені водою за відносної вологості 90...100 %;

- у порах, радіусом 2...10 нм вода сильно структурована і присутня в них за вологості 60 %.

Четверта модифікація є адсорбованою водою.

Дослідження мікроструктури суттєво важливе, оскільки саме з характером та особливостями мікроструктури пов'язані основні властивості цементного каменю та бетону – міцність, газо- та водонепроникність, хімічна стійкість, морозостійкість, стійкість до дії агресивних середовищ (таблиця).

Таблиця

Класифікація пор за їхнім впливом на властивості цементобетону

Розмір	Тип	Властивість бетону	Автор
10 ⁶ ...15000 нм	Великі сферичні порожнини	Міцність, проникність	І. Ароусміт
15000...50 нм	Великі капіляри		
50...10 нм	Капіляри середнього розміру. Пори між частинками	Міцність, проникність	
10...2,5 нм	Малі (гелеподібні) капіляри	Усадка	
2,5...0,5 нм	Мікропори, пори гелю, пори між кристалами	Усадка, повзучість	
0,5 нм	Міжшарові мікропори. Пори в кристалах		
>2000 нм і <100 нм	Великі капіляри	Морозостійкість	Х. Ушикава
10...100 нм	Капіляри середнього розміру. Пори між частинками	Газо- та водонепроникність	
< 10 нм	Малі (гелеподібні) капіляри	Корозія (дифузія та перенесення іонів)	
1 нм < d < 5 нм	Гелеві пори	-	Г. Добролюбов, В. Б. Ратінов, Т. І. Розенберг
5 нм < d < 100 нм	Капілярні пори	Газо- та водонепроникність	
100 нм < d < 10 ⁵ нм	Макрокапіляри	Корозія бетону, усадка	
d > 10 ⁵ нм	Великі сферичні порожнини, каверни і раковини в бетоні	Міцність	

Існує кілька основних гіпотез, які пояснюють механізм морозного руйнування бетону. За гіпотезою Р. Коллінза, руйнація відбувається в результаті безпосереднього тиску льоду, що кристалізується (обсяг якого більше від обсягу води на 9 %) на стінки пор. Критикуючи цю гіпотезу,

Г. І. Горчаков і В. М. Москвин показали, що кристалізаційний тиск не є основною причиною руйнування бетону, а можливий як окремих випадок.

Гіпотеза гідростатичного тиску води, запропонована Н. А. Житкевичем, передбачає, що морозна руйнація

відбувається через те, що на стінки пор тисне не сам лід, а вода, на яку передається тиск льоду, що утворюється. На користь більшої коректності другої гіпотези можна віднести той факт, що вода, яка заповнює капілярні пори, не може зазвичай повністю перетворитися на кригу через відсутність необхідного місця, а також через неможливість її перетворення на кригу в капілярах із радіусом менше 10^{-4} м за звичайних температур випробування

Цікавою є гіпотеза руйнування бетонів через різницю в коефіцієнтах лінійного термічного розширення його компонентів. За від'ємних температур термічна несумісність компонентів різко посилюється, оскільки коефіцієнт термічного розширення льоду в три-сім разів більше, ніж бетону. Ця гіпотеза набула розвитку в роботах В. М. Москвіна, М. М. Капкина, Б. М. Мазура, А. М. Підвального та інших учених. Проте температурні напруги відіграють значну роль у руйнуванні бетону, не насиченого вологою, що нехарактерно для дорожнього бетону, особливо в зимовий період. У цьому випадку може йтися швидше про термостійкість, а не морозостійкість бетону.

Водночас розглянуті вище гіпотези неспроможні пояснити ряд явищ, які спостерігають за дії від'ємних температур на бетон. Наприклад, зі збільшенням швидкості заморожування руйнація прискорюється, тоді як тиск льоду при цьому не зростає. Більш того, мороз руйнує бетони, пори яких заповнені водою менш як на 90 % [1-4].

Визначення мети та завдання дослідження. Аналіз показує, що немає єдиної теорії «морозної» деструкції цементних бетонів. Якщо виходити з того, що головним фактором, який визначає морозостійкість бетону, є будова порового простору, то метою досліджень було встановлення взаємозв'язку міцності та морозостійкості бетонів від характеру пористості.

Основна частина дослідження.

Відомо, що залучення повітря бетону є важливим фактором, що визначає морозостійкість бетону. Яка має бути кількість залученого повітря для забезпечення необхідної морозостійкості за мінімального впливу на міцність? У різних країнах прийнято, що морозостійкість забезпечена з повітровтягненням 4 ... 7 %. Додаткове залучення повітря в бетонну суміш призводить до зниження міцності (за різними даними) на 1 % повітря – 3 ... 5 % міцності. Суперечливі дані про вплив повітровтягнення на міцність і морозостійкість бетонів потребують уточнення.

Наші дослідження показали (рис. 1), що з введенням повітровтягувальної добавки кожен додатковий відсоток повітря викликає зниження міцності бетону. На графіку можна виділити три області, у яких зниження міцності бетону відбувається по-різному.

В області I (із повітровтягненням бетонної суміші 1,6 – 6,0 %) спостерігають найбільше зниження міцності. Кожен додатковий відсоток повітря в бетонній суміші призводить до зниження міцності від 8 до 10 %.

В області II (повітровтягнення бетонної суміші 6,0 – 9,5 %) зниження міцності бетону відбувається більш плавно. На цій ділянці збільшення вмісту повітря на один відсоток призводить до зниження міцності бетону від 7 до 8 %.

В області III (повітровтягнення бетонної суміші 9,5 – 12,0 %) на кожний додатковий відсоток повітровтягнення бетонної суміші міцність знижується на 5 %.

Зниження міцності бетону веде до зниження його експлуатаційних показників і збільшення вартості готової продукції через необхідність збільшення витрат цементу. Тому найважливішим моментом технології дорожніх бетонів є правильний вибір і оптимізація кількості застосовуваних добавок, насамперед повітровтягувальних.

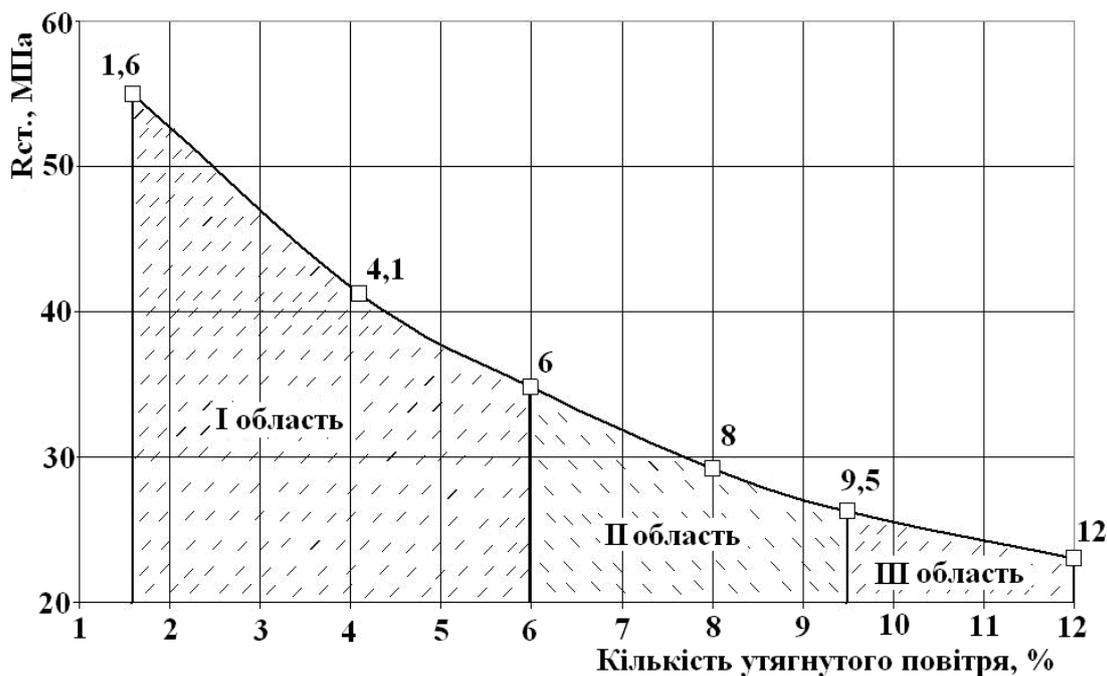


Рис. 1. Залежність міцності бетонів зі стиском від кількості залученого повітря в бетонну суміш

Критерієм морозостійкості є коефіцієнт морозостійкості ($K_{мрз}$), який є відношенням міцності бетону після певної кількості циклів випробування до міцності бетону перед початком випробувань. Дослідження морозостійкості бетону за різної кількості залученого повітря показали (рис. 2), що без повітровтягувальної добавки (склад 1) і надмірного вмісту повітря (склад 7) морозостійкість різко знижується. Бетони з повітровтягненням у діапазоні від 3,2 до 6 % мають максимальну морозостійкість F400. Однак у складі 2 (із повітровтягненням 3,2 %) міцність вище, ніж у складів 3 і 4 на 14 і 34 % відповідно. Це, за інших рівних умов, дає змогу економити до 10 – 12 % цементу.

Також зі збільшенням залученого повітря більше 4 % зростає водопоглинання на 19 %, що опосередковано характеризує відкриту пористість, і водонасичення на

24 %, що опосередковано характеризує відкриту і частково умовно замкнену пористість.

Висновки. За проведеними дослідженнями можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що нині відсутня єдина теорія морозного і морозно-сольового руйнування бетонів, що була б підтверджена практично. Сучасні теорії базовані на основоположному впливі морозостійкості та характеру пористості.

2. Встановлено існування трьох областей зниження міцності бетонів на кожен відсоток залученого повітря: у першій міцність знижується на 8...10 %, у другій – на 7...8 %, у третій – на 5 %.

3. Обсяг залученого повітря в бетонній суміш може бути зменшений до 3,2 – 3,5 % без зниження морозостійкості.

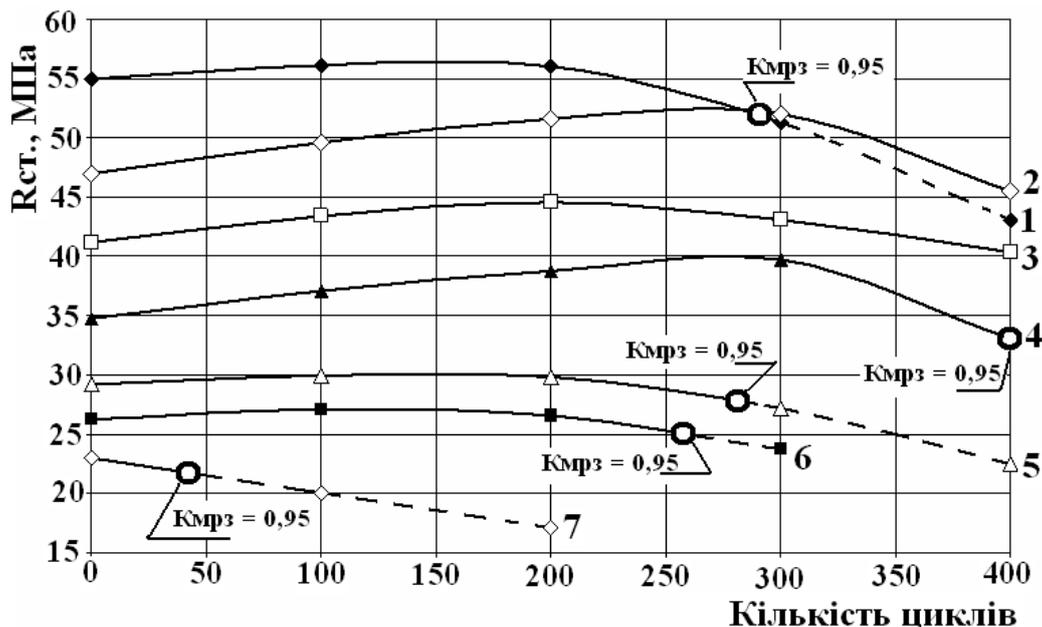


Рис. 2. Морозостійкість бетонів із різним повітрявтягненням:
 1 – 1,6 %; 2 – 3,2 %; 3 – 4,1 %; 4 – 6,0 %;
 5 – 8,0 %; 6 – 9,5 %; 7 – 12,0 %

Список використаних джерел

1. Толмачев С. Н. Развитие теории разрушения и стойкости дорожных цементных бетонов при действии агрессивных факторов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Харьков, 2013. 421 с.
2. Бражник Г. В. Вплив повітрявтягнення бетонної суміші на фізико-механічні властивості цементобетону. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. Вип. 212. С. 54 - 60.
3. Морозостійкі дорожні бетони з оптимізованим повітрявтягненням / С. М. Толмачов, І. Г. Кондратьєва, О. А. Беліченко, Г. В. Матяш. *Будівельні конструкції. Матеріали VII наук.-техн. семінару «Структура, властивості та склад бетону» «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості.* Київ: НДІБК, 2009. Вип. 72. С. 553–560.
4. Взаимосвязь воздуховсодержания бетонной смеси и морозостойкости бетона / А. В. Матяш, С. Н. Толмачев, И. Г. Кондратьева, А. Ю. Вялых. *Науковий вісник будівництва.* Харків: ХДТУБА, 2010. № 57. С. 195-202.

Бражник Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів ім. М. І. Волкова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ). ORCID iD: 0009-0004-6630-1209. Тел.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Brazhnyk Hanna, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Technology of Road Construction Materials named after M.I. Volkov, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID ID: 0009-0004-6630-1209. Tel.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.