

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 666.973

МІНЕРАЛЬНІ ДОБАВКИ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНУ

Канд. техн. наук Д. Г. Рудченко, д-р техн. наук В. Р. Сердюк

MINERAL ADDITIVES IN THE TECHNOLOGY OF AUTOCLAVE CONCRETE CONCRETE PRODUCTION

PhD (Tech) D. Rudchenko, Dr. (Tech.) V. Serdyuk

***Анотація.** Будівельна галузь є одним з найбільших споживачів енергетичних та сировинних ресурсів і, як наслідок, несе відповідальність за надмірні викиди парникових газів. Доля автоклавного газобетону (АГБ) в структурі стінових матеріалів багатьох європейських країн становить 50 % і більше. Через низьку енергоємність виробництва, високі експлуатаційні та будівельно-технологічні властивості, відносно низьку вартість та екологічність цей матеріал витісняє з будівельного ринку традиційні стінові матеріали (керамічну і силікатну цегли, керамзитобетон).*

В статті наведено аналіз сучасних підходів зменшення енергоємності виробництва автоклавних газобетонів за рахунок впровадження сучасних технологічних рішень, які забезпечують зменшення клінкерної складової у газобетонній суміші. Показано перспективи використання золи-винос, доменних гранульованих шлаків, інших мінеральних добавок, які сприяють скороченню витрат цементу та покращують експлуатаційні властивості газобетону автоклавного тверднення (АГБ).

Показано, що найбільш прийнятним технологічним прийомом зменшення ресурсо- та енергозбереження технології виробництва АГБ є перехід на виробництво матеріалу низької густини при збереженні його фізико-механічних властивостей.

Наведено результати оцінювання добавки метакаоліну в складі АГБ. Пошук недорогих і доступних місцевих ефективних пуцоланових добавок дає змогу підвищити економічну та екологічну привабливість виробництва автоклавного газобетону. Встановлено, що добавка метакаоліну може виступати як альтернативний компонент в газобетонній суміші і замінити гіпсову добавку.

Добавки кальцинованої глини, зокрема метакаоліну $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, відносяться до ефективних пуцоланових добавок. Проведені лабораторні і експериментальні дослідження в промислових умовах довели зростання фізико-механічних властивостей автоклавного газобетону.

Ключові слова: автоклавний газобетон, енергозбереження, активні мінеральні добавки, метакаолін.

***Abstract.** The construction industry is one of the largest consumers of energy and raw materials. It is also responsible for excessive greenhouse gas emissions. The share of autoclaved aerated concrete (AAC) in the structure of wall materials in many European countries reaches 50 % and more. Due to low energy consumption of production, high operational and construction-*

technological properties, relatively low cost, and environmental friendliness, these materials displace traditional wall materials from the construction market (ceramic and silicate bricks, expanded clay concrete).

The article presents an analysis of modern approaches to reducing the energy consumption during AAC production, such as reducing the clinker component in the aerated concrete mixture. Prospects for the use of fly ash, blast furnace granulated slag and other mineral additives that reduce cement consumption and improve the performance of AAC are presented.

It is shown that the most acceptable technological method of reducing the resource and energy saving technology of AAC production is the transition to the production of low-density material while maintaining its physical and mechanical properties.

The results of the evaluation of metakaolin additives in the composition of AAC are given. Inexpensive and affordable local effective pozzolanic additives can increase the economic and environmental attractiveness of autoclaved aerated concrete. It is established that the addition of metakaolin can act as an alternative component in aerated concrete mixtures and replace gypsum additive.

Additives of calcined clay, in particular metakaolin $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ is one of the most effective pozzolanic additives. Laboratory and experimental studies have shown an increase in the physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete.

Keywords: autoclaved aerated concrete, energy saving, active mineral additives, metakaolin.

Вступ. Глобальні зміни клімату, виснаження природних ресурсів і порушення світової екологічної системи пов'язані, в тому числі, і з будівельним комплексом. Будівлі світу використовують близько 40 % всієї споживаної первинної енергії, 67 % всієї електрики, 40 % всієї сировини і 14 % всіх запасів питної води, а також виробляють 35 % всіх викидів вуглекислого газу і мало не половину всіх твердих міських відходів [1].

Необхідність зменшення енерговитратності в будівельній галузі пов'язана не тільки з вичерпністю викопних видів палива та зростанням його вартості, але і з необхідністю зменшення викидів парникових газів. Надмірне спалювання викопних вуглеводнів та зростання викидів парникових газів суттєво впливають на розвиток економіки в цілому. За даними дослідження, опублікованого британською благодійною організацією Christian Aid, у 2021 р. в результаті 10 найбільш руйнівних кліматичних катаклізмів (урагани і шторми, засуха) нанесено збитків у розмірі 170 млрд дол.

Основним стіновим матеріалом у багатьох європейських країнах на сьогодні став АГБ. Його питома вага в структурі

стінових матеріалів в Україні перевищує 53 %, і він стрімко витісняє з будівельного ринку енергомісткі на стадії виробництва керамічну і силікатну цегли та керамзитобетон.

Конструкційно-теплоізоляційний АГБ з класом міцності на стиск С1,5–С2 і щільністю 300-400 кг/м³ одночасно забезпечує несучу здатність стін малоповерхових будинків і не потребує додаткового утеплення при прийнятній товщині стіни 350–400 мм. Коефіцієнт теплопровідності газобетону D300 в сухому стані становить 0,08 Вт/м·К, а в умовах експлуатації з урахуванням рівноважної вологості (4–6 %) становить 0,095 Вт/м·К, що практично в 5-7 разів нижче, ніж у традиційної керамічної цегли. Саме через високі теплоізоляційні властивості на стадії експлуатації та низьку енергозатратність на стадії виробництва АГБ продовжує витісняти з будівельного ринку традиційні стінові матеріали. Причому, такі тенденції зміни структури стінових матеріалів відбуваються і в країнах, які багаті на природні джерела вуглеводнів, – в Казахстані, РФ.

Енерговитрати при виробництві АГБ в 1,8-2,7 раза менші, ніж при виробництві

керамічних блоків і глиняної цегли, а витрати теплової енергії при експлуатації таких будівель на 1 м^2 стіни менші на 30-40 %. Застосування блоків з АГБ у стінах будівель замість цегли скорочує у 1,4-2 рази трудомісткість будівництва [3].

Питома вага АГБ в структурі стінових матеріалів багатьох європейських країн зросла до 40-60 %. Його переваги цілком очевидні: низька енергоємність виробництва, високі експлуатаційні та будівельно-технологічні властивості, відносно низька вартість, екологічність та інше. З 2000 по 2020 рр. обсяги виробництва АГБ в Україні зросли в 40 разів і дещо перевищили 4 млн м^3 . Основними виробниками АГБ заявлено про те, що протягом наступних 2-3 років в Україні буде побудовано ще два нових заводи на заході країни.

Згідно з прогнозом аналітичного агентства [4], яке включає 1700 дослідницьких груп з 81 країни світу обсяг світового ринку автоклавного газобетону зросте з 18,8 млрд дол США в 2020 р. до 25,2 млрд дол США до 2025 р. при середньорічному темпі зростання 6,0 % в період з 2020 по 2025 рр.

Разом з тим, доступні сировинні матеріали, з яких виробляється АГБ, такі як цемент і вапно, є високоенергозатратними, а їх виробництво супроводжується викидами парникових газів не тільки через нагрів вихідної сировини відповідно до 1500 і 950 $^{\circ}\text{C}$, але і за рахунок декарбонізації вапняку, яка супроводжується виділенням CO_2 . За даними роботи [5] основними джерелами викидів CO_2 при виробництві цементу є саме прямі викиди при кальцинації – 50 %, від спалювання палива – 40 % та побічні викиди, пов'язані з використанням електроенергії – 10 %.

За даними МЕА виробництво цементу відповідальне за 8 % від всіх викидів вуглекислого газу в світі. Обсяг викидів CO_2 вугільними ТЕС світу становить 1,1 кг/кВт-год, у ЄС – 0,868 кг/кВт-год, а за усередненими даними на застарілих вітчизняних ТЕС – до 1,4 кг/кВт-год.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоклавна обробка сировинної газобетонної суміші є найбільш вагомим енерговитратним технологічним етапом виробництва АГБ.

У процесі автоклавного синтезу утворюються низькоосновні гідросилікати кальцію, типу тобермориту, при температурі близько 179–200 $^{\circ}\text{C}$ і надлишковому тиску 10–14 МПа пересиченої пари. Саме температурний фактор і підвищений тиск пари забезпечують прискорений синтез новоутворень, які характеризуються високою міцністю і низькою усадкою порівняно з газобетоном, який твердне в звичайних нормальних умовах.

Як відомо, на початковому етапі автоклавного твердіння газобетону утворюються високоосновні гідросилікати кальцію C_2SH_2 , $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$, $\text{C}_2\text{SH}(\text{B})$, стійкі лише в насичених розчинах гідроксиду кальцію. Вони мають підвищену рівноважну розчинність у поровій рідині в'язучих систем і утворюють волокнисті та пластинчасті мікрокристали. В подальшому вони перетворюються в низькоосновні, які є основними носіями міцності.

Багаточисельні дослідження фазового складу АГБ показують, що газобетонна суміш на основі вапна, портландцементу і кварцового піску за даними РФА містить такі основні фази: 11,3 Å тоберморит $d/n = 11,30; 2,97; 2,15; 2,00; 1,84$ Å, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $d/n = 4,93; 2,63; 1,93; 1,8$ Å, C-S-H (I) $d/n = 3,079; 2,80; 1,82$ Å, гідрогранати $d/n = 5,06; 3,34; 2,44; 2,32$ Å, гіроліт $d/n = 4,25; 3,85; 3,16$ Å. Вміст тобермориту в складі цементуючої маси АГБ становить біля 40 %.

У роботах П. І. Боженова [2] показано, що збільшення тиску в автоклаві з 0,8 до 1,2 МПа підвищує міцність газобетону на 40 %, а до 2,5 МПа – на 100 %. Підвищений робочий тиск пари автоклавної обробки дає змогу розширити сировинну базу виробництва АГБ і забезпечує потенційну економію витрат в'язучих речовин.

Аналіз науково-технологічного стану виробництва АГБ провідних світових виробників підтверджує те, що на сьогодні технологічно є неприйнятним підвищення робочого тиску пари і температури вище прийнятих параметрів з позиції техніки безпеки, хоча ефективність такого технологічного прийому є давно доведеною. Завданням гідротермальної обробки (запарювання) виробів з АГБ або щільних силікатних матеріалів (цегли) є оптимізація сировинного складу суміші та технології виробництва, які є максимально прийнятні для синтезу новоутворень в системах $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ і $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. При цьому для газобетонних виробів важливим залишається зменшення їхньої густини при збереженні міцності.

В проведених нами дослідженнях [6] наведено результати зменшення енергоємності виробництва АГБ на стадії автоклавної обробки шляхом якісного вакуумування автоклаву, оптимізації режимів автоклавування та складу сировинної суміші. Реалізація низки заходів, у тому числі і зменшення густини сировинної суміші, забезпечує економію енергії при автоклаві ванни та збільшує оборотність автоклаву на добу з 2,0 до 2,5 циклу.

Величезний комплексний ефект зменшення енергоємності виробництва АГБ досягається саме шляхом підвищення його коефіцієнта конструктивної якості – зменшення густини при одночасному підвищенні міцності. На момент розпаду СРСР автоклавний газобетон випускався з середньою щільністю 643 кг/м^3 [7]. На сьогодні замість «важких» стінових блоків виробляються газобетонні блоки щільністю $400\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ з точними лінійними розмірами та покращеними фізико-механічними характеристиками, а кращі компанії-виробники АГБ виготовляють газобетонні стінові блоки густиною $300\text{--}350 \text{ кг/м}^3$ при збереженні їхньої міцності та інших експлуатаційних характеристик.

За даними відкритих джерел до провідних світових лідерів виробництва «легкого» АГБ слід віднести компанію Н+Н, у складі якої працює 13 заводів, на яких виробляється газобетон марки D300 з класом міцності C2,0. Найбільший світовий виробник – компанія Xella володіє 95 заводами зі штатом працівників понад 7 тис. люд. Обсяг продажів компанії в 2019 р. склав 1,6 млрд євро. Крім того, компанія Xella являється єдиним у світі виробником найлегшого теплоізоляційного газобетону, що виготовляється під торговою маркою Ytong Multipor (D100). Компанія виробляє стінові блоки під торговою маркою Ytong марки D300 з класом міцності C2,0.

На пострадянському просторі та ринку східноєвропейських країн компанія «Аерок» досягла в загальному виробництві АГБ високої частки виробництва енергоефективного легкого конструкційно-теплоізоляційного газобетону марки D300 (23 %) та D400 (55 %). «Аерок» ініціював введення в ДСТУ Б В.2.7-45: 2010 Зміни № 1 і № 2, які доповнили номенклатуру теплоізоляційного газобетону марками D100 і D150 і віднесли теплоізоляційний газобетон щільністю 300 і 350 кг/м^3 до конструкційно-теплоізоляційного за рахунок підвищення його міцності до класу C1,5–C2,0. Майже 1 % продукції компанії «Аерок» припадає на легкий теплоізоляційний газобетон марки D150.

Перехід на виробництво газобетону з марки D600 до D300 дозволяє виготовити удвічі більше продукції з одиниці сировини, скоротити витрати на фундамент та транспортні витрати, збільшити продуктивність праці при виконанні кам'яних робіт і отримати додатковий ефект, у тому числі і екологічний, від зменшення спожитої енергії як на стадії виробництва матеріалу, так і на стадії експлуатації збудованих будівель.

Автоклавна технологія виробництва дає змогу частково замінити постійно зростаючі в ціні традиційні в'язучі (портландцемент і вапно) недефіцитною

сировиною – природними і техногенними мінеральними добавками, до використання яких постійно зберігається інтерес. Він обумовлений високою енергозатратністю виробництва цементу, а останніми роками увага прикута і до негативних екологічних наслідків.

Висококальцієві золи ТЕЦ можуть виконувати функцію в'язучого [8] або служити альтернативою кремнеземистому компоненту АГБ. За даними роботи [9] в Лондоні з 1951 р. працюють заводи АГБ, побудовані поруч з електростанціями, які працюють на вугіллі. Більшість газобетонних заводів у Великобританії працюють з використанням золи-винос, але через закриття електростанцій, що працюють на вугіллі, переходять на використання піску або гібридного компоненту (пісок + зола). В РФ за даними асоціації виробників АГБ лише 10 % заводів у виробництві АГБ використовують золу-винос. Масштабно зола-винос використовується в Китаї, Польщі. В Україні, Казахстані та Білорусі вона не використовується. Використання золи-винос з однієї сторони створює певні технологічні труднощі через зміни її дисперсності, наявність у її складі незгорілого вуглецю і можливих забруднень. В європейських країнах АГБ, виготовлений з використанням золи-винос отримав назву «сірий» газобетон.

Зола-винос містить активний кремнезем і глинозем (SiO_2 і Al_2O_3), які знаходяться в аморфному стані і навіть при нормальній температурі реагують з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням гідросилікатів кальцію, а Al_2O_3 утворює гідроалюмінат кальцію – C_3AH_6 . Утворення високодисперсних гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію призводить до покращення властивостей матеріалу та мікроструктури цементного каменя.

Використання в технології виробництва АГБ золи-винос, доменного гранульованого шлаку (ДГШ) і мікрокремнезему рекомендується

відповідними нормативними документами [10].

Хоча цемент є найбільш енергомістким компонентом газобетону, але ринкова ціна вапна в силу різних причин в Україні для виробника АГБ є вищою за цемент. Загалом будівлі в світі споживають до 40 % енергії та відповідальні за 36 % викидів вуглекислого газу. В останні кілька десятиліть у світовій цементній промисловості спостерігається істотне зниження частки клінкеру в цементі. Якщо в 1990 р. вміст клінкеру в цементі становив 0,9 кг/кг цементу, то в 2003 р. вміст знизився до 0,85 кг/кг цементу. Виробництво цементу та цементних бетонів все більше орієнтується на використання активних мінеральних добавок, що супроводжується меншими енергетичними затратами і шкідливими викидами. Існуючі тенденції виробництва цементів у Європі свідчать про зростання виробництва композиційних портландцементів типу СЕМ П/В. Прогнозується, що при виробництві цементу в 2050 р. вміст клінкеру в середньому буде складати лише 70 % [11].

Використання активних мінеральних добавок в технології виробництва традиційних бетонів дозволяє частково замінити постійно зростаючі в ціні традиційні в'язучі (портландцемент і вапно). Проте наявність таких добавок в АГБ потребує суттєвого корегування та збалансування у часі кінетики зростання пластичної міцності газобетонного сирця і кінетики газовиділення.

Міцність АГБ залежить не тільки від міцності силікатної зв'язки, але і від правильності макропор газобетону. При чому, чим менше густина АГБ, тим більш відчутним буде цей вплив, оскільки товщина мідпорових перегородок при зменшенні густини матеріалу буде зменшуватись. Практична зацікавленість до активних мінеральних добавок буде і подальше зростати, у тому числі і при виробництві цементу та будівельних матеріалів, виготовлених на його основі, зокрема і АГБ.

Великий науково-практичний інтерес і популярність на сьогодні в зарубіжних країнах набуває така добавка, як метакаолін.

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідження проблеми зменшення витрат енергії та викидів парникових газів при виробництві автоклавного газобетону шляхом використання активних мінеральних добавок, зокрема метакаоліну.

Для досягнення поставленої мети потрібно дослідити питання, які пов'язані з узагальненням світового досвіду використання метакаоліну в цементних системах, механізму його дії, характеристики сировинної бази та її поширення, провести оцінку впливу добавки на фізико-механічні властивості автоклавного газобетону та її вплив на морфологію базового гідросиліката кальцію – тобермориту.

Основна частина дослідження. Ще на початку 40-х років ХХ століття Всесоюзним науково-дослідним інститутом цементу було проведено масштабні та систематичні дослідження пуцоланічної активності поширених на території СРСР 207 різновидів глин, серед яких були і каолінові [12]. Серед окремих результатів зазначається, що всі глини, що піддавались випалу при температурі 500–800 °С, проявляють пуцоланічні властивості тою чи іншою мірою.

За даними роботи [5] світові розвідані запаси каолінів оцінюються в 14,8 млрд т. Україна володіє найбільшими запасами каолінів серед країн СНД – 70 % запасів і 80 % добування.

Станом на кінець 2018 р. Україна займала четверте місце серед країн світу за обсягом видобутку каоліну, який становить 7 % від світового рівня. Україна посідає провідне місце у світі, поступаючись лише США, Великобританії і Китаю. Каолінові глини представлені двома генетичними типами: каоліном первинним (основного і лужного складу) та каоліном вторинним. Територія розміщення первинних каолінів Українського щита (УЩ) простягається на

950 км від Полісся до Азовського моря шириною 350 км [14].

Термічно активовані глини класифікуються європейським стандартом EN197-1-2000 як штучні пуцолани. Глини – це найбільш поширена та найдешевша сировина для виробництва та використання як добавки у складі композиційних в'язучих. Тонкодисперсна прожарена і випалена глина, як пуцоланова добавка до мінеральних в'язучих, знайшла застосування з давніх часів і до останнього часу у вигляді цем'янки, глиніту, аглопориту, горілих порід, керамзиту та керамзитового пилу [15]. Цем'янка – продукт помелу обпалених до спікання при температурах 900 °С керамічних матеріалів. Глініт отримують шляхом подрібнення глин, обпалених при температурі 600–800°C.

На відміну від мікрокремнезему, метакаолін є сумішшю активного кремнезему і глинозему майже в рівних пропорціях, тобто він є одночасно алюмінатним і силікатним пуцоланом. За останні десятиліття він набув застосування як ефективна пуцоланова добавка, яку отримують шляхом прожарювання каолінових глин з вмістом каолініту 90 % і більше, до складу яких входить 50–55 % SiO₂ та 40–45 % Al₂O₃ [16].

Метакаолін на території СНД масштабно не виробляється, а виготовлений окремими підприємствами не завжди характеризується стабільністю показників пуцоланічної активності.

Вплив метакаоліну на гідратацію цементу та формування структури цементного каменю обумовлений високою його дисперсністю та пуцолановими властивостями. У роботі [17] показано, що добавки прожареної при 600 °С і меленої до 250 м²/кг полімінеральної глини з вмістом каолініту 51 % в портландцементі призводять до більш високого підвищення міцності при стисканні цементного каменю, ніж добавки метакаоліну.

Метакаолін є відносно новим компонентом у складі АГБ. Саме через високу хімічну активність цієї добавки відносно до вільного вапна вона викликає підвищений інтерес у виробників АГБ. Природна сировина (каолін) має хімічний склад, %: $Al_2O_3 - 39,5$; $SiO_2 - 46,5$; $H_2O - 14$, що відповідає стехіометричній формулі $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ або структурній формулі $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. Хімічний склад каолініту представлений формулою $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, а після термообробки видаляється кристалічна вода і утворюється аморфний силікат алюмінію – $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Наявність в складі метакаоліну крім активного SiO_2 і активного Al_2O_3 забезпечує підвищену його пуцоланічну активність. Узагальнення аналітичних досліджень, проведених багатьма авторами, зводиться до наявності трьох дійових факторів, які

позитивно впливають на підвищення міцності та довговічності бетонів, розчинів при частковій заміні цементу метакаоліном:

- прискорення гідратації цементу;
- пуцоланові реакції з портландитом;
- ефект зміцнюючого наповнювача.

За даними роботи [18], введення до складу портландцементу 10 % метакаоліну призводить до зниження вільного $Ca(OH)_2$ в поровому розчині на 70 %, а при вмісті в портландцементі 20 % метакаоліну вміст вільного $Ca(OH)_2$ дорівнює нулю.

При проведенні досліджень нами використовувався метакаолін (ТУ У 14.2-36363275-001:2009) виробника ТОВ «Мета-Д», Дніпропетровська обл. Хімічний склад метакаоліну відповідно з паспортом якості №150621-1 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад метакаоліну

№ з/п	Найменування показника, масова частка оксиду, %; інші характеристики	Значення
1	Al_2O_3	43,32
2	SiO_2	53,64
3	Fe_2O_3	0,73
4	TiO_2	0,51
5	CaO	0,58
6	Коефіцієнт відбиття, %	77,5
7	Розчинність у воді, %	0,13
8	Абразивність, мг	79,4
10	Масова частка залишку на ситі 0063, %	1,32
11	Питома поверхня, m^2/g	15
12	Масова доля вологи, %	не більше 1%
13	Зовнішній вигляд	від білого до кремового кольору
14	Розсипчастість, %	100
15	Особливі властивості	нетоксичний, радіоактивність 18 мкр/год

Пуцоланова активність метакаолінів залежить від вмісту та особливостей структури основної речовини (метакаоліну), його дисперсності, кількості та природи домішкових компонентів.

Глини, кальциновані при 750 та 1000 °С, очевидно можна застосовувати як замітник вапна у складі силікатної цегли.

При цьому необхідно ретельно підбирати температуру теплової обробки глини. Використовуючи низькосортні каолінові кальциновані глини як частину мінерального в'язучого в АГБ, ними можна замінити сульфати кальцію та частково цемент без зниження класу міцності газобетону. Під час утилізації та рециклінгу відходів АГБ,

виготовленого з використанням кальцинованих глин, не потрібно вживати спеціальних заходів для видалення сульфатів.

Оскільки в процесі автоклавного синтезу новоутворень АГБ на першому етапі створюються високоосновні гідросилікати кальцію в середовищі вільного вапна, а метакаолін зв'язує вільне вапно і виступає інтенсифікатором утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію, тому цілком очевидно, що метаколін в

перспективі може стати ефективною добавкою саме в автоклавні силікатні матеріали. В роботі [19] показано, що метакаолін навіть у традиційних бетонах взаємодіє з портландитом $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ цементу з утворенням гелю гідросилікату кальцію, гідрогеленіту $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (C_2ASH_8) і, можливо, деяких солей гідроалюмінатів кальцію (C_4AH_{13} , C_3AH_6) за орієнтовною схемою (1):



При збереженні оптимального вмісту в складі в'язучого метакаолін здатний пов'язувати луги у нерозчинні новоутворення, які за хімічним складом аналогічні цеолітам та польовим шпатам. Ця його властивість та новоутворення обумовлюють більш надійний захист

бетонних виробів та конструкцій від висолоутворення та руйнування внаслідок силікатно-лужної реакції. На рис. 1 наведено потенційні продукти реакцій взаємодії метакаоліну з гідроксидом кальцію.

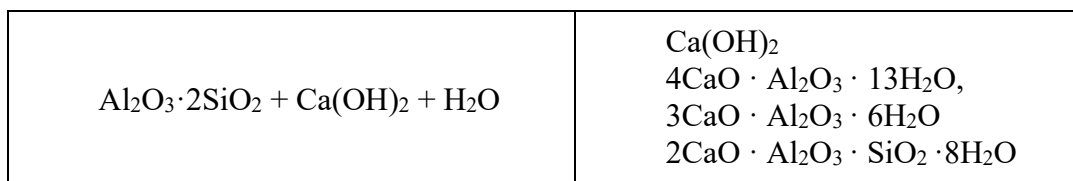


Рис. 1. Можливі новоутворення в системі (метакаолін + вапно + вода) в процесі автоклавної обробки газобетону

Крім того, дрібнодисперсні пластинчасті частинки метакаоліну забезпечують бетонним і розчинним сумішам високу пластичність і стійкість до розшарування. Ці властивості особливо цінні для високорухливих сумішей, таких як самовирівнювальні суміші для підлоги і самоущільнювальні бетони, сухі будівельні суміші.

За даними роботи [20] надійні результати при використанні метакаоліну в різних галузях можуть бути досягнуті лише за оптимального режиму термічної обробки каоліну.

До складу сировинної суміші газобетону марки D300 без газоутворювача вводилась добавка метакаоліну. Відформовані зразки у вигляді контрольних зразків – балочок з використанням форм типу ЗФБ–40, в подальшому за аналогією до технологічного регламенту виробництва АГБ, після формовки тверднули в камері попереднього дозрівання і піддавались автоклавній обробці за стаціонарним режимом промислового виробництва АГБ [21].

На рис. 2 наведено залежність впливу добавки метакаоліну 5–15 % від маси цементу на міцність газобетону.

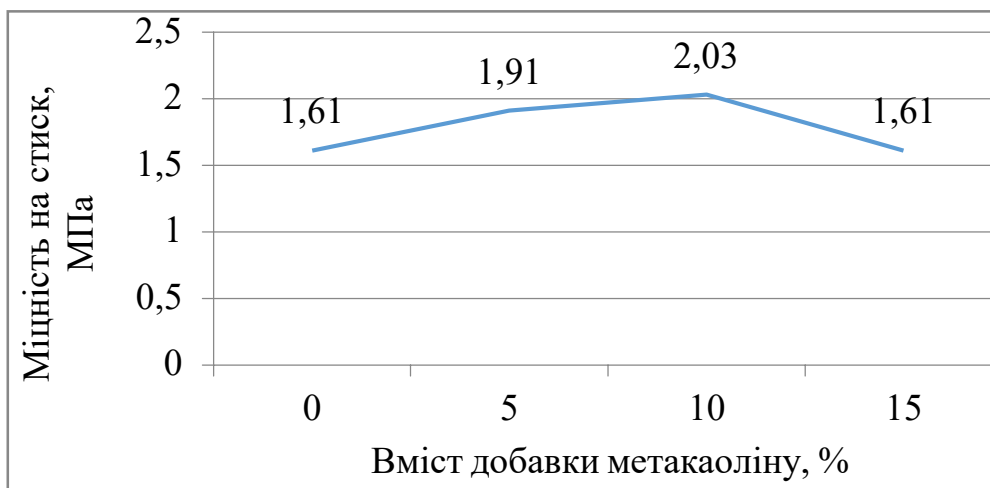


Рис. 2. Динаміка впливу добавки метакаоліну на міцність при стисканні газобетонної суміші D300

Як видно з рис. 2 зі зростанням добавки до 10 % зростає міцність автоклавованої газобетонної суміші. Відповідно при добавці 5 % від маси цементу міцність на стиск зростає майже на 12 %, а при 10 % добавки – на 26 %. При дозуванні добавки 15 % метакаоліну

міцність газобетонної суміші з добавкою вирівнюється з міцністю зразка без добавки.

Дія добавки метакаоліну на згин газобетонної суміші має аналогічний характер. Оптимальне дозування 10 % забезпечує приріст міцності на згин на 24,7 %. (рис. 3).

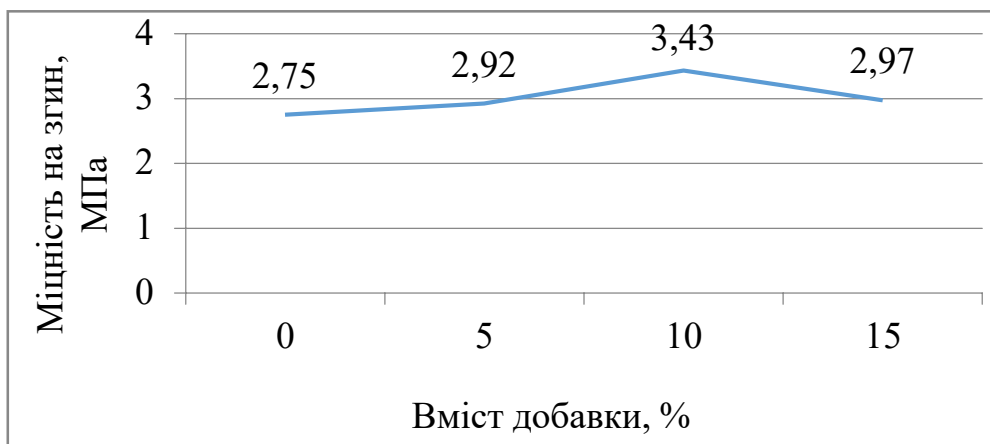


Рис. 3. Динаміка впливу добавки метакаоліну на міцність при згині газобетонної суміші D300

Аналогічні тенденції зростання міцності цементних матеріалів залежно від дозування 5–15 % метакаоліну зберігаються і для щільних бетонів, і наведені в багатьох публікаціях.

Порівняння морфології тобермориту зразка рядової газобетонної суміші компанії «Аерок», що містить традиційні компоненти –

цемент, вапно, мелений кварцовий пісок, гіпсовий камінь (рис. 4, а і б) та зразка [22] із заміщеним 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованою глиною, випаленою за температури 750 °С (рис. 4, в і г) показує дуже схожу морфологію тобермориту.

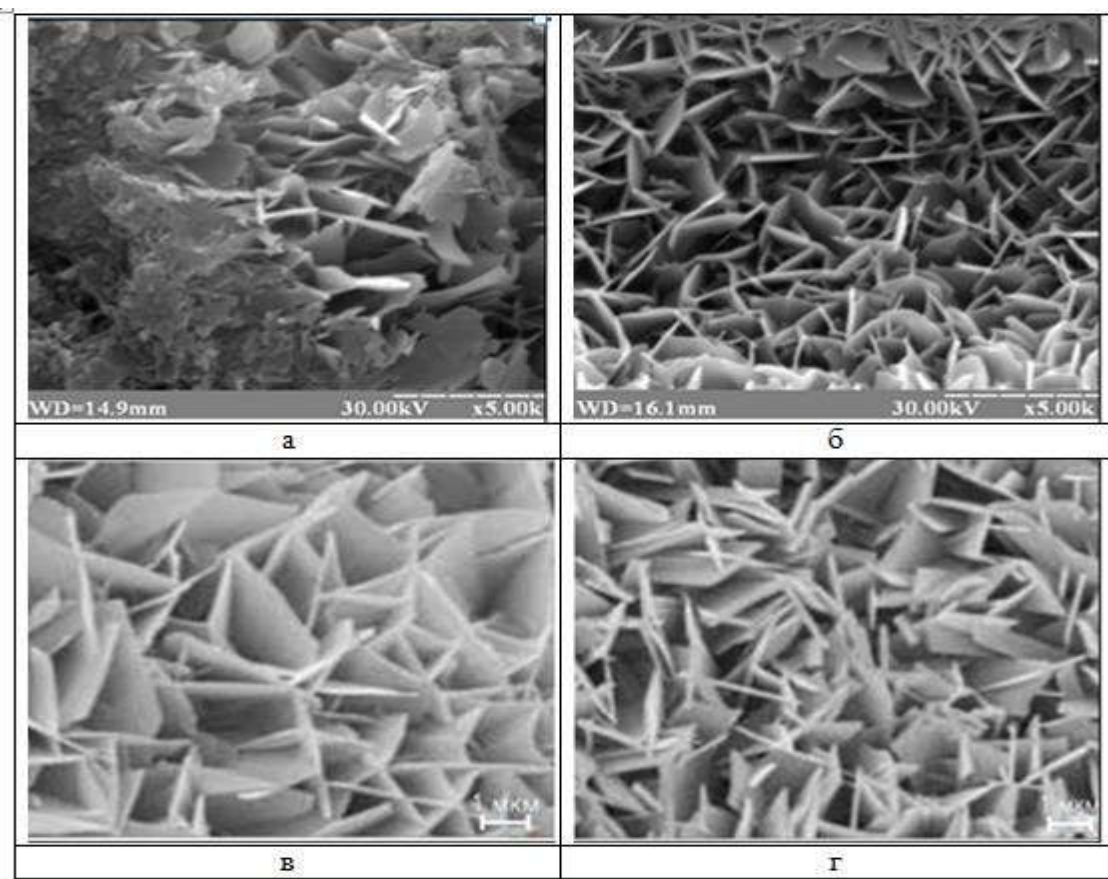


Рис. 4. Порівняльне зображення тобермориту газобетонних зразків традиційної газобетонної суміші (а і б) і суміші з добавкою метакаоліну при зменшених на 20 % витратах цементу (в і г)

Схожість морфології тобермориту зразків із заміщенням 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованою глиною при 750 °С свідчить про те, що оптимальне дозування метакаоліну в складі газобетонної суміші не тільки не впливає на морфологію основного гідросиліката кальцію, але і забезпечує економію 20 % цементу та замінює гіпсовий компонент АГБ.

Разом з тим виникає потреба в проведенні додаткових досліджень, оскільки ще радянські інструкції з виробництва АГБ 1970, пізніше 1980 і 2000 років та їх український аналог – Настанова з виготовлення виробів з автоклавного газобетону (ДСТУ-Н Б В.2.7-308:2015) регламентує обмеження в складі цементу алюмінатної складової (C_3A) – не більше

6 %. Крім того, регламентом обмежується вміст неглинистих домішків в складі кварцового піску не більше 3 % і не більше 1 % глинистих домішок типу монтморілоніта. Як відомо, монтморілоніт це широко поширений глинистий мінерал в якому крім SiO_2 , Al_2O_3 може міститись Fe_2O_3 , MgO , CaO та сліди K_2O , Na_2O та ін.

При розробленні інструктивних документів в часи становлення масштабного виробництва АГБ в кінці 50-х початку 60-х років минулого століття в колишньому СРСР добавка метакаоліну в складі АГБ взагалі не досліджувалась.

Висновки. Високу міцність автоклавному газобетону забезпечують саме низькоосновні гідросилікати кальцію, типу тобермориту і ксонотліту. Наявність метакаоліну ($SiO_2 + Al_2O_2$) в складі

газобетонної суміші сприяє зв'язуванню вільного вапна в гідросилікати кальцію.

Використовуючи метакаолін чи низькосортні каолінові кальциновані глини як частину мінерального в'язучого в АГБ, можна без зниження міцності газобетону замінити добавку сульфату кальцію та частково цемент.

Вплив метакаоліну на гідратацію цементу та формування структури цементного каменю обумовлений високою дисперсністю частинок метакаоліну та його пуцолановими властивостями. Наявність в

складі АГБ добавки метакаоліну не впливає на морфологію тобермориту у зразках при заміщенні 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованою глиною.

Добавка метакаоліну 5–10 % від маси цементу в складі газобетонної суміші забезпечує економію цементу і, як наслідок, зменшує екологічне навантаження на довкілля. На відміну від випалу цементу, випал каоліну не супроводжується процесом кальцинації і викидами парникових газів.

Список використаних джерел

1. Гаевская З. А., Лазарева Ю. С., Лазарев А. Н. Проблемы внедрения системы «зеленых» стандартов. *Молодой ученый*. 2015. № 16. С. 145–152.
2. Боженков П. И. Технология автоклавных материалов. Ленинград: Стройиздат, 1978. 368 с.
3. Сажнев Н. П., Сажнев Н. Н., Галкин С. Л. Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения в Республике Беларусь. *Строительные материалы*. 2008. № 1. С. 6–9.
4. Research And Markets.com URL: Last accessed: <https://www.researchandmarkets.com/r/bfmucz>.
5. Locher Friedrich W. Cement – Principles of production and use. Verlag Bau+Technic GmbH, 2006. 536 p.
6. Рудченко Д. Г., Сердюк В. Р. Зменшення енергоємності виробництва газобетону автоклавного твердження на стадії його автоклавування. *Науковий вісник будівництва*. ХНУБА. 2021. № 3 (105). С. 196–204.
7. Коровкевич В. В., Пинскер В. А. и др. Малоэтажные дома из ячеистых бетонов. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации. Ленинград: ЛенЗНИИЭП, 1989. 284 с.
8. Особенности формирования фазового состава автоклавного газобетона с использованием высококальциевых зол ТЭЦ / Р. И. Гильмияров, Ю. В. Щукина, Г. И. Овчаренко и др. *Ползуновский вестник*. 2012. № 1. С. 51–55.
9. Клиф Фадж Применение автоклавного газобетона в Великобритании. *Современный автоклавный газобетон: материалы V НПК*. Пятигорск, октябрь 2019 г. С. 78–83.
10. ДСТУ-Н Б В.2.7-308:2015. Настанова з виготовлення виробів з ніздрюватого бетону. Київ: Мінрегіонбуд. 2016. 48 с.
11. Production of CEM II/B cements with optimized properties / D. Israel, P. Boos, T. Neumann, F. Wanzura. *Cement International*. 2013. № 1. P. 55–60.
12. Глинит-цемент / под ред. В. И. Аксенова. Сборник статей ВНИИЦ. Вып. 11. Главн. ред. стр. лит. Москва; Ленинград: 1935. 171 с.
13. Олійник Т. А. Особливості технологій переробки каолінової сировини України. Загальні питання технологій збагачення. Збагачення корисних копалин. Криворізький національний університет. 2016. Вип. 63(104). С. 1–5.
14. Гелета О. Л., Кічняєв А. М., Ляшок В. І. Характеристика глин, огляд їх запасів і галузей використання. *Мінеральні ресурси України: Глини*. 2011. № 4. Ч. 2. С. 16–26.

15. Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р. Состав и гидравлическая активность керамзитовой пыли. *Цемент и его применение*. 2013. № 1. С. 124–128.
 16. Wild S., Khatib J.M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*. № 27 (1997). P. 137.
 17. Влияние добавки в портландцемент прокаленной и молотой полиминеральной каолинсодержащей глины на прочностные свойства цементного камня / Р. З. Рахимов, Н. Р. Рахимова, А. Р. Гайфуллин, О. В. Стоянов. *Вісник технологічного університету*. 2015. Т. 18. № 5. С. 80–83.
 18. Kostuch J. A., Walters G. V., Jones T. K. High performance concrete incorporating metakaolin -a review. *Concrete 2000 Conference*. University of Dundee. September 1993.
 19. Дворкін Л. Й., Безусяк О. В., Лушнікова Н. В. Метакаолін – ефективна добавка до литих бетонів. *Вісник УДУВГП: зб. наук. праць*. Рівне. 2002. Вип. 5 (18). Ч. 3. С. 86–92.
 20. Aquino W., Lange D. A., Olek J. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. *Cem. Concr. Compos.* 2001. Vol. 23, № 6. P. 485–493.
 21. Сердюк В. Р., Рудченко Д. Г. Шляхи зниження енергетичної складової при виробництві пористого бетону автоклавного тверднення. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: тези доп. 9-ої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Харків, 17–19 листопада 2021*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 256–257.
 22. Эффективность использования кальцинированных глин в составе строительных материалов / К. К. Тинель, Н. Бойнтнео, К. Хухоловски, С. Щерб. *Цемент и его применение*. Ноябрь-декабрь 2018. С. 1–5.
-

Рудченко Дмитрій Геннадійович, кандидат технічних наук, генеральний директор ТОВ «Аерок» ORCID: 0000-0003-2909-3864. Тел.: (076) 238-75-70. E-mail: dmitry.rudchenko@aeroc.ua.

Сердюк Василь Романович, доктор технічних наук, професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. ORCID: 0000-0002-1694-8651. Тел (098) 241-21-73. E-mail: vasromvs@gmail.com.

Rudchenko Dmitry Gennadievich Cand. tech. Science, Gen. Director of Aerok LLC ORCID: 0000-0003-2909-3864. Tel.: (076) 238-75-70. E-mail: dmitry.rudchenko@aeroc.ua.

Serdyuk Vasil Romanovich Dr. Tech. Sciences, Professor, Department of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University. ORCID: 0000-0002-1694-8651. Tel (098) 241- 21- 73. E-mail: vasromvs@gmail.com.

Статтю прийнято 02.02.2022 р.