

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ

УДК 691.327.33

DOI 10.31649/2311-1429-2020-2-13-23

В. Р. Сердюк¹
Д. Г. Рудченко²**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАРБОНІЗАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ
ГАЗОБЕТОНУ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДНЕННЯ**¹Вінницький національний технічний університет
²ТОВ «Аерок»

Приведений аналіз тенденцій виробництва автоклавного газобетону. Враховуючи ціновий фактор, енерго-екологічний стан розвитку промисловості будівельних стінових і теплоізоляційних матеріалів, автоклавний газобетон має значні переваги перед традиційними стіновими матеріалами та перспективи розвитку виробництва.

Дослідження довговічності автоклавного газобетону викликані збільшенням його виробництва та використанням у будівельній галузі в останні роки у зв'язку зростанням вартості енергоносіїв, та необхідністю зменшення викидів парникових газів. При цьому густина газобетону зменшилась майже в 2 рази.

При переході на виробництво автоклавного газобетону низької густини D300, D150 з однієї сторони покращуються теплофізичні характеристики газобетону, зменшується матеріалоемність виробництва, з іншої – зростають питомі витрати в'язучого (цементу) на одиницю маси газобетону та зростає його паро- та повітропроникність. Висока паропроникність та адсорбційні властивості водяних парів та газів з повітря несуть потенційну загрозу через можливу карбонізацію газобетону, «розшатування» макроструктури матеріалу при зволоженні і висушуванні, незворотніх деформаціях при заморожуванні і відтаюванні вологого газобетону, які відбуваються практично одночасно. За умови замочування, капілярного підсосу води та адсорбції водяних парів прискорюються процеси карбонізації автоклавного газобетону.

Матеріал може адсорбувати з повітря вологу та вуглекислий газ. Утворення вуглекислоти в складі газобетону приводить до зменшення лужного середовища, нейтралізації вільного вапна та руйнації гідроксидів кальцію і корозії армованих виробів.

Карбонізація одночасно може позитивно і негативно впливати на цементні бетони. За забезпечення карбонізаційної стійкості автоклавного газобетону має досягатись шляхом реалізацію низки технологічних рішень, які забезпечують підвищення карбонізаційної стійкості автоклавного газобетону при одночасному зменшенні клінкерної складової в складі мінерального в'язучого. Приведені результати використання природних мінеральних добавок гідравлічної та пуцоланічної дії в складі автоклавного газобетону.

Ключові слова: автоклавний газобетон, карбонізація, активні мінеральні добавки

Вступ

Виробництво газобетону автоклавного тверднення (долі автоклавного газобетону) масштабно розпочалося в колишньому СРСР лише в кінці 60-х на початку 70-х років минулого століття, коли було закуплено 10 сучасних, на той час, заводів в Польщі. Польща в свою чергу закупила завод в шведської компанії «Sirogex» з правом тиражування обладнання, побудувала декілька заводів в своїй країні і експортувала вже свої заводи в СРСР, в сьогодишню Чехію, Словаччину та інші країни. А на початку 70-х років колишній СРСР приступив до будівництва власних заводів і до 1990 року їх кількість досягла 96.

Якщо в 1960 році вироблялося близько 100 тис. м³ пінобетону природного твердіння, то в 1990 році обсяг виробництва автоклавного газобетону в республіках колишньому СРСР разом з республіками Прибалтики склав 6,6 млн. м³. Після розвалу СРСР і після послідуєчого падіння виробництва автоклавного газобетону новоутворені країни почали стрімко нарощувати обсяги його виробництва. Білорусія в 2014 році вийшла на максимальний рівень виробництва 3,2 млн. м³ автоклавного газобетону в рік і стала світовим лідером за відносними обсягами виробництва газобетону на душу населення і експортером цього стінового матеріалу, РФ в останні роки вийшла на обсяг виробництва 13...14 млн м³ в рік при наявності встановленої потужності 73 заводів в 17,42 млн м³ газобетону, в Україні обсяг виробництва автоклавного газобетону катастрофічно знизився з 1,2 млн. м³ до 100 тис. м³ у 2000 році, але до 2016 року обсяг його виробництва зріс до 3,6 млн. м³ на рік, а в 2019 році було вироблено біля 3,9 млн м³ газобетону, при наявності виробничих потужностей до 4,9 млн. м³.

Прийняття нових будівельних норм в Україні в 2016 році стосовно підвищення вимог термічного опору огорожувальних конструкцій будівель призвело до того, що товщина одношарових огорожувальних стін будівель з традиційних стінових матеріалів таких, як цегла

глиняна повнотіла, силікатна цегла, керамзитобетон, через низькі їх теплофізичні властивості, збільшилася в рази і стала неприйнятною для одношарових конструкцій стін. Завдяки високим констукційно-теплоізоляційним властивостям автоклавний газобетон на будівельному ринку суттєво потіснив традиційні стінові матеріали. Доля автоклавного газобетону в структурі стінових матеріалів в Україні в 2019 році становила 53 %. В Німеччині автоклавний газобетон після ефективної кераміки займає другу позицію в структурі стінових матеріалів.

При взаємодії вуглекислого газу з цементним каменем відбувається його карбонізація в результаті чого буде зменшуватись рН середовища та відбуватись руйнація гідросилікатів кальцію (C-S-H), утворення карбонату кальцію, а при наявності металевої арматури зростає ризик її корозії. В щільних залізобетонних виробках ДБН передбачають наявність захисного шару бетону для захисту арматури від корозії, оскільки в середовищі порової рідини з $pH > 7$ відбувається пасивація корозії сталі. При виробництві армованих газобетонних виробів на арматурні каркаси завчасно наноситься антикорозійне покриття.

Світові тенденції виробництва автоклавного газобетону спрямовані на зниження його щільності, при збереженні або підвищенні міцності. В газобетон низької густини швидше проникає вуглекислий газ, водяні пари. В країнах СНД в основному виробляється газобетон D500, D600 і D400, зростає обсяг виробництва марки D300, D200, а газобетон марки D700 виробляється лише на застарілих заводах в малих об'ємах, оскільки на сьогодні це економічно не вигідно. Хоча в діючому ДСТУ передбачено виробництво автоклавного газобетону від марки D100 до D1100, а в стандартах РФ до D1200. В білоруському стандарті СТБ 1570-2005 газобетон марки D1000 - D1200 взагалі відсутній.

Зменшення густини автоклавного газобетону приводить до зростання його паропроникності і потенційної карбонізації. Перехід на виробництво автоклавного газобетону низької густини потребує підвищення його карбонізаційної стійкості та зростання витрат клінкерної складової через зменшення товщини міжпорових перегородок. Хоча при цьому загальна матеріалоемність матеріалу скорочується, практично в 2 рази при переході з D600 на D300.

Мета роботи. Визначення напрямків підвищення карбонізаційної стійкості автоклавного газобетону за рахунок використання мінеральних добавок.

Результати дослідження. Автоклавний газобетон виготовляється шляхом штучного синтезу гідросилікатів кальцію CSH (переважно тоберморіту) при температурі 190...200 °C і тиску пари 1,2...1,4 МПа. Молотий кварцевий пісок в умовах автоклавної обробки газобетону виконує функцію реакційно активного компонента мінерального вяжучого. При цьому, базовою складовою вяжучого газобетонної суміші можуть виступати не тільки цемент і вапно, але і доменні гранульовані шлаки, зола-винос з високим вмістом CaO та інші техногенні мінеральні продукти.

У зв'язку з необхідністю підвищення вимог енергозбереження та прогнозованим потенційним вдосконаленням технології виробництва ніздрюватого бетону в ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови» внесені зміни - в підрозділ 4.1 перед маркою D200 додані марки D100 та D150, як ефективної мінеральної теплоізоляції. Такі зміни свідчать про очікуване підвищення теплоізоляційних властивостей екологічно чистого мінерального утеплювача, яким є автоклавний газобетон.

«Аегос» являється першим в Україні виробником автоклавного газобетону, який наладив масштабне виробництво конструкційно-теплоізоляційного газобетону марки D300 та теплоізоляційного газобетону D150, відмовився від виробництва «важкого» автоклавного газобетону D600.

Механізм дії вуглекислого газу. В результаті високої пористості газобетонні блоки адсорбують з повітря водяні пари, кисень та кислі гази: CO_2 ; SO_2 і H_2S . Необхідною умовою карбонізації газобетону є наявність в його порах капельної вологи. Відбувається дифузія CO_2 в капіляри і пори міжпорових перегородок газобетону, CO_2 розчиняється в плівках капельної вологи, що міститься в капілярах і утворюється вуглекислота (H_2CO_3).

В послідуєчому, молекули H_2CO_3 взаємодіють з вільним вапном - $Ca(OH)_2$ та гідросилікатами кальцію. За даними різних авторів, для цементного каменя максимальна швидкість карбонізації відбувається при відносній вологості 40...70%, а найменша ≤ 40 ...45 %. Якщо на стінках капілярів немає капельної вологи, карбонізації не відбувається [1, 2]. Цілком очевидно, що при експлуатаційній вологості стінової конструкції, яку прийнято вважати 4...5 % карбонізація не може розвиватися.

Літературні дані щодо властивостей автоклавного газобетону після тривалої експлуатації є

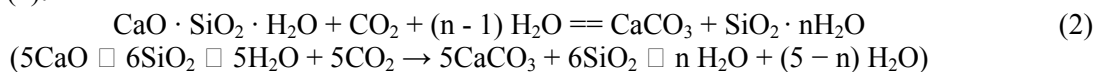
досить обмежені, а дослідження, що проводились раніше стосувались газобетону, який мав в 2-3 рази більшу густину.

Вуглекислий газ, який вступає в реакцію з Ca(OH)_2 і продуктами гідратації мінерального в'язучого приводить до нейтралізації лужного середовища з утворенням карбонату кальцію.



В результаті розкладання фази C-S-H можуть виникати одна із трьох поліморфічних форм карбонату кальцію: ветерит, кальцит, або арагоніт. Оскільки дифузія CO_2 в повітрі відбувається приблизно в 10^4 раз швидше, ніж у воді, то вологість самого бетону має вирішальне значення для швидкості карбонізації газобетону. При цьому, важливим фактором залишається не тільки рівень вологості повітря, концентрація вуглекислого газу але і наявність захисного покриття та умови експлуатації стінової конструкції.

При карбонізації гіросилікатів кальцію тоберморітової групи C-S-H, які є основними новоутвореннями в газосилікатному бетоні автоклавного твердіння, відбувається реакція, яка в технічній літературі представлена у спрощеному і більш конкретизованому вигляді щодо тоберморіту (2):



Обидва продукти реакції карбонізації (CaCO_3 і SiO_2) мають дуже низьку розчинність у воді і на думку [3] виконують функцію кольматанта. Однак кількісне співвідношення CaCO_3 до SiO_2 складає приблизно 5 до 1, тому основним кольматантом є карбонат кальцію. В умовах вуглекислотної агресії рекомендується застосовувати високоосновні цементи.

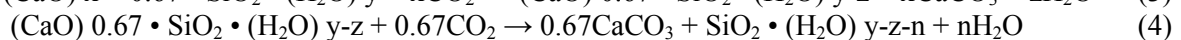
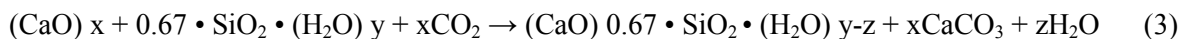
Фактично за даними[4], коли фаза C-S-H розкладається в результаті карбонізації, цей процес стає більш складним. Повільний процес карбонізації призводить до декальцифікації фази C-S-H, що призводить до більш низького співвідношенню Ca/Si. Спочатку ступінь полімеризації збільшується, тобто кремній-кисневі ланцюги подовжуються по мірі зменшення кількості іонів

Ca^{2+} в міжшаровому просторі.

По мірі видалення кальцію з структури C-S-H-фази Ca/Si-відношення знижується аж до 0,67 - в цьому випадку іони кальцію присутні в основних шарах, затиснутих між нескінченними ланцюжками силікатних тетраедрів. Повна декальцинація C-S-H-структури супроводжується її розпадом з утворенням карбонату кальцію і гідратованої аморфної кремнеземистої фази.[5]. Ці спостереження підтверджуються також в роботі [6].

В роботі [7] наведені інші хімічні реакції взаємодії CO_2 з такими гіросилікатами як: гіллебрандіт, фошагіт, ксонотліт, аффіліт, ріверсайдіт, гіроліт с утворенням CaCO_3 і SiO_2 та коефіцієнти зміни об'єму кристалічної та твердої фази. Проте найбільша увага завжди прикована саме до низькоосновних гіросилікатів кальцію, які є основними носіями міцності газобетону.

Коли відношення Ca/Si досягає значення близько 1,2 то це призводить до зменшення питомої поверхні аморфної фази C-S-H. У фазі розширеної карбонізації, коли співвідношення Ca/Si досягає значення близько 0,66, відбувається повна руйнація цієї фази, під час якої катіонна підмережа, що складається з октаедричного кальцієво-кисневого шару, руйнується і осідає гідратований силікагель. Реакції, що ілюструють двохстадійний розпад фази C-S-H, запропоновані в роботі[6] і представлені в рівняннях (3) і (4), де діапазони значень стехіометричних коефіцієнтів x і y наступні: $0 \leq x \leq 1,1$ і $0,4 \leq y \leq 2,5$.



На міцність газобетонної конструкції впливає вологісна і карбонізаційна усадка, градієнт вологості і карбонізації матеріалу по товщині стіни, які зумовлює розвиток додаткових конструкційних напружень розтягу. Однією з необхідних умов атмосферостійкості автоклавного газобетону є наявність в його структурі гіросилікатів підвищеної основності і вільного вапна. Взаємодія з газами може протікати, як гетерогенна реакція. Знаючи активність іонів в розчині і парціальний тиск газів, можливо передбачити взаємодію цементного каменю з SO_2 , з CO_2 , і з H_2S , проте найбільші негативні наслідки створює CO_2 , концентрація якого в атмосфері поступово

зростає через антропогенні викиди вуглекислого газу, що підтримує парниковий ефект і несе серйозну проблему для світової спільноти.

Наслідки карбонізації. На стадії становлення масштабного виробництва автоклавного газобетону ще в 80-ті роки минулого століття в колишньому СРСР було доказано, що карбонізація призводить до значного зниження міцності газобетону, як автоклавного, так і неавтоклавного тверднення при експлуатації в звичайних атмосферних умовах. В якості причини зниження міцності було показано вплив атмосферного вуглекислого газу на структуроутворюючі фази пористих бетонів. Карбонізація газобетону протікає набагато швидше, ніж у щільних бетонів, її швидкість за даними [8], становить в середньому 5-6 мм/рік і не зменшується в поверхневих шарах стіни, як це відбувається у важких бетонах.

У більшості опублікованих результатів досліджень карбонізації основним їх завданням було дослідження впливу карбонізації на корозію арматурної сталі і розрахунковий термін служби залізобетонних конструкцій. Про наслідки тривалої карбонізації автоклавного газобетону існують протилежні думки. За даними [9] після 43 річної експлуатації газосилікату в стінових конструкціях оздоблених цементними композиціями його міцність зменшилась лише з 4,9...5,2 МПа до 4,3...4,9 МПа, а вологість відповідно з 20...22 % до 3,2...3,5 %. Стінові конструкції оздоблені дрібним гранітним щебенем навпаки – мали міцність 7,7 МПа, та вологість 3 %.

Перевірка фізико-механічних властивостей автоклавного газобетону, який експлуатувався майже 50 років підтверджує відсутність втрати експлуатаційних властивостей. [10]. Вимірювання міцності на стиск автоклавного газобетону в залежності від терміну його експлуатації показало те, що стабільність властивостей газобетону не тільки не погіршується, але може покращуватись з часом на цілих 24 %. Дослідження показали збереження повної морозостійкості і міцності на стиск 4,2 МПа (щільність = 725 кг/м³) та 4,1 МПа (щільність = 750 кг/м³) після 21 і 40 років зберігання відповідно. Встановлено, що в автоклавному газобетоні при тривалі експлуатації збільшився вміст кальциту (CaCO₃). Кальцит може виділяється під час реакції між діоксидом вуглецю і вапном, що міститься в автоклавному газобетоні, або з вапном, що виникло під час руйнуції гідросилікатів кальцію з утворенням силікагелю. Природний процес карбонізації автоклавного газобетону не завжди має негативний вплив на морозостійкість та міцність газобетону.

Аналіз мікро- та макроструктури «старих» зразків автоклавного газобетону показав, що їх фазовий склад суттєво відрізняється від нового «свіжого» газобетону. Ці відмінності стосуються головним чином рівнем кальциту (CaCO₃), C-S-H та тобермориту. «Старий» автоклавний газобетон містить більше кальциту і менше C-S-H та тобермориту, що є цілком логічним.

Такі протиріччя наслідків природної карбонізації автоклавного газобетону, що приведені в роботах [11-12] можна пояснити багатьма причинами, адже опис їх експлуатації відсутній і носить часто епізодичний характер.

Зокрема, якщо стінова конструкція, що була побудована 40 і більше років тому, вийшла на стабільну вологість 3-4 %, після чого на її поверхню була надійно захищена від проникнення вологи з повітря, капілярного підсосу води, проникнення вуглекислого газу і періодично на її поверхню наносились додаткові захисні оздоблювальні покриття, то відбулась практична консервація газобетону і термін його експлуатації може суттєво подовжитись, як звичайного щільного бетону.

В роботі [13] підтверджено, що рівень карбонізації тісно пов'язаний саме з вологістю матеріалу і повітря. Було підтверджено, що найвищий опір до карбонізації мають гідросилікати кальцію з CaO/SiO₂ з співвідношення в межах 0,67 і 0,75, та продукти гідратації в гідротермальних умовах виробництва автоклавного газобетону [6].

Переважає більшість дослідників і реальне обстеження «старого» газобетону свідчить про його стійкість до карбонізації, але враховуючи те, що середня його густина за останні роки знизилась майже в 2 рази, тому найбільш прийнятним рішенням є використання в технології виробництва газобетону карбонатних добавок в комплексі з іншими гідралічними добавками, для підвищення карбонізаційної стійкості і зменшення клінкерної складової.

Оцінка карбонізаційної стійкості газобетону. Карбонізація розпочинається з поверхні бетонної конструкції і поступово з плином часу продовжується через дифузію CO₂ її товщу. При натуральних обстеженнях оцінка глибини карбонізації проводиться простим методом нанесення розчину фенолфталеїну на поверхню керна, що висвердлений з конструкції. При наявності лужного середовища безкольоровий розчин фенолфталеїну змінює колір матеріалу на малиновий (рожевий), відсутність забарвлення вказує на втрату бетоном лужних властивостей.

В ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови» в обов'язковому додатку «В» передбачена методика визначення коефіцієнта паропроникності газобетону. Сутність методу полягає у створенні стаціонарного потоку парів води крізь зразок бетону та у визначенні величини цього потоку. Коефіцієнт паропроникності μ мг/(м год Па), характеризує кількість водяної пари в міліграмах, яка проходить за одну годину крізь шар матеріалу площею 1 м та завтовшки 1 м, при умові, що температура повітря з обох сторін шару однакова, а різниця парціального тиску водяної пари становить 1 Па.

В даний час вивчення карбонізації пористих бетонів в європейських країнах проводиться відповідно до двох основних європейських стандартів PN-EN 13295:2005 [14] і PN-EN 14630: 2007 [15].

Як правило, прискорені випробування проводяться при постійній відносній вологості повітря від 50 до 70 % в умовах, коли процес карбонізації відбувається більш інтенсивно. Найбільш часто використовується концентрація CO₂ в діапазоні від 1 до 5 %. При такій концентрації інтенсивності процесу у багато разів вище, що при приєднаних атмосферних умовах.

У контексті європейського стандарту EN 771, що визначає елементи кам'яної кладки, необхідні додаткові критерії, які стосуються довговічності. На даний момент довговічність визначається на основі результатів випробувань на стійкість до замерзання / відтаюння. Деякі автори з різних країн пропонують перевіряти вплив вуглекислого газу на властивості автоклавного газобетону з використанням універсальної методики випробувань, що враховує природні атмосферні умови, але вони є досить довготривалими.

Використання карбонатної добавки. Цілком очевидно, що наявність в складі автоклавного газобетону вільної Са(ОН)₂ або СаСО₃ на певному етапі може «оберігати» від руйнування вуглекислим газом низькоосновних гідросилікатів кальцію, переважно тоберморіту.

В роботі [16] приведені результати порівняльних показників карбонізації автоклавного газобетону в середовищі 100% концентрації CO₂ без і з добавкою карбонатного наповнювача протягом 3, 10 і 40 діб (табл. 1).

Таблиця 1

Динаміка карбонізації автоклавного газобетону без і з карбонатною добавкою в середовищі 100% концентрації вуглекислого газу

100 % концентрація CO ₂	Карбонізація, %		
	3 доби	10 діб	40 діб
Тривалість карбонізації, діб	3 доби	10 діб	40 діб
Газобетон з добавкою карбоната кальцію	15,55	21,68	23,95
Газобетон без добавки карбоната кальцію	40,23	41,14	42,05

Як видно з табл. 1 при наявності в газобетоні карбонатного мікронаповнювача рівень його карбонізації приблизно в 2-3 рази нижчий ніж в зразках без добавки. Газобетон без добавки найбільш інтенсивно карбонізується в перші три доби, а після 20 добової карбонізації міцність карбонізація суттєво уповільнюється. А після 40 добової карбонізації міцність на розтягування при згині у газобетону контрольного складу зменшилась на 24,0 %, тоді як у газобетону з карбонатною добавкою лише на 11,8 %. При карбонізації зростає усадка газобетону і відбувається це через руйнування гідросилікатів кальцію і втрати гелем кремнекислоти хімічно зв'язаної води. Вплив карбонізації на бетон з карбонатною добавкою проявляється в меншій мірі, ніж на бетон без добавок.

СН 277-80 рекомендує вводити до складу автоклавного газобетону до 20 % карбонатної добавки від маси цементу. З природних мінеральних добавок, особливо велика увага в технології пористих бетонів, як нам представляється, займає опоковидний мергель (ОМ). Вміст карбонатної і кременистої складової в складі ОМ можуть змінюватися в ту чи іншу сторону. Мінералогічна цінність ОМ полягає в тому, що в складі карбонатно-кременистої складової міститься: кальцит - 35...38 %, змішані глинисто-карбонатні компоненти - 10...20 %, цеоліти - 10...20 %, опал до 15 %. В результаті проведеного РФА було виявлено, що кристалічна фаза опоковидного мергелю чітко представлена кварцом ($d = 4,27; 3,353; 2,29; 2,13; 1,98; 1,82 \dots \text{Å}$), кальцитом СаСО₃ ($d = 3,042; 2,847; 2,500; 2,288; 2,096; 1,915; 1,878 \dots \text{Å}$), іншими оксидами. Особливість хімічного і

мінералогічного складу цієї добавки в тому, що вона являється добавкою полі функціональної дії в складі газобетону.

Враховуючи доказану ефективність карбонатних добавок для підвищення карбонізаційної стійкості та економії мінерального в'язучого доцільно поєднати їх використання з мінеральними добавками гідравлічної дії, наприклад з доменним гранульованим шлаком (ДГШ). Як відомо в умовах автоклавної обробки використання ДГШ в складі газобетону забезпечує збільшення його міцності [17].

При проведенні випробувань в якості карбонатної добавки нами була вибрана добавка опоковидного мергелю (ОМ), великі поклади якого розміщені на лівобережжі Дністра південна частина Вінницької, Хмельницької областей [18]. Всі складові ОМ (CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3), безпосередньо приймають участь в автоклавному синтезі новоутворень автоклавного газобетону.

В табл. 2 приведений хімічний склад сировинних компонентів газобетону.

Таблиця 2

Хімічний склад компонентів в'язучого автоклавного газобетона D300

Оксид	Вміст основних оксидів, мас.%			
	Портландцемент ПЦ II/A-III-500 з добавкою ДГШ, відповідно до Сертифіката якості	ОМ (Могилів-Подільський)	ДГШ ПАО «АрселорМиттал», Відповідно до Сертифіката якості	Природний гіпсовий камінь
SiO_2	22,86	75...96,5	38,13	0,36
Al_2O_3	4,55	0,99...10,6	7,34	0,18
Fe_2O_3	4,11	0,15...2,6	0,2...1,0	0,18
TiO_2	-	0...0,14	0,28	-
CaO	61,9	0,75...10,0	45,5	32,5
MgO	1,11	0,05...0,95	7,6	0,53
SO_3	1,82	0,2...0,62	-	44,0
$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	0,41	0,42...0,8	0,5...1,5	-

Для оцінки ефективності комплексної добавки був прийнятий склад сировинної газобетонної суміші густиною 300 кг/м^3 , яка використовується в промисловому виробництві. Склад сировинних матеріалів на 1 м^3 газобетону наступний: цемент 118 кг/м^3 , вапно $16,7 \text{ кг/м}^3$, піщаний шлам (сухий залишок) 157 кг/м^3 з них пісок 141 кг/м^3 , гіпсовий камінь 16 кг/м^3 , зворотний шлам (сухий залишок) 53 кг/м^3 або 15 % від усіх сухих.

На початковому етапі на стадії формування макроструктури сирця при зростанні пластичної міцності за наявності додаткової добавки гіпсу, Al_2O_3 (в складі цементу, ДГШ, ОМ, алюмінієвій пудрі) в суміші утворюється етtringіт. Реалізація технологічного примусового синтезу етtringіту на стадії формування газобетонної суміші з високим В/Т відношенням ($\text{В/Т} = 0,66$) прискорює приріст пластичної міцності газобетонного сирця та дає змогу компенсувати частину цементу, яку може замінити ДГШ, основна зола-винос та інші мінеральні добавки.

Гідравлічна активність ДГШ суттєво зростає в умовах гідротермальної обробки, а пуцоланова активність обумовлена наявністю в складі карбонатної добавки активного кремнезему (SiO_2) і глинозему (Al_2O_3). До групи пуцоланів відноситься ціла група природних осадових добавок (діатоміт, трепел, опоки, ін). Активні мінеральні добавки природного і техногенного походження являються ефективною складовою сучасних цементів.

За даними [19] добавка вапняку в цементі аналогічно добавці гіпсу може регулювати і впливати на схваткування цементу і швидкість реакцій гідратації C_3A і C_3S . Найкращий ефект від застосування вапняку в цементі досягається при підвищеному вмісті C_3A в клінкері. Вапняк не є інертним розчинником, в процесі гідратації портландцементу реагує з C_3A з утворенням карбоалюмінатов кальцію. При цьому має місце утворення, як висококарбонатної форми карбоалюміната $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, так і низькокарбонатної $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Ці новоутворення в певній мірі є аналогами високосульфатної форми (етtringіта) і моноссульфатної форми сульфалюмінатов кальцію. Вони виконують важливу роль на стадії

формування макроструктури газобетонного сирця при високому В/Т відношенні суміші при литьєвій технології виробництва автоклавного газобетону.

Використання карбонатної добавки в цементах забезпечує зменшення нормальної густоти цементного тіста на 8,2 % та прискорює початок тужавіння цементу на 50 хв. (табл. 3) [20], що є позитивним і для технології автоклавного газобетону.

Таблиця 3

Вплив тонкомеленого вапняку на нормальну густоту та терміни тужавіння портландцементу ПЦ II/A-III

Вміст вапняку, мас. %	НГТ, %	Термін тужавіння, год-хв	
		початок	кінець
б/д	27	3-20	5-20
5	26	3-10	4-40
10	26	3-00	4-10
15	25	2-50	3-30
20	24	2-10	3-10

З сировинної суміші газобетону D300 без газоутворювача формувалися стандартні балочки, які по аналогії з автоклавним газобетоном повторювали всі технологічні етапи його виробництва. В усіх зразках, крім контрольного, вводилась добавка ДГШ 15% замість цементу та добавка 4...5 % гіпсового каменю. Карбонатна добавка (ОМ) вводилась в широкому діапазоні 5...20 %. На рис. 1 і рис. 2 приведені результати впливу карбонатної добавки на властивості автоклавного газобетону.

Відповідно до аналітичних узагальнень та існуючої практики виробництва автоклавного газобетону кожний компонент суміші виконує певні функції, які забезпечують підвищення карбонізаційної стійкості, одночасно інтенсифікують процес зростання пластичної міцності газобетонного сирця на стадії формування макроструктури суміші, за рахунок утворення етtringіту сприяють покращенню якості макроструктури газобетону на стадії формування суміші:

- добавка ОМ підвищує карбонізаційну стійкість автоклавного газобетону, приймає участь в утворенні етtringіту;
- гіпсова добавка гальмує гідратацію вапна-кипільки, сприяє утворенню етtringіту на стадії формування макропористості і інтенсифікує утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію в процесі автоклавної обробки газобетону;
- добавка ДГШ забезпечує економію клінкерної складової в'язучого, забезпечує зростання морозостійкості газобетону.

На рис. 1 приведені результати впливу добавки ОМ на міцність газобетону на згин.

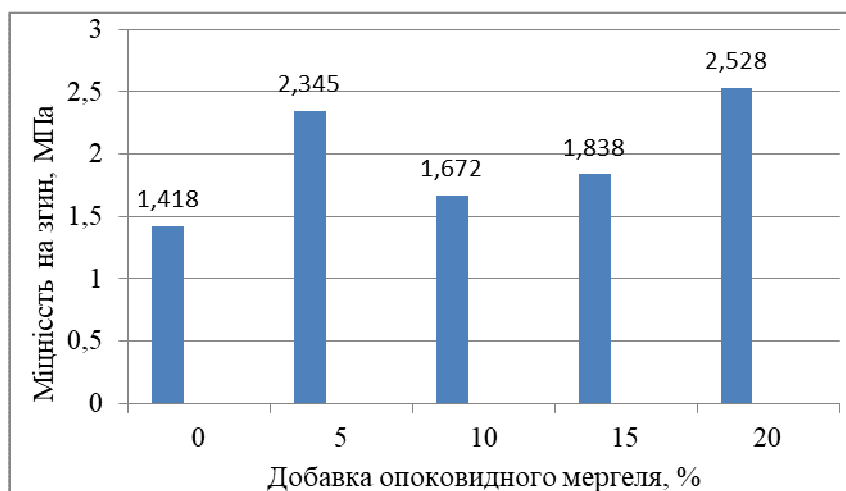


Рисунок 1 – Динаміка впливу добавки ОМ на міцність газобетону при згині

Як видно з рис. 1 карбонатна добавка забезпечує значний приріст міцності на згин – біля 80 % від показника контрольного зразка. При чому, максимальний приріст міцності забезпечується при добавці 5 та 20 %, а при проміжні дозівовці 10 та 15 % приріст є дещо меншим.

Заміна 10-15 % цементу добавкою ДГШ в складі газобетонної суміші при наявності додаткового вмісту карбонатної добавки ОМ і гіпсової добавки компенсує частину вилученого клінкерного в'язучого та забезпечує інтенсивний приріст пластичної міцності газобетонного сирця без подовження термінів дозрівання газобетонної суміші. Високе значення В/Т забезпечує можливість формування газобетону низької густини D300, D200 та D150 та вписуватись в різальну технологію виробництва автоклавного газобетону при збереженні всіх інших технологічних етапів його виробництва.

На рис. 2 приведені показники впливу карбонатної добавки (ОМ) на міцність при стиску.



Рисунок 2 – Динаміка впливу карбонатної добавки (ОМ) на міцність газобетону на стиск

Як видно з рис. 2 добавка опоковидного мергеля при дозівовці 5 % забезпечує приріст міцності на стиск на 10 %, а при 10 і 15 % приводить до зменшення міцності на стиск, а при дозівовці 20 % практично зберігається міцність контрольного зразка. Таким чином, найбільший позитивний ефект забезпечує добавка 20 %, але досить привабливим варіантом є дозівовка 5 %, коли максимально зростає міцність на згин і на стиск.

Враховуючи те, що автоклавний газобетон низької густини (D150, D200 і D300) характеризується високою паро- і повітропроникністю, адсорбційними властивості вологи з повітря, більш підвержений карбонізації, тому наявність карбонатної добавки в його складі слід розглядати як обов'язкову складову сировинної суміш. Крім того, одним з відомих недоліків газобетону є його низька міцність на згин. Ця проблема традиційно вирішується шляхом використання різноманітних полімерних фібр та азбестових волокон. Отриманий позитивний ефект дії карбонатної добавки щодо зростання міцності на згин потребує детального дослідження.

Висновки

- Збільшення нормативних вимог термічного опору огорожувальних конструкцій будівель, зростання цін на енергоносії та світові тенденції щодо обмеження викидів парникових газів привели до стрімкого зростання виробництва автоклавного газобетону.
- Світові тенденції виробництва автоклавного газобетону спрямовані на зменшення його густини при зростанні або збереженні його міцності, що забезпечує зменшення його матеріалоемності але приводить до зростання паро- і повітряпроникності.
- Цементні матеріали протягом свого життєвого циклу піддаються негативному впливу чинників, що впливають на їх довговічність. Одним з них є вуглекислий газ, який реагує з водою в порах та утворює вуглекислоту, яка в подальшому вступає в реакцію з гідроксидом кальцію та гідросилікатами кальцію. Карбонізація може позитивно і негативно впливати на властивості газобетону. Наявність високоосновних гідросилікатів кальцію в цементному тісті, гідросилікатів гідротермального синтезу та карбонатних добавок зменшує деструктивні процеси в газобетоні від впливу CO₂.

- Використання карбонатної добавки (ОМ), додаткової добавки гіпсу та ДГШ в оптимальному співвідношенні забезпечує підвищення карбонізаційної стійкості автоклавного газобетону низької щільності та покращує його властивості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев С. Н., Розенталь Н. К. Коррозионная стойкость конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1976.–205 с.
2. Штарк Й. Долговечность бетона / Штарк Й., Вихт Б. Пер. с нем. – А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. – Киев.: «Оранта», 2004. – 239 с.
3. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М., Кафтаева М.В. К вопросу о механизме углекислотной коррозии строительных материалов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5-1. – С. 19-26.
4. Chen J.J., Thomas J.J., Jennings H.M. Decalcification shrinkage of cement paste. *Cem. Concr. Res.* 2006; 36: 801-809.
5. Шошин Е.А. Исследование деградации наноструктуры C-S-H-фаз модифицированного цементного камня в процессе декальцинации / Е. А. Шошин, А. В. Поляков, А. М. Буров // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. - 2016. - № 2. - С. 25-31.
6. Sevelsted T.F., Skibsted J. Cement and Concrete Research Carbonation of C-S-H and C-A-S-H samples studied by ¹³C, ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. *Cem. Concr. Res.* 2015; 71: 56-65.
7. Бабков В.В., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Резвов О.А., Самофеев Н.С. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения. *Инженерно-строительный журнал*, №8, 2010. – С.28-31.
8. Удачкин И. Б., Александров Г. Г. Защита ячеистых бетонов от коррозии.– Киев: Будивельник, 1982.– 80 с.
9. Власов В.В., Барсукова Л.Г., Кривнева Г.Г., Баутина Е.В. Структурные изменения ячеистого силикатного бетона в ограждающих конструкциях после длительной эксплуатации/ *Строительные материалы*. 2008. №1. – С.18-19.
10. How to cite this article: Zapotoczna-Sytek G. Durability of autoclaved aerated concrete based on polish experience. *cepapers*. 2018;2:53–62. <https://doi.org/10.1002/cepa.850>.
11. Силаенков Е. С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. –М., Стройиздат, 1986. – 176 с.
12. How to cite this article: Zapotoczna-Sytek G. Durability of autoclaved aerated concrete based on polish experience. *cepapers*. 2018;2:53–62. <https://doi.org/10.1002/cepa.850>.
13. Parrott L.J. Carbonation, moisture and empty pores. *Adv Cem Res.* 1992;4:111–118.
14. PN-EN 13295:2005. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance to carbonation] i PN-EN 14630: 2007.
15. PN-EN 14630:2007. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method].
16. Воробьев А.А., Елфимов В.И. Влияние карбонатных добавок на долговечность ячеистых бетонов. *Вестник РУДН, сер. Инженерные исследования*, 2001, №1,–С.86-89.
17. Рудченко Д.Г., Дюжилова Н.О, Сердюк В.Р. Оцінка можливості застосування доменних гранульованих шлаків в технології виробництва автоклавного газобетону. *Вісник ОДАБА*. Випуск №79. 2020. –С.117-126].
18. Вінницька ОДА. Доповідь про стан навколишнього природного середовища у Вінницькій області. 2017. 247с. *Електронний ресурс*. Режим доступа: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/10/42320198.pdf>.
19. Штарк Й., Бернд В. Цемент и известь / Пер. с нем. А. Тулаганова под ред. П. Кривенко. – К.: Оранта, 2008. – 480с.
20. Кропивницька Т. П., Саницький М. А., Гев'юк І. М. Вплив карбонатних добавок на властивості портландцементу композиційного. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” : Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. - С. 214–220.

REFERENCES

1. Alekseyev S. N., Rozental' N. K. Korrozionnaya stoykost' konstruksiy v agressivnoy promyshlennoy srede. М.: Stroyizdat, 1976.–205 s.
2. Shtark Y. Dolgovechnost' betona / Shtark Y., Vikht B. Per. s nem. – A. Tulaganova. Pod red. P. Krivenko. – Kiyev.: «Oranta», 2004. – 239 s.
3. Anikanova T.V., Rakhimbayev SH.M., Kafayeva M.V. K voprosu o mekhanizme uglekislotnoy korrozii stroitel'nykh materialov // Fundamental'nyye issledovaniya. – 2015. – № 5-1. – С. 19-26.
4. Chen J.J., Thomas J.J., Jennings H.M. Decalcification shrinkage of cement paste. *Cem. Concr. Res.* 2006; 36: 801-809.
5. Shoshin Ye.A. Issledovaniye degradatsii nanostrukturny C-S-H-faz modifitsirovannogo tsementnogo kamnya v protsesse dekal'tsinatsii / Ye. A. Shoshin, A. V. Polyakov, A. M. Burov // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. - 2016. - № 2. - S. 25-31.
6. Sevelsted T.F., Skibsted J. Cement and Concrete Research Carbonation of C-S-H and C-A-S-H samples studied by ¹³C, ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. *Cem. Concr. Res.* 2015; 71: 56-65.
7. Babkov V.V.,Kuznetsov D.V., Gaysin A.M., Rezvov O.A., Samofeyev N.S. Problemy ekspluatatsionnoy nadezhnosti naruzhnykh sten zdaniy na osnove avtoklavnykh gazobetonnnykh blokov i vozmozhnosti ikh zashchity ot uvlazhneniya. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, №8, 2010. – С.28-31.
8. Udachkin I. B., Aleksandrov G. G. Zashchita yacheistykh betonov ot korrozii.– Kiyev: Budivel'nik, 1982.– 80 s.
9. Vlasov V.V., Barsukova L.G., Krivneva G.G., Bautina Ye.V. Strukturnyye izmeneniya yacheistogo silikatnogo betona v ograzhdayushchikh konstruksiyakh posle dlitel'noy ekspluatatsii/ *Stroitel'nyye materialy*. 2008. №1. – С.18-19.
10. How to cite this article: Zapotoczna-Sytek G. Durability of autoclaved aerated concrete based on polish experience. *cepapers*. 2018;2:53–62. <https://doi.org/10.1002/cepa.850>.
11. Silayenkov Ye. S. Dolgovechnost' izdeliy iz yacheistykh betonov. – М., Stroyizdat, 1986. – 176 s.

12. How to cite this article: Zapotoczna-Sytek G. Durability of autoclaved aerated concrete based on polish experience. *cepapers*. 2018;2:53–62. <https://doi.org/10.1002/cepa.850>.
13. Parrott L.J. Carbonation, moisture and empty pores. *Adv Cem Res*. 1992;4:111–118.
14. PN-EN 13295:2005. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance to carbonation] i PN-EN 14630: 2007.
15. PN-EN 14630:2007. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method].
16. Vorob'yev A.A., Yelfimov V.I. Vliyaniye karbonatnykh dobavok na dolgovechnost' yacheistyx betonov. *Vesnik RUDN, ser. Inzhenernyye issledovaniya*, 2001, №1, -S.86-89.
17. Rudchenko D.G., Dyuzhilova N.O, Serdyuk V.R. Otsinka mozhlivosti zastosuvannya domennikh granul'ovanikh shlakiv v tekhnologii virobnitstva avtoklavного газобетону. *Vіsник ODABA. Vipusk №79*. 2020. –S.117-126.
18. Vinnits'ka ODA. Dopovid' pro stan navkolishn'ogo prirodного seredovishcha u Vinnits'kiy oblasti. 2017. 247s. Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/10/42320198.pdf>.
19. Shtark Y., Bernd V. Tsement i izvest' / Per. s nem. A. Tulaganova pod red. P. Krivenko. – K.: Oranta, 2008. – 480s.
20. Kropivnits'ka T. P., Sanits'kiy M. A., Gev'yuk I. M. Vpliv karbonatnykh dobavok na vlastivostі portlandsementu kompozitsiynogo. *Vіsник Natsional'nogo unіversitetu "L'viv's'ka polіtekhніка"* : Teoriya i praktika budivnitstva. 2013. № 755. - S. 214–220.

Сердюк Василь Романович – д. т. н, професор, професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. E-mail: serdyukvr@vntu.edu.ua. ORCID: 0000-0003-2927-629X.

Рудченко Дмитро Геннадійович – к.т.н., генеральний директор ТОВ «Аерок». E-mail: aeroc@aeroc.ua.

В. Р. Сердюк¹
Д. Г. Рудченко²

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАРБОНИЗАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГАЗОБЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

¹Винницкий национальный технический университет

²ТОВ «Аерок»

Приведенный анализ тенденций производства автоклавного газобетона. Учитывая ценовой фактор, энерго- экологические состояние развития промышленности строительных стеновых и теплоизоляционных материалов, автоклавный газобетон имеет значительные преимущества перед традиционными стеновыми материалами и перспективы развития производства.

Исследование долговечности автоклавного газобетона вызванные увеличением его производства и использованием в строительной отрасли в последние годы в связи ростом стоимости энергоносителя, и необходимостью уменьшения выбросов парниковых газов. При этом плотность газобетона уменьшилась почти в 2 раза.

При переходе на производство автоклавного газобетона низкой плотности D300, D150 с одной стороны улучшаются теплофизические характеристики газобетона, уменьшается материалоемкость производства, с другой - растут удельные расходы вяжущего (цемента) на единицу массы газобетона и растет его паро- и воздухопроницаемость. Высокая паропроницаемость и адсорбционные свойства водяного пара и газов из воздуха несут потенциальную угрозу из-за возможной карбонизацию газобетона, «розшатування» макроструктуры материала при увлажнении и высушивании, необратимым деформациям при замораживании и оттаивания влажной газобетона, которые происходят практически одновременно. При замачивания, капиллярного подсоса воды и адсорбции водяных паров ускоряются процессы карбонизации автоклавного газобетона.

Материал может адсорбировать из воздуха влагу и углекислый газ. Образование углекислоты в составе газобетона приводит к уменьшению щелочной среды, нейтрализации свободной извести и разрушения гидросиликатов кальция и коррозии армированных изделий.

Карбонизация одновременно может положительно и отрицательно влиять на цементные бетоны. По печение карбонизационной устойчивости автоклавного газобетона имеет достигаться путем реализации ряда технологических решений, обеспечивающих повышение карбонизационной устойчивости автоклавного газобетона при одновременном уменьшены клинкерной составляющей в составе минерального вяжущего. Приведены результаты использования природных минеральных добавок гидравлической и пуццоланическими действия в составе автоклавного газобетона.

Ключевые слова: автоклавный газобетон, карбонизация, активные минеральные добавки

Сердюк Василий Романович – д.т.н., профессор, профессор кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета. E-mail: modser@i.ua.

Рудченко Дмитрий Геннадиевич – к.т.н., генеральный директор ООО «Аэрок».

V. Serdyuk¹
D. Rudchenko²

ENSURING CARBONIZATION RESISTANCE OF AUTOCLAVE HARDENED CONCRETE CONCRETE

¹Vinnitsia National Technical University
²Aerok LLC

The analysis of tendencies of production of autoclaved aerated concrete is resulted. Given the price factor, energy and environmental status of the industry of construction wall and insulation materials, autoclaved aerated concrete has significant advantages over traditional wall materials and prospects for production.

Studies of the durability of autoclaved aerated concrete are due to the increase in its production and use in the construction industry in recent years due to rising energy costs and the need to reduce greenhouse gas emissions. At the same time, the density of aerated concrete decreased almost 2 times.

The transition to the production of low-density autoclaved aerated concrete D300, D150 on the one hand improves the thermophysical characteristics of aerated concrete, reduces material consumption, on the other - increases the specific cost of binder (cement) per unit mass of aerated concrete and increases its vapor and air permeability. High vapor permeability and adsorption properties of water vapor and gases from the air pose a potential threat due to possible carbonization of aerated concrete, "loosening" of the macrostructure of the material during wetting and drying, irreversible deformation during freezing and thawing of wet aerated concrete, which occur almost simultaneously. Under the conditions of soaking, capillary suction of water and adsorption of water vapor, the processes of carbonization of autoclaved aerated concrete are accelerated.

The material can adsorb moisture and carbon dioxide from the air. The formation of carbon dioxide in aerated concrete reduces the alkaline environment, neutralizes free lime and the destruction of calcium hydrosilicates and corrosion of reinforced products.

Carbonization can have both positive and negative effects on cement concrete. To ensure the carbonization stability of autoclaved aerated concrete should be achieved by implementing a number of technological solutions that increase the carbonization resistance of autoclaved aerated concrete while reducing the clinker component in the mineral binder. The results of the use of natural mineral additives of hydraulic and pozzolanic action in the composition of autoclaved aerated concrete are given.

Key words: autoclaved aerated concrete, carbonization, active mineral additives

Serdyuk Vasyl Romanovich – Dr. sciences, professor, professor of the Department of Construction, Urban Management and Architecture of Vinnitsia National Technical University.

Rudchenko Dmitry – Ph.D., General Director of "Aerok".