

УДК 691.3

Катерина МІШУК,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-5480-6032

Денис БОЛОБАН,

аспірант

ORCID: 0009-0004-3796-0491

Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОБЕТОНІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДОБАВОК

У статті розглянуто перспективи підвищення ефективності неавтоклавних ніздрюватих бетонів шляхом використання мінеральних і хімічних композиційних добавок. Обґрунтовано доцільність застосування таких модифікаторів у контексті сучасних вимог до будівельних матеріалів, зокрема в умовах інтенсивної урбанізації та необхідності швидкої відбудови житла. Встановлено, що додавання мікрокремнезему, метакаоліну, тонкодисперсного доменного шлаку, суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння сприяє формуванню щільної, рівномірної та термостабільної мікроструктури цементного каменю, що суттєво впливає на експлуатаційні властивості кінцевого матеріалу.

Експериментальні дослідження показали, що застосування зазначених добавок дозволяє суттєво знизити водоцементне співвідношення (до 0,31-0,33), зменшити усадку у 4-5 разів, знизити теплопровідність, а також підвищити міцність на тиск у 2,3-2,8 раза порівняно з контрольним зразком. Особливо ефективним виявилось комплексне використання мікрокремнезему з суперпластифікатором і прискорювачем твердіння, яке забезпечує утворення стабільної дрібнопористої структури з рівномірно розподіленими порами діаметром 20-200 мкм. Спостерігалось формування щільних міжпорових перегородок, що покращує теплоізоляційні характеристики та знижує водопоглинання.

Отримані результати свідчать про доцільність і практичну ефективність використання подібних рішень у виробництві енергоефективних, довговічних і легких будівельних матеріалів нового покоління. Застосування модифікованих неавтоклавних пінобетонів є особливо актуальним у зведенні огорожувальних конструкцій, будівництві об'єктів у складних кліматичних умовах, при реконструкції пошкодженого житлового фонду, а також для швидкокомтованих будівель з підвищеними вимогами до тепло- та енергоефективності.

Ключові слова: *ніздрюватий бетон, цемент, шлак, лужна активація, піноутворювач, зола-винесення ТЕС, шлакопортландцемент.*

Постановка проблеми. У сучасному будівництві ніздрюватий бетон займає провідне місце, особливо в індивідуальному житловому секторі. Завдяки своїм властивостям, цей матеріал широко застосовується в країнах з різноманітними кліматичними умовами.

В умовах повномасштабної війни будівельна галузь зазнала значних змін: зменшилися обсяги виробництва, частину підприємств було релоковано. Водночас

потреба у швидкому, якісному відновленні пошкодженого житла створює попит на ефективні будівельні матеріали. У цьому контексті ніздрюватий бетон є перспективним як для нового будівництва, так і для реконструкції.

Серед його ключових переваг – низька теплопровідність, що досягається завдяки повітрю в порах, що забезпечує енергоефективність споруд. Формування пористої структури відбувається на ранніх етапах технологічного процесу, де важливо забезпечити відповідність між швидкістю газовиділення та розвитком реологічних властивостей суміші. Оптимізація цих параметрів дозволяє стабілізувати процес спінування й отримати матеріал із заданою структурою та високими експлуатаційними характеристиками.

Мету статті можна виокремити в наступне – покращення властивостей неавтоклавних ніздрюватих бетонів за рахунок модифікування складів добавками з урахуванням їх впливу на структуру та експлуатаційні характеристики матеріалу.

Аналіз останніх досліджень. Ніздрюватий бетон – це легкий будівельний матеріал з пористою структурою, що формується шляхом газоутворення або введенням технічної піни. До його складу входять в'язуча речовина (цемент, вапно), кремнеземисті заповнювачі (кварцовий пісок, зола), пороутворювачі (алюмінієва пудра або ПАР) і модифікуючі добавки. Такий бетон широко застосовується в огорожувальних конструкціях та для теплоізоляції.

Залежно від складу, виділяють цементні, вапняні, змішані, зольні та шлакові різновиди. За способом тверднення - автоклавні та неавтоклавні; за призначенням – теплоізоляційні, конструкційно-теплоізоляційні, конструкційні; за типом армування – неармовані, дисперсно- та класично армовані. За способом пороутворення розрізняють газобетони (реакція алюмінію з лугами) та пінобетони (введення стабільної піни).

Ключовими експлуатаційними характеристиками ніздрюватих бетонів є щільність, міцність, теплопровідність, водопоглинання та морозостійкість, які безпосередньо залежать від структурних особливостей матеріалу. Визначальними параметрами є розміри, форма, рівномірність розподілу пір, а також загальний об'єм пористості. Газобетон характеризується переважно відкритими порами неправильної (еліпсоїдної) форми, що розташовані нерівномірно, тоді як у пінобетоні пори здебільшого мають сферичну форму, вони замкнені та рівномірно розподілені по об'єму. Такі структурні особливості суттєво впливають на теплоізоляційні й механічні властивості матеріалу: замкнені пори ефективніше утримують тепло, а більш однорідна структура знижує ризики тріщиноутворення.

Автоклавні ніздрюваті бетони, завдяки спеціальному режиму тверднення в умовах високої температури та тиску, формують кристалічну структуру з домінуванням тобермориту – мінералу, що забезпечує високу міцність і стабільність матеріалу. Неавтоклавні бетони, які тверднуть у нормальних умовах, мають іншу гідратаційну структуру, де домінують менш стійкі фазові сполуки. Проте перевагами неавтоклавної методу є простота виробництва, нижчі енергозатрати та можливість виготовлення без спеціального обладнання.

Підвищити ефективність пористої структури можна шляхом створення двомодальної моделі розподілу пір, коли в бетоні одночасно формуються осередки двох різних діаметрів – великі та дрібні. Це дозволяє щільніше «упакувати» структуру за рахунок заповнення проміжків між більшими порами меншими бульбашками. Така схема сприяє підвищенню міцності, зменшенню середньої щільності матеріалу та покращенню теплоізоляційних властивостей. Для

реалізації двоимодальної структури доцільно використовувати турбулентні змішувачі високої інтенсивності, які забезпечують оптимальний розподіл піни в об'ємі суміші.

Додатково, на формування структури та властивостей ніздрюватих бетонів значний вплив мають: склад суміші, вид і кількість пороутворювача, співвідношення води та в'язучого, а також умови тверднення (температура, вологість, тривалість). Водонасичення та вік бетону теж відіграють роль: надлишкова волога знижує міцність і теплотехнічні властивості, а зрілий бетон демонструє більш стабільні характеристики. Специфічна структура ніздрюватих бетонів зумовлює анізотропність властивостей: зокрема, міцність при стисненні в напрямку, перпендикулярному до осі спучування, на 15–20 % перевищує міцність у паралельному напрямку. Це пов'язано з деформацією пір у процесі тверднення та осіданням маси під власною вагою, що надає порам овальної форми з більшою горизонтальною віссю.

Виклад основного матеріалу. У виробництві неавтоклавних ніздрюватих бетонів традиційно використовують портландцементи високих марок без мінеральних домішок. Однак через високу вартість цементу та складність автоклавної обробки, актуальним є пошук альтернативних в'язучих і модифікуючих добавок. Застосування алітового портландцементу забезпечує лужне середовище для реакції гідратації, тоді як у пінобетонах ключовим є збереження агрегативної стійкості суміші під час фазових переходів.

Підвищення якості пінобетонів досягається завдяки використанню комплексних модифікаторів, до складу яких входять тонкодисперсний доменний шлак, мікрокремнезем, метаколін, суперпластифікатори та прискорювачі твердіння. Введення таких компонентів забезпечує утворення щільної мікроструктури з порами діаметром 0,1–0,5 мм, знижує водоцементне співвідношення, підвищує міцність і морозостійкість. Оптимальні значення для тонкодисперсного шлаку становлять 30–60% від маси цементу, що дозволяє знизити його витрати на 10–20%. Найкращі результати отримано при введенні мікрокремнезему в кількості 20% ($B/C = 0,38$), що забезпечило триразове зростання міцності та економію цементу до 75 кг/м^3 .

Додавання прискорювачів твердіння (0,05–0,1% від маси цементу) не впливає на нормальну густину цементного тіста, проте сприяє швидшому набору міцності. Комплексне застосування прискорювача та суперпластифікатора (до 0,6%) дозволяє знизити водовміст до 8%, підвищуючи щільність цементної матриці.

Лабораторні дослідження показали (табл. 1), що при застосуванні в складі цементної суміші тонкодисперсного шлаку (40%) спостерігається зниження усадки та теплопровідності, а також збільшення міцності на 25–30%. Зразок з оптимальним складом (цемент, 30% шлаку, 8% модифікатора, 0,07% прискорювача) демонстрував подвоєння міцності порівняно з контрольним. Мікроструктурний аналіз засвідчив ущільнення міжпорових перегородок і рівномірний розподіл дрібних повітряних пор (20–200 мкм), що забезпечує високу однорідність структури.

Таким чином, комплексна модифікація неавтоклавного пінобетону дозволяє значно покращити його будівельно-технічні характеристики, що відкриває перспективи для його масового застосування в огорожувальних конструкціях.

Таблиця 1

Властивості модифікованих пінобетонів

№ з/п	Склад бетонної суміші, мас.%	Щільність бетон. суміші, кг/м ³	В/Т	Межа міцності на стиск, МПа/% у віці 28 діб
1	Контрольний склад	395	0,38	1,60/100
2	Склад з вмістом тонкодисперсного шлаку 40 мас.%.	385	0,36	2,10/130
3	Склад з вмістом суперпластифікатора (0,6 мас.%) та прискорювача твердіння (0,07 мас.%)	405	0,32	2,40/145
4	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%)	380	0,3	2,75/170
5	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(30 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%)	390	0,32	3,00/195
6	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%), приск. тверд. (0,07 мас.%)	385	0,31	3,20/200
7	Склад з вмістом тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), метаксаоліну (20 мас.%)	385	0,31	2,75/170
8	Склад з вмістом тонкодисперсн. шлаку(30 мас.%), приск. тверд. (0,07 мас.%), комплексн. модифікатор (8 мас.%)	380	0,31	3,35/205

Висновки. У ході проведення дослідження проаналізовано наукові та практичні підходи до створення раціонального рецептурного складу модифікованого неавтоклавного пінобетону. Особливу увагу приділено впливу різноманітних хімічних і мінеральних добавок на формування структури, фізико-механічні характеристики та експлуатаційні властивості пінобетонної суміші.

Розглянуто ефективність використання модифікаторів різної дисперсності, що дозволило зменшити загальну пористість у міжзерновому просторі, знизити деформацію усадки та забезпечити формування однорідної пористої структури. Встановлено, що використання мікрокремнезему в поєднанні з прискорювачем твердіння та ретельним гомогенізуючим перемішуванням пінобетонної маси сприяє утворенню щільних, міцних та рівномірних міжпорових перегородок.

Окрему увагу приділено впливу тонкодисперсного доменного шлаку змішаного стану, який не лише забезпечує суттєве зменшення коефіцієнта теплопровідності, але й сприяє більш рівномірному розподілу повітряних осередків у структурі матеріалу.

Теоретичні дослідження підтвердили, що підвищення міцності модифікованого пінобетону досягається завдяки раціональному підбору дисперсного складу, наявності ефективного прискорювача твердіння та активізації гідратаційних процесів на ранніх етапах структуроутворення. Це забезпечує зниження деформації усадки у 4...5 разів порівняно з контрольним зразком.

Отримані абсолютні значення усадки модифікованого пінобетону становлять 0,64...0,65 мм/м, що відповідає вимогам, встановленим для автоклавного газобетону.

Список літератури:

1. Ковальчук О.Ю., Бойко О.В., Зозулинєць В.В. Технологія виготовлення і застосування ніздрюватих бетонів: Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт. Київ : КНУБА, 2021. 13 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-29]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 41 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-164:2008. Будівельні матеріали. Вироби з ніздрюватих бетонів теплоізоляційні. Технічні умови. [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 11 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-195:2013. Конструкції стін із блоків з ніздрюватого бетону автоклавного тверднення. Загальні технічні умови. [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 64 с.
5. ДСТУ Б А.1.1-49-94. Система стандартизації та нормування в будівництві. Матеріали будівельні. Методи фізико-хімічних досліджень. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 1994. 27 с.
6. ДСТУ Б EN ISO 12572:2011 Гіротермічні характеристики будівельних матеріалів та виробів. Визначення паропроникності (EN ISO 12572: 2001, IDT). [Чинний від 2013-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 42 с.
7. Ніздрюватий бетон – можливості та перспективи ефективного стінового матеріалу. URL: <http://www.osobnyak.com.ua/spip.php?article362>
8. Пашинський В.А., Настоящий В.А., Дарієнко В.В., Товмаченко Є.О. Практичний досвід використання збірного і монолітного неавтоклавного пінобетону при зведенні енергоефективних будівель ТОВ "Будспектр". *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. Вип. 65. С. 132–136.
9. Пашинський В.А., Карпушин С.О. Методика вибору оптимальної марки ніздрюватого бетону для стін. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 66. С. 93–98.
10. Луцюк, І.В., Якимечко, Я.Б., Чеканський, Б.Б. Дослідження впливу виду вапна на властивості композиційного в'язучого за різних умов тверднення. *Збірник наукових праць ПАТ "УкрНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного"*. 2017. №17. С. 116-124.

References:

1. Kovalchuk, O.Yu., Boyko, O.V., Zozulynets, V.V. (2021). Technology of production and application of cellular concretes: Methodological instructions for conducting laboratory work. Kyiv: KNUCA. 13 p.
2. DSTU B V.2.7-45:2010. Cellular concretes. General technical requirements. [Valid from 2010-01-29]. Official edition. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine. 41 p.
3. DSTU B V.2.7-164:2008. Building materials. Heat-insulating products made of cellular concretes. Technical conditions. [Valid from 2009-07-01]. Official edition. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine. 11 p.
4. DSTU B V.2.6-195:2013. Wall structures made of autoclaved aerated concrete blocks. General technical conditions. [Valid from 2014-07-01]. Official edition. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine. 64 p.
5. DSTU B A.1.1-49-94. System of standardization and regulation in construction.

Building materials. Methods of physicochemical research. Terms and definitions. [Valid from 1995-01-01]. Official edition. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine. 27 p.

6. DSTU B EN ISO 12572:2011. Hygrothermal characteristics of building materials and products. Determination of vapor permeability (EN ISO 12572: 2001, IDT). [Actual from 2013-01-01]. Official edition. Kyiv: Minregionstroy of Ukraine. 42 p.

7. Aerated concrete – possibilities and prospects of an effective wall material. URL: <http://www.osobnyak.com.ua/spip.php?article362>

8. Pashinsky, V.A., Nastavy, V.A., Darienko, V.V., Tovmachenko, E.O. (2016). Practical experience of using prefabricated and monolithic non-autoclaved foam concrete in the construction of energy-efficient buildings of LLC "Budspectr". *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Issue 65. P. 132–136.

9. Pashinsky, V.A., Karpushyn, S.O. (2017). Methodology for choosing the optimal brand of aerated concrete for walls. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Issue 66. Pp. 93–98.

10. Lutsyuk, I.V., Yakimechko, Ya.B., Chekansky, B.B. (2017). Research on the influence of the type of lime on the properties of a composite binder under different hardening conditions. *Collection of scientific works of PJSC "UkrNII of Refractories named after A. S. Berezhny"*. No. 17. Pp. 116–124.

Kateryna MISHUK, Denys BOLOBAN

Increasing the performance characteristics of Aerated Concretes through the use of composite additives

The article examines the prospects for improving the performance of non-autoclaved aerated concretes through the use of mineral and chemical composite additives. The relevance of using such modifiers is substantiated in the context of modern construction requirements, particularly under conditions of intensive urban development and the urgent need for rapid housing restoration. It has been established that the incorporation of microsilica, metakaolin, finely ground blast-furnace slag, superplasticizers, and hardening accelerators contributes to the formation of a dense, uniform, and thermally stable microstructure of the cement matrix, which significantly affects the operational properties of the final material.

Experimental studies have shown that the use of these additives enables a substantial reduction in the water-to-cement ratio (down to 0.31–0.33), a 4–5-fold decrease in shrinkage, lower thermal conductivity, and a 2.3–2.8-fold increase in compressive strength compared to the control sample. The most effective results were achieved by combining microsilica with a superplasticizer and a hardening accelerator, which ensured the formation of a stable fine-pored structure with evenly distributed pores measuring 20–200 μm . The formation of dense inter-pore partitions was observed, which improved thermal insulation and reduced water absorption.

The obtained results confirm the feasibility and practical effectiveness of such technological solutions for the production of energy-efficient, durable, and lightweight next-generation construction materials. The use of modified non-autoclaved foam concrete is especially relevant for enclosing structures, construction in severe climatic conditions, restoration of damaged housing stock, and fast-erecting buildings with enhanced thermal and energy efficiency requirements.

Keywords: cellular concrete, cement, slag, alkaline activation, foaming agent, TPP fly ash, slag Portland cement.