

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота/проект

другий магістерський рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Аналіз впливу диспергуючих добавок
на властивості газобетону

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-з
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)

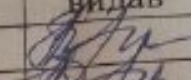





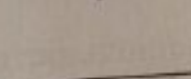

освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)

Герасютенко Станіслав Ігорович
(прізвище та ініціали)

Керівник професор кафедри промислового та
цивільного будівництва, д. т. н. Радкевич А.В.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Рецензент доц., к.т.н. Полтавець М.О.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Запоріжжя
2023

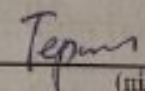
6. Консультанти розділів роботи		Підпис, дата	
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Радкевич А.В., д.т.н.. проф.		
Розділ 2	Радкевич А.В., д.т.н.. проф.		
Розділ 3	Радкевич А.В., д.т.н.. проф.		
Розділ 4	Радкевич А.В., д.т.н.. проф.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

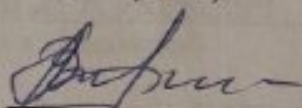
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прізвище
1.	Аналіз літературних джерел з виготовлення газобетону		
2.	Об'єкти та методи дослідження		
3.	Особливості структуроутворення газобетону		
4.	Склад, властивості та структура газобетону автоклавного твердіння з модифікаторами		

Студент


(підпис)

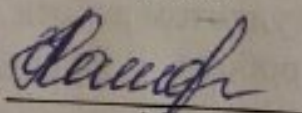
Герасютенко С.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи/проекту


(підпис)

Радкевич А.В.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер


(підпис)

Данкевич Н.О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Герасютенко Станіслав Ігорович. Аналіз впливу диспергуючих добавок на властивості газобетону.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник А.В. Радкевич. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2023.

Переваги ніздрюватого газобетону на сьогодні є незаперечними. Завдяки своїй пористій структурі він має значний теплоізоляційний ефект: термічний опір огороджуваних конструкцій, виконаних з ніздрюватого бетону густиною 400...500 кг/м³, втричі вищий ніж цегляних і у 8 разів – ніж з важкого бетону. Ніздрюватий бетон, зокрема газобетон, легкий, міцний і негорючий матеріал, який легко обробляти механічно. Низька середня густина і високі теплоізоляційні властивості газобетонних виробів дозволяють знизити товщину стін втричі порівняно зі стінами з цегли і в 1,7 разів – з керамзитобетону. Набагато нижчі і трудовитрати як при виробництві блоків із газобетону, так і муруванні стін з них. Перелік переваг цього ефективного будівельного матеріалу буде неповним, якщо не згадати такі його властивості, як висока паропроникність та здатність до поглинання шуму.

До числа найбільш актуальних проблем технології ніздрюватих бетонів можна віднести зниження їх середньої густини при забезпеченні необхідних значень міцності та інших будівельно-технічних властивостей. Виробництво та застосування конструкційно-теплоізоляційного ніздрюватого бетону низької середньої густини з підвищеними експлуатаційними властивостями дозволяє:

- підвищити теплозахисні властивості огороджуваних конструкцій, вирішити проблеми енергозбереження;

– знизити енергоємність виробництва виробів з ніздрюватих бетонів та при використанні у комунальному господарстві, скоротити імпортні поставки енергоносіїв;

– покращити екологію навколишнього середовища за рахунок зменшення забруднення повітря продуктами згоряння матеріалів, що використовують для отримання теплової енергії.

Вдосконалення технології та підвищення експлуатаційних властивостей газобетонів, як найбільш ефективного виду ніздрюватих бетонів, потребує пошуку нових ефективних технологій покращення їх структури і усунення нестабільних якісних показників сировинних матеріалів. Це обумовлює необхідність визначення аналітичних залежностей для розробки оптимальних рецептурних складів бетонів, параметрів технологій їх виробництва та методів управління ними в умовах діючих підприємств.

Ключові слова: ніздрюватий бетон, газобетон, цемент, шлак, лужна активація, піноутворювач, зола-винесення ТЕС, мікроструктура пор, шлакопортландцемент, гігроскопічність, теплопровідність.

ABSTRACT

Gerasyutenko Stanislav Igorovich. Analysis of the influx of dispersing additives on the power of aerated concrete.

Qualified graduation work for achieving a higher level of master's degree in the specialty 192 Life and civil engineering, scientific ceramics specialist A.V. Radkevich. Engineering Basic Science Institute named after. Yu.M. Proceedings of the Zaporizhzhya National University, Department of Industrial and Civil Life, 2023.

The advantages of unsound aerated concrete today are unsurpassable. Due to its porous structure, it has a significant thermal insulation effect: thermal support of enclosing structures, constructed from durable concrete with a thickness of 400...500 kg/m³, and a third increase in the lower integrity of 8 times is lower than important concrete. Durable concrete, aerated concrete, is a lightweight, flexible and non-flammable material that is easy to process mechanically. The low average thickness and high thermal insulation power of aerated concrete components make it possible to reduce the thickness of walls by a factor of 1.7 compared to expanded clay concrete. Much less labor is required both when making blocks from aerated concrete and when laying walls from them. The transference of this effective material will be incomparable, since one cannot imagine such power as high vapor permeability and low noise level.

Among the most pressing problems in the technology of non-drying concretes, one can include a decrease in their average thickness while ensuring the necessary values of value and other engineering and technical authorities. The production and curing of structural-thermal-insulating non-drying concrete of low average thickness with advanced operational authorities allows:

- promote heat-sinking power of enclosure structures, solve problems of energy saving;

– reduce the energy intensity of the germination of germs from unsound concrete and, in the absence of the municipal government, the speed of imported supplies of energy;

– paint the ecology of the excess environment by changing the polluted air with combustion products of materials that are used to recover thermal energy.

Improved technology and increased operational power of aerated concrete, as the most effective type of non-damaging concrete, will require the search for new effective technologies for improving their structure and reducing unstable axes. displays of raw materials. This explains the need for significant analytical deposits for the development of optimal recipe warehouses of concrete, the parameters of the technology of their selection and methods of managing them in the minds of existing enterprises.

Keywords: intact concrete, aerated concrete, cement, slag, sludge activation, foaming agent, TEC ash, pore microstructure, slag Portland cement, hygroscopicity, thermal conductivity.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ВИГОТОВЛЕННЯ ГАЗОБЕТОНУ	11
1.1 Газобетон властивість та застосування	11
1.2 Види газобетону	13
1.3 Способи отримання виробів із газобетону	15
1.3.1 Неавтоклавний спосіб	15
1.3.2 Автоклавний спосіб	17
1.4 Формування пористості та міцності газобетону	18
1.4.1 Вплив газоутворювача на структуру та властивості газобетону	19
1.4.2 Міцна міжпорова перегородка	20
1.5 Регулювання реологічних властивостей газобетонної маси	21
1.6 Вплив добавок на властивості газобетону	23
1.6.1 Вплив спеціальних добавок	23
1.6.2 Вплив хімічних добавок на процеси твердіння та гідратації цементу	25
1.7 Передумови досліджень	26
2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	27
2.1 Характеристика сировинних матеріалів	27
2.1.1 Портландцемент	27
2.1.2 Газоутворювач в структурі бетонної суміші	28
2.1.3 Вода в структурі газобетонної суміші	29
2.1.4 Формувальний гіпс у складі газобетонної суміші	30
2.1.5 Динатрієва сіль етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б)	30
2.1.6 Мікрокремнезем у складі газобетонної суміші	31
2.1.7 Додаткова добавка хлориду кальцію у складі газобетонної суміші	31
2.1.8 Карбонат натрію як додаткова складова газобетону	32
2.2 Методи дослідження зразків газобетону	33
2.2.1 Визначення фізико-механічних властивостей зразків газобетону	33
2.2.2 Фізико-хімічні методи аналізу	34
3 ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ГАЗОБЕТОНУ	37
3.1 Склад мінерального модифікатору суміші та його властивості	38
3.2 Визначення властивостей модифікованих сировинних сумішей	47
3.3 Порізація суміші з добавками мінеральних модифікаторів	50
4 СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРА ГАЗОБЕТОНУ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДІННЯ З МОДИФІКАТОРАМИ	53
4.1 Мінералоутворення в газобетонних системах з добавкою мінеральних модифікаторів	54
4.2 Вплив складу модифікованої суміші на властивості пористих газобетонних сумішей	64
4.3 Особливості структуроутворення виробів з газобетону автоклавного твердіння в залежності від складу	69
4.4 Мікроструктура виробів з газобетону автоклавного твердіння в залежності від складу	77
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах життя важливим питанням є зниження матеріаломісткості та ресурсоефективності будівельних матеріалів. Тому, особлива увага приділяється матеріалам, що мають невеликі значення об'ємної щільності, до таких матеріалів відноситься газобетон. Газобетон - це легкий пористий матеріал, що відноситься до пористих бетонів. Застосування газобетону значно скоротить час на зведення будівель, а також забезпечить їх довговічність. Основна сировина, що використовується в газобетонних технологіях - цемент. Цемент є дорогим матеріалом, тому актуальним є питання економії цементу в технології газобетону.

Однією з важливих завдань є дослідження впливу диспергуючих добавок на властивості вихідного матеріалу, які інтенсифікують процес гідратації та твердіння, що дозволить в подальшому дозволити значно знизити витрати на сировину та енергію при виробництві газобетону.

Метою роботи є дослідження впливу хімічних та диспергуючих добавок на властивості газобетону зі стабільними та підвищеними показниками якості, що базується на встановленні взаємозв'язку між речовинним складом, структурою, властивостями та параметрами технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- проаналізувати стан та сучасні вимоги до якості сировинних матеріалів, що використовуються при виробництві ніздрюватих бетонів;
- встановити закономірності впливу зміни складу сировинної суміші на технологічні процеси та якість продукції;
- встановити закономірності впливу коливань якості вапна, дисперсного армування короткими целюлозними волокнами (фіброю) та об'ємної гідрофобізації;
- провести оцінку техніко-економічної ефективності запропонованих способів підвищення експлуатаційних характеристик газобетонів.

Об'єктом дослідження є диспергуючі добавки для газобетону здатні вплинути на властивості пористої суміші.

Предметом дослідження є автоклавний газобетон з покращеними властивостями.

Методи досліджень. В роботі використовувалися методи порівняння, узагальнення, методи системного підходу, експерименти, математичне планування і обробка результатів експериментів.

Апробація. Магістерська робота була представлена на III Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України».

Структура і об'єм магістерської роботи. Робота складається із введення, чотирьох розділів, висновків, загальних висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Основною темою текст викладено на 90 сторінках, з них 18 малюнків, 15 таблиць, та містить списки літератури зі 35 найменування праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ВИГОТОВЛЕННЯ ГАЗОБЕТОНУ

1.1 Газобетон властивість та застосування

Сучасні спрямування та перспективи будівництва, реконструкції та ремонтно-відновлюваних робіт будівель і споруд в першу чергу стосуються раціонального підходу до використання енергетичних ресурсів, комфортного мікроклімату в приміщеннях та зменшення впливу на навколишнє середовище. Тому виробники та споживачі будівельних матеріалів при виборі ефективних та енергозберігаючих ресурсів, екологічно чистих будівельних матеріалів вибирають матеріали, які зможуть забезпечити якість, довговічність та комфортність будівель, а також значно зменшити екологічний вплив на навколишнє середовище [1-2].

Таким матеріалом є газобетон. Газобетон - це універсальний ніздрюватий матеріал, який відноситься до пористих бетонів. Він має рівномірно розподілені пори у структурі. Газобетон використовується для зведення як не несучих, так і несучих стін. Вже багато років будівельники використовують його як надійний і простий у використанні та обробці матеріал, для виконання різних будівельних робіт і конструкцій[3-4].

Пори в структурі замкнуті, тому газобетон має теплоізоляційну здатність [5-7]. Повітря в замкнутих порах газобетону зберігає тепло, тому він може використовуватися як у теплих, так і холодних кліматичних умовах. Також його використовують як утеплювач у малоповерхових та багатоповерхових будинках.

Газобетон є звукоізоляційним матеріалом, пори запобігають трансмісії звуку, а також перешкоджають відхиленню звуку за рахунок використання заповнювача [8-13].

Технологія виготовлення газобетону і сам матеріал екологічно чисті [14-15]. Дати оцінку екологічності газобетону можна за показником радіоактивності та горючості виробу.

Для матеріалів, що застосовуються в будівництві та реконструкції житлових та громадських будівель (I клас) норма радіоактивності становить 370 Бк/кг [16].

У газобетона, деревини та гіпсу питома ефективність природних радіонуклідів нижче ніж 54 Бк/кг, тому вони вважаються найменш небезпечним матеріалами, у інших будівельних матеріалів питома ефективність природних радіонуклідів вища (глиняна цегла III клас - 120...153 Бк/кг) [16].

Газобетон пожегобезпечний та вогнестійкий. Газобетонні блоки витримують дію вогню протягом 3...7 годин без руйнування, при горінні швидкість поширення полум'я та димоутворююча здатність мінімальні. Тому при горінні матеріал не виділяє токсичних речовин.

Вироби з газобетону ефективно протистоять дії вогню [17-20]. В середині пористого бетону можна прокладати димарі та вентиляційні канали.

Ще однією перевагою будівель з газобетону є стійкість матеріалу до бактерій та плісняви. Завдяки тому, що в його складі відсутні органічні сполуки, на його поверхні не утворюються цвілеві гриби. За нормальних умов газобетон сухий і в ньому немає вологи для розвитку грибків та мікроорганізмів [21].

Газобетон застосовують в усіх галузях будівельної промисловості. Завдяки своїм унікальним властивостям вироби з газобетону дозволяють за короткий проміжок часу зводити до житлових будинків та сільськогосподарських споруд, він використовується в будівництві громадських, промислових та адміністративних будівель.

Газобетонні блоки мають невелику вагу та розмір, найпоширенішими є 200x300x600 мм та близькі до нього, а коли відомі габарити, можна визначити об'єм, в даному випадку він становить 0,036 м³. Блок газобетону

такого розміру важитиме в сухому стані для марки: D500 – 18 кг [22]. Тому трудовитрата для таких конструкції мінімальна.

Конструкції з газобетону міцні та довговічні. Їх використовують як внутрішні та зовнішні стіни - несучі, одинарні, подвійні, ненесучі, комбіновані. Так само для влаштування розділових та протипожежних перегородок, заповнення сталевих та бетонних каркасів.

Спільно з іншими видами пористого бетону, він може застосовуватися для таких робіт, як улаштування сходів, плит перекриття, панелей, перемичок і т.д [24].

1.2 Види газобетону

Сучасне будівництво дозволяє створювати різну продукцію, що відрізняється технічними характеристиками та властивостями.

Однією з важливих властивостей газобетону є об'ємна густина. Саме від щільності залежить зносостійкість і опір зовнішнім впливам матеріалу. Щільність газобетону характеризується обсягом пор. Наявність пор робить газобетон теплопровідним матеріалом.

Класифікують газобетон за об'ємною щільністю:

- конструкційний ($\rho = 1000 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$) застосовується для несучих конструкції та перекриттів [25];

- конструкційно-теплоізоляційний ($\rho = 500 \dots 1000 \text{ кг/м}^3$).

Використовують для внутрішніх та зовнішніх стін [26];

- теплоізоляційний ($\rho = 350 \dots 500 \text{ кг/м}^3$). Використовується як утеплювач стін, підлог, горищних перекриттів.

В організації виробництва газобетону, має значення розпалубна міцність газобетону, оскільки саме вона визначає темп технологічного процесу.

При природному твердінні значно зменшується виробнича площа, необхідна велика кількість форм, які займають цю площу. Так як час від заливки до отримання ним розпалубної міцності займає 28 діб, що сумарно перевищує тривалість решти всіх операцій, тому виробники вибирають різні умови виробництва газобетону і їх розрізняють за характером твердіння в цих умовах:

- а) твердіючі за природних умов (28 діб);
- б) твердіючі при атмосферному тиску в камері пропарювання, термоактивних формах, спеціальних формах з електропідігрівом тощо;
- в) автоклавні, що отримуються в середовищі насиченої пари, або насиченої, а потім перегрітої пари високого тиску, у тому числі автоклавах, обладнаних джерелами нагріву;
- г) карбонізовані, що твердіють у герметизованих камерах при дії вуглекислого газу;
- д) комбінованого твердіння, тобто при різному поєднанні способів [27].

Отримані вироби не значно відрізняються властивостями від газобетону природного твердіння.

Ефективними вважаються такі режими теплової обробки, які дозволяють за короткий термін отримати газобетон заданої міцності без значних змін його властивостей.

Ефективність теплової обробки залежить від низки технологічних факторів, що характеризують газобетонні вироби, та виробничих факторів, що визначають режим теплової обробки.

Технологічними факторами є вид та мінералогічний склад цементу, кількість цементу та води в бетоні та ін.

Виробничими факторами є температура і вологість середовища, тривалість окремих періодів тепловологової обробки бетону.

1.3 Способи отримання виробів із газобетону

Існує два способи отримання виробів із газобетону - автоклавний і неавтоклавний.

Неавтоклавний – твердіння в природних умовах або тепловолога обробка з використанням теплового впливу при атмосферному тиску [28].

Автоклавний – твердіння відбувається при підвищеній температурі в спеціальних пічах – автоклавах, при надмірному тиску [29-30];

1.3.1 Неавтоклавний спосіб

Неавтоклавний спосіб одержання газобетону проводиться на основі портландцементу, вапняку, шлаку, золи, ін. відходи та «газоутворювач».

Виробництво виробів включає такі технологічні операції:

1. Підготовка сировинних матеріалів.

В технології газобетону використовують тонкодисперсні композиції, які повинні відповідати потрібній питомій поверхні. Сировинні матеріали: кремнеземистий компонент (пісок) до $S_{\text{пит}}$ не менше 1500...200 $\text{см}^3/\text{г}$, вапно до 4500...5000 $\text{см}^3/\text{г}$. Додаткове подрібнення цих компонентів до $S_{\text{пит}} = 3000...4000 \text{ см}^3/\text{г}$ дозволить активувати в'язуче і газоутворювач, а також істотно підвищить однорідність суміші, що дозволить отримати виріб з низькою середньою щільністю.

2. Приготування пористої суміші.

Підготовлені (подрібнені) та віддозовані компоненти завантажують у газобетонозмішувач при включеному механізмі, що переміщує. Послідовно завантажують піщаний шлам і воду (недостатня кількість) попередньо

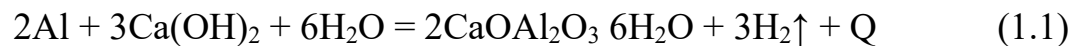
підігріті до 40...50°C, в'яжуче, газоутворювач (алюмінієва пудра). Додатки, що вводяться в газобетонну суміш, завантажуються разом із в'яжучою речовиною (цемент).

Алюмінієва пудра вводиться в газобетонну суміш у вигляді суспензії, попередньо знежирюють її (видалення стеаринової або парафінової оболонки) в ПАР. Всі компоненти до завантаження газоутворювача ретельно перемішуються 3...5 хвилин, завантажуються суспензія газоутворювача і перемішується ще 1...3 хвилини в газобетонозмішувачі.

Суміш, що надійшла в газобетонозмішувач має температуру не нижче 35°C, оскільки це забезпечить інтенсифікацію взаємодії алюмінієвої пудри з $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

3. Формування виробів та їх пропарювання.

Формування суміші складається з дозування та змішування всіх компонентів [31]. На цьому етапі йде поризація (спучування) суміші, за рахунок взаємодії газоутворювача (алюмінієва пудра) з $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Водень, що виділився у вільному стані, у вигляді газових бульбашок спучує газобетонний масив. Ця стадія визначає структуру пористого матеріалу. Невелика кількість газоутворювача (0,6...0,7 кг/м³), рівномірно розподіляється у всьому об'ємі суміші та створює комірчасту структуру матеріалу до заданих значень середньої щільності безпосередньо у формі.

Основна умова при даному процесі (спучування), це відповідність кінетики газовиділення зміною реологічних властивостей маси.

Неавтоклавний спосіб є відносно дешевим способом отримання виробів з газобетону, так як витрати на електроенергію мінімальні та немає потреби застосовувати спеціальне обладнання.

1.3.2 Автоклавний метод

Автоклавна обробка здійснюється в середовищі насиченої та перегрітої водяної пари в автоклаві [32].

При автоклавній обробці в цементному камені хімічні реакції протікають повніше, так як обробка йде при тиску 0,9...1,3 МПа при температурі 175...193°C. За рахунок високої температури і тиску кремнеземистий компонент (пісок), вступає в реакцію з вільним вапном, що виділяється при твердінні цементу, пісок бере активну участь в твердінні [33], що зумовлює прискорення процесу твердіння автоклавного бетону

Автоклав являє собою циліндричний котел, що герметично закривається, діаметром 2...2,6 метрів, довжиною 17,5...20,5 метрів і товщиною стінок 12...14 мм. Виготовляються автоклави зі сталі та розраховані на робочий тиск 0,8...1,2 МПа. В середині автоклава укладено вузькоколіїні шляхи для пересування вагонеток із виробами. Автоклави обладнані манометрами, термометрами, запобіжними клапанами та іншими приладами [34-35].

Основною метою автоклавування є утворення нового мінералу - тобермориту. Завдяки його утворенню підвищується міцність матеріалу та зменшується усадка [36-38].

Автоклавна обробка розбивається на чотири етапи:

1. Підготовка газобетону до підйому тиску.

Перший етап може включати:

- продування або попередній підгорів виробів без тиску;
- попередній підігрів виробів при тиску;
- вакумування.

Метою першого етапу є оптимальна підготовка сирцю та середовища в автоклаві до процесу підйому тиску (другий етап).

Поступове зниження тиску в автоклаві призводить до кипіння води в

теплій частині масиву (в сирці). Тиск продовжують знижувати і кипіння просувається від сирця назовні, що призводить до повного видалення повітря з матеріалу. При поступовому зниженні тиску матеріал розігрівається і температура по товщині масиву вирівнюється.

2. Підйом тиску. Метою другого етапу є розігрів матеріалу до температури ізотермічної витримки.

Розігрів іде за нормальної температури 190...193°C при цьому відбувається утворення конденсату, що переносить тепло в бетон. Конденсація відбувається завдяки конденсації гарячої пари на відносно холодній поверхні масивів, температура яких на початок процесу нижче температури насиченої пари. Конденсація води з пари може відбуватися як у вигляді крапель води, так і у вигляді закритих водяних плівок.

3. Ізотермічна витримка пористого бетону при певній температурі та тиску. Метою третього етапу є забезпечення витримки для глибокого перебігу хімічних реакцій утворення нових матеріалів.

Час витримки залежить як від номенклатури продукції, так і її щільності. Для щільності 350...500 кг/м³ оптимальний час витримки 360 хвилин при тиску 12 бар.

4. Зменшення тиску та підготовка виробів до вивантаження з автоклаву. Зменшення тиску має відбуватися плавно. Його тривалість залежить переважно від номенклатури продукції та щільності виробів [40].

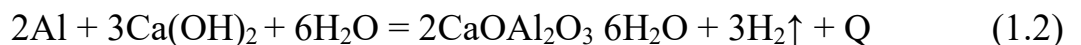
1.4 Формування пористості та міцності газобетону

Характерною особливістю пористих бетонів є наявність пор, які займають об'єм від 50...92%, а також наявність міжпорових перегородок. Після твердіння пориста структура дає систему з твердим середовищем та газовою дисперсною фазою – твердою піною. Міцність та стійкість ніздрюватої

структури до твердіння, визначається властивостями плівкового каркасу. Згодом, міжпорові перегородки витончуються і, якщо не відбувається твердіння пористої маси, бульбашки газу вибухають, і структура пористої маси руйнується. Тому важливо знати процес формування ніздрюватої бетонної структури і фактори, які можуть впливати на її властивості.

1.4.1 Вплив газоутворювача на структуру та властивості газобетону

Формування пористої структури газобетону відбувається в результаті виділення певного обсягу газу, що утворюється на поверхні рівномірно розподілених мікрочастинок газоутворювача (алюмінієва пудра). При протіканні хімічної реакції між алюмінієвою пудрою і гідроксидом кальцію виділяється водень (H_2) який спучує бетонну суміш і утворює пористу структуру бетону [41].



Газоутворення включає три стадії:

- зародження газових бульбашок на поверхні частинок алюмінієвої пудри;
- збільшення об'єму бульбашок;
- стабілізацію розмірів та локалізацію газових бульбашок – пір.

Ніздрювата структура формується при одночасному процесі газовиділення та наростанні структурної міцності пористо-бетонної суміші. Оптимальними умовами формування макроструктури бетону вважаються, за яких термін, коли закінчується інтенсивне газовиділення збігається з моментом оптимальних значень пластичних характеристик, для газобетона це 22 хвилини [41].

Об'єм газу, що виділяється (H_2) залежить від якості та кількості вапна, води та алюмінію. По масі алюмінію в ніздрюватій бетонній масі найменше, інших компонентів (цемент, вапно і кремнеземистий компонент) набагато більше. Тому, важливо дозувати кількість газоутворювача в ніздрюватій бетонній суміші.

Якщо зменшити кількість газоутворювача, відбувається газоутворення в малих кількостях, тому пористо-бетонна маса погано спучується, внаслідок чого підвищується середня щільність бетону.

При збільшенні кількості газоутворювача виділяється надмірна кількість водню, що призводить до інтенсивного газовиділення та інтенсивного наростання структурної міцності, через що суміш ущільнюється і осідає, збільшується середня щільність.

1.4.2 Міцна міжпорова перегородка

Структура пористого бетону складається з осередків ніздрюватого вигляду і щільних міжпорових перегородок, міцність яких, в основному, і визначає значення міцності газобетону. Міжпорова перегородка утворюється в процесі поділу суміші цемент-вода, де утворюються бульбашки газу, які збільшуються в обсязі.

Структура міжпорових перегородок (мікроструктура) визначається:

- мінеральним складом;
- ступенем дисперсності та кристалізації новоутворень;
- щільністю та міцністю матеріалу міжпорової перегородки;
- від виду, складу сировини та пористої бетонної маси, В/Т співвідношення, умов порізації, формування та твердіння пористих бетонів.

В початковий час, міжпорова перегородка мало стабільна, оскільки складається з продуктів гідратації і порової рідини, кількість якої

визначається водотвердим співвідношенням. Введення тонкодисперсних добавок, підвищить щільність упаковки частинок та скоротити вільний поровий простір у перегородці вихідного стану сформується якісна міжпорова перегородка [42], що призведе до збільшення міцності при стисканні та згинанні.

1.5 Регулювання реологічних властивостей газобетонної маси

Формування властивостей газобетону починається з моменту приготування бетонної суміші та продовжується на всіх наступних етапах. Знаючи фізико-механічні властивості суміші та її залежність від різних факторів, можна цілеспрямовано керувати параметрами структуроутворення на всіх етапах формування газобетону. Це може бути досягнуто варіюванням комплексу параметрів:

- оптимізацією водотвердого співвідношення мас;
- регулюванням температурного режиму процесу спучування;
- дотриманням необхідних умов формування виробів.

Водотверде співвідношення - це відношення маси води до маси в'язучого та кремнеземистого компоненту. Регулюючи воду замішування можна отримувати газобетони однакової об'ємної ваги, але різною міцністю, структурою, з різними показниками усадки, водопоглинання та морозостійкості [43].

Низьке водотвердне співвідношення зменшує в'язкий опір суспензії, перешкоджаючи бульбашці збільшитися до об'єму, який може зайняти газ, що міститься в бульбашці при даному тиску і температурі, в результаті чого пористість буде нерівномірною і зменшиться міцність.

Збільшене водотвердне співвідношення призведе до розшарування суміші та усадки [44].

Але якщо збільшити до певного водотвердого співвідношення структура покращиться і міцність збільшиться.

Температурний режим процесу спучування.

Температурний режим спучування впливає процес спучування і набір пластичної міцності. Збільшення температури масиву сприяє збільшенню рухливості масиву та рівномірному перебігу процесів спучування масиву. Оптимальна температура масиву коливається в діапазоні 23...48 °С залежно від виду виробу. Подальше збільшення сприятливо вплине на характер розподілу пір в об'ємі, вони будуть більш дрібнозернисті, а їхня міцність підвищиться. Якщо збільшувати температуру до 100 °С, станеться «закипання» масиву, процес спучування піде інтенсивніше та почнуть з'являтися тріщини в міжпоровій перегородці через недостатню газоутримуючу здатність.

Нерівномірна температура всередині масиву може викликати міграцію вологи від ділянок з вищою температурою до ділянок з меншою температурою та ускладненням процесів гідратації і твердіння портландцементу [45].

Регулювати температуру можна за рахунок зміни температури затворення води, або за рахунок коригування вихідного складу суміші [46].

Дотримання необхідних умов для формування виробів.

При виготовленні газобетону спучування (газоутворення) має відбуватися у формі. Цей процес дуже тонкий, тому що вимагає ретельного регулювання температури газобетонної маси, температури форми та механічної дії.

На виробництві використовують три методи формування газобетонної маси:

- литтєва технологія передбачає спучування в нерухомій формі. Процес регулюється шляхом прогріву добавки води або ПАР.
- при застосуванні стендового методу під час віброспучування форму з сумішшю розміщують на вібромайданчику, де вона вібрає з

частотою до 150 Гц і малою амплітудою 0,6...0,2 мм. Час обробки – 3...6 хвилин, охоплює весь процес газовиділення [47].

- агрегатно-потоковий або конвеєрний метод: форми заповнюються, передаються на вібромайданчик, а потім на пост охолодження, де знімається так званий «окраєць», а виріб нарізається за розмірами [48].

1.6 Вплив добавок на властивості газобетону

1.6.1 Вплив спеціальних добавок

Метою введення добавок є підвищення пластичності, зручності та зниження В/Т пористої маси. Введення добавок дозволить підвищити щільність упаковки та скоротити вільний поровий простір у перегородці [49].

Процеси твердіння і схоплювання в'язучого компоненту проходять повільно, для портландцементу терміни тужавлення - початок не раніше 45 хвилин. Щоб прискорити процес твердіння і набір міцності сирцю вводять добавки, які здатні структурувати (зміцнити) сформований масив. Такою добавкою є напівводний гіпс [42, 50].

Уповільнення процесів схоплювання та твердіння при використанні пластифікатору (гіпс) компенсується введенням прискорюючих добавок (хлориду кальцію, сульфату натрію), які підвищують розчинність зерен цементу у водно-сольовому розчині та збільшують межу насичення розчину за рахунок утворення ряду комплексних солей (гідрохлоридів), за рахунок чого прискорюється твердіння цементу [51].

Модифікуючі добавки впливають на реологічні властивості газобетону, до таких добавок належить мікрокремнезем. З введенням його у суміш в

кількості 1...5% від маси цементу значно збільшуються показники концентрації твердої фази, ступеня гідратації та ступеня заповнення вільного порового простору, що призводить до збільшення міцності міжпорової перегородки [52-53].

Волокнисті добавки впливають на плинність набування формувальних сумішей та збільшують пластичну міцність. Збільшення вмісту кожної волокнистої добавки в межах 0,1...0,4% від маси твердих компонентів плинність та набування формувальних сумішей зменшується, а пластична міцність збільшується.

Також вони підвищують міцність на стиск та вигин. Оптимальний вміст волокнистих добавок 0,3% від маси сухого матеріалу. Найбільшою міцністю на стиск (щодо волокон) володіють зразки з додаванням вуглецевого волокна, найменшою - каолінового волокна. Усі волокнисті добавки збільшують міцність на вигин більше, ніж міцність на стиск [54].

Багатостінні вуглецеві нанотрубки (ВУНТ), виступають як зародки при твердінні неавтоклавних та автоклавних газобетонів. Через масштаб цих частинок вони можуть не тільки змінювати об'ємну поведінку матриці аналогічно мікро- і макроскопічним добавкам, але також впливати на утворення і структуру CSH та інших продуктів, що утворюються в процесі гідратації цементу [55]. Введення вуглецевих нанотрубок покращує механічні та термічні характеристики готового матеріалу, а так само дозволяє стабілізувати суміш [56].

Пластифікуючі добавки вводяться з метою збільшення рухливості розчинних сумішей, зниження водотвердого відношення, зменшення осаду спученої маси. Найчастіше в якості пластифікуючої добавки вводиться ПАР, який нерідко отримують з відходів хімічної промисловості [46, 57].

Пластифікуючі добавки поділяються на пластифікуючі гідрофільного типу та гідрофобізуючі. Пластифікуючі гідрофільного типу вводяться в суміш для диспергування колоїдної системи цемент-вода, це призводить до покращення плинності тіста. До таких добавок відносяться сульфатно-

дріжджова бражка (СДБ), пластифікатор адипіновий лужний (ПАЛ-1), випарена післядріжджова барда (ВПБ).

Пластифікуючі гідрофобізуючі добавки вводяться в суміш для залучення дрібних бульбашок повітря. Молекули ПАР, що адсорбуються на поверхні системи цемент-вода знижують поверхневий натяг води, стабілізують дрібні бульбашки повітря. Тим самим добавка виконує функцію стабілізатора та пластифікатора. До гідрофобізуючих добавок відносяться: смола нейтралізована повітрозтягуюча (СНП); натрієва сіль абієтинової кислоти; смола деревна омилена (СДО), синтетична поверхнево-активну добавку (СПД) [58].

1.6.2 Вплив хімічних добавок на процеси твердіння та гідратації цементу

Цементний камінь та бетонний камінь полімінеральні за складом, і, крім того, продукти гідратації та твердіння цементів, що становлять основу цементного каменю та бетону, тонкодисперсні [59]. Тонкодисперсні продукти на перших етапах переходять у колоїдний (нанодисперсний), а потім у кристалічний стан, при цьому формується структура та міцність цементного каменю. Вивчивши ці стани (нанодисперсний і кристалічний) можна вибрати зовнішній енергетичний вплив на систему «цемент-вода» що дозволить керувати цією системою на ранніх стадіях структуроутворення. Вибір цих впливів базується на використанні рівняння Гіббса, яке є виразом об'єднаного рівняння першого та другого законів термодинаміки [60].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = P\Delta V + \sigma\Delta s + \mu\Delta n + \phi\Delta q - T\Delta S \quad (1.3)$$

де ΔG , ΔH , $T\Delta S$ – відповідно вільна енергія, ентальпійний та ентропійний фактори системи «цемент-вода»;

$P\Delta V$ - робота, що здійснюється системою при зміні обсягу, або енергія,

необхідна для цієї зміни;

$\sigma \Delta s$ - робота, що здійснюється системою при утворенні нової поверхні, або енергія, що виділяється чи поглинається при виробництві цієї зміни;

$\mu \Delta n$ – робота, що здійснюється системою чи енергія, що виділяється чи поглинається при утворенні нових хімічних сполук та взаємоперетворень кількості речовини в системі, а також змін її фазового складу;

$\phi \Delta q$ – робота, що здійснюється системою при зміні її електричного потенціалу та кількості електрики в процесі зміни іонного складу рідкої та твердої фази, при диспергуванні та утворенні нової поверхні.

Відповідно до рівняння 2 на систему «цемент-вода» можна вплинути:

- механічно;
- хімічно;
- електрофізично;
- тепловою енергією.

Хімічно впливати на систему «цемент-вода» можна добавками, які призведуть до зміни хімічного потенціалу (μn) системи та величини її поверхневої енергії (s), внаслідок протікання обмінних хімічних реакцій з продуктами гідратації цементу. Вплив хімічний вплине на процеси гідратації і твердіння цементу, дозволяє регулювати будівельно-технічні властивості цементу і підвищувати активність клінкерних мінералів при їх взаємодії з водою [61].

1.7 Передумови досліджень

З аналізу літературних даних видно, що виробництво газобетону вимагає великої витрати сировинних матеріалів, а велика витрата сировини призводить до збільшення вартості кінцевих виробів та енергоресурсів відповідно. Основним сировинним матеріалом є цемент, який займає

50...90% загальної маси сировинної суміші. У зв'язку з цим метою магістерської роботи є дослідження впливу хімічних та диспергуючих добавок на властивості газобетону та можливості інтенсифікації процесу гідратації та твердіння цементу у складі газобетону. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- вивчити вплив добавок на модельних зразках цементу;
- дослідити дію добавок за допомогою диференціальної мікрокалориметрії та диференційно-термічного аналізу;
- дослідити вплив добавок на газобетонних зразках.

2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика сировинних матеріалів

Для досліджень складу, структури, властивостей газобетону використовувалися сировинні матеріали: в'язучі речовини (цемент), газоутворювач, добавки.

2.1.1 Портландцемент

Як основний вид в'язучого використовувався портландцемент марки ЦЕМ І 42,5 (ПЦ500Д0). Мінералогічний та хімічний склад представлений у ДСТУ 9183:2022 Цементи. Загальні технічні умови. Будівельно–технічні характеристики наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад портландцементу, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	П.П.П	Сума
20,52	4,59	4,26	63,72	1,83	2,90	1,09	98,91

Таблиця 2.2 - Мінералогічний склад портландцементу, % (мас)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{св}	MgO	гіпс	Сума
56,90	14,50	7,80	11,20	0,90	2,50	4,76	98,56

Таблиця 2.3 – Будівельно-технічні властивості портландцементу

№ з/п	Властивості, розмірність	Значення
1	Нормальна густина, %	27,00
2	Межа міцності при натисканні у віці, 2 доби, МПа	21,3
3	Ознаки хибного схоплення	відсутні
4	Допоміжний компонент, %	0, 00

2.1.2 Газоутворювач в структурі бетонної суміші

Як основний газоутворювач використовувалася гідрофільна алюмінієва пудра марки ПАП1.

Гідрофільна алюмінієва пудра являє собою суміш тонкодисперсних частинок алюмінію пластинчастої форми зі спеціальною органічною добавкою, що забезпечує гідрофільні властивості алюмінієвої пудри, загальний вміст органіки не більше 5 %.

У таблиці 2.4 наведено характеристики алюмінієвої пудри.

Таблиця 2.4 - Характеристики алюмінієвої пудри RA-60

Марка алюмінієвої пудри	Вміст активного алюмінію, %	Змочуваність у воді
ПАП1	92	+

Алюмінієва пудра відповідає вимогам ДСТУ 5494-95 та вводилася в газобетонну суміш у вигляді тонкомолотої порошку з перетертим кварцовим піском (1:5).

2.1.3 Вода в структурі газобетонної суміші

Для виготовлення легких бетонів застосовувалася вода, що задовольняє технічним умовам ДСТУ 7525:2014.

Вода не повинна містити шкідливих домішок, що перешкоджають нормальному схоплюванню та твердінню в'язучих. Не допускається вміст у воді плівки нафтопродуктів та олії. Зазвичай вода, яка придатна для пиття, придатна і для замішування бетонів.

Застосовувати морську воду для зовнішніх стінових елементів не рекомендується, тому що на поверхні виробів можуть з'явитися сольові вицвіти. Технічні властивості води наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики води

Властивості	Од. виміру	Значення
Вміст органічних поверхнево-активних речовин	мг/л	≤10
Окислюваність води		≤15
Вміст розчинних солей		2000
Зміст зважених частинок		200
Водневий показник води (рН)		4-12, 5

2.1.4 Формувальний гіпс у складі газобетонної суміші

Дводонний гіпс використовується як добавка, яка має залишок на ситі № 02 не більше 13%. Технічні властивості гіпсу наведені у таблиці 2.6.

Таблиця – 2.6 Технічні властивості гіпсу

Властивості	Значення
Нормальна густина гіпсового тіста, %	60
Істинна густина, г/см ³	2,5
Насипна густина, г/см ³	1,35
Питома поверхня, г/см ³	2,65

2.1.5 Динатрієва сіль етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б)

Як добавка може бути використана динатрієва сіль етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б).

Динатрієва сіль етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б) являє собою білий кристалічний порошок або кристали білого кольору, добре розчинні у воді. Технічні властивості динатрієвої солі етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б) відповідно до ДСТУ Б В.2.7-131:2007 представлені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Технічні властивості динатрієвої солі етилендіамінтетраоцтової кислоти (Трилон Б)

Властивості		Значення
Розчинність у воді при t = 20 °С		100 г/л
Розчинність у воді при t = 80 °С		230 г/л
Молярна маса, г/моль	безводна пудра	336,21
	дигідрат	372,24

2.1.6 Мікрокремнезем у складі газобетонної суміші

Як додаткова добавка використовувався мікрокремнезем (силікатний пил, мікросиліка, *silica fume*), який представляє собою ультрадисперсний матеріал. Він складається з частинок сферичної форми, які отримують в процесі газоочищення технологічних печей при виробництві кремнію і феросиліцію [6]. Основним компонентом матеріалу є діоксид кремнію аморфної модифікації. Хімічний та фізико-хімічний склад мікрокремнезему представлені в таблицях 2.8 та 2.9

Таблиця 2.8 - Хімічний склад мікрокремнезему

Вміст оксидів, мас. %							
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃	домішки
91,7	0,4	0,5	1,2	-	-	-	2,0

Таблиця 2.9 - Фізико-хімічні характеристики дисперсних відходів

Зміст SiO, %		Середній розмір частинок, мкм	Насипна густина, т/м ³	Справжня густина, т/м ³	Гідравлічна активність, мг CaO/г	Водопотреба, %
В сплавах	У відходах					
97...98	92/92	0,2	0,15	2,16	102	42

2.1.7 Додаткова добавка хлориду кальцію у складі газобетонної суміші

Як додаткова добавка використовували технічний хлорид кальцію. Хлорид кальцію являє собою світло-сіру гранульовану, зернисту гігроскопічну речовину, яка не має запаху. Інтенсивно поглинає водяні пари, утворюючи тверді гідрати. Безводний хлорид кальцію розчиняється у воді з

виділенням тепла. При додаванні до спирту та рідкого аміаку утворює сольвати, проте розчиняється в ацетоні. Технічні властивості хлориду кальцію згідно з ГОСТ 450-77 представлені в таблиці 2.10

Таблиця 2.10 - Технічні властивості хлориду кальцію

Властивості	Значення
Молярна маса, г/моль	111, 08
Густина, т/см ³	2,15
Розчинність у воді, мл	74,5
Температура плавлення, °С	772
Лужний показник (рН)	8...9

2.1.8 Карбонат натрію як додаткова складова газобетону

В якості добавки використовували карбонат натрію у формі декагідрату ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

Карбонат натрію (кальцинована сода) - неорганічна сполука, натрієва сіль вугільної кислоти з хімічною формулою Na_2CO_3 . Безбарвні кристали або білий порошок добре розчинний у воді. Властивості карбонату натрію згідно з ГОСТ 5100-85 представлені у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 - Властивості карбонату натрію

Властивості	Значення
Молекулярна маса, г/моль	286, 14
Густина, г/см ³	1,446 (при 17 °С)
Температура плавлення, °С	32

2.2 Методи дослідження зразків газобетону

2.2.1 Визначення фізико-механічних властивостей зразків газобетону

Визначення міцності на стиск. Суть методу полягає у фіксуванні максимального тиску, який зразок здатний винести без руйнування [9].

Міцність при стисканні – це максимальне стискаюче навантаження, яке зразок здатний витримати до руйнування.

Досліджуваний зразок розміщують в центрі опорної плити і притискають верхньою частиною пресу, при цьому верхня частина пресу повинна щільно прилягати до всієї верхньої частини грані.

Тиск на зразок збільшується рівномірно і безперервно, до моменту, коли показання манометра не зменшаться.

Фіксується максимальне показання манометру. Межа міцності при стисканні вимірюється в МПа і розраховується за формулою:

$$\sigma_{сжк} = \frac{P \cdot S}{a \cdot b} \cdot 0,1, \quad (2.1)$$

де P – покази манометру, кгс/см²;

S – площа поршня, см²;

a, b – площа зразка, см².

2.2.2 Фізико-хімічні методи аналізу

Електронна мікроскопія

Дослідження проводилося для вивчення мікроструктури газобетону і модельних зразків цементу. Визначення мікроструктурних характеристик об'єктів, що досліджуються, проводилося за допомогою електронного мікроскопа фірми Jeol (Японія).

Інтерпретація електронно-мікроскопічної картини складна і потребує значного досвіду, особливо у разі багатофазних матеріалів. Тому електронна мікроскопія використовується в поєднанні з іншими методами аналізу.

Мікроскоп дозволяє отримати об'ємне зображення зі збільшенням в 60000 разів, що дає можливість розрізнити фрагменти розміром 10 нм. Зйомку зразків проводили за наступних режимів: прискорююча напруга електронного пучка 10...15 кВ, робоча відстань зйомки 1...100 мм та збільшення до 6 000 разів.

Ідентифікація кристалів здійснювалася за їх зовнішнім виглядом.

Рентгенівський аналіз.

Наступним фізико-хімічним методом дослідження фазового складу газобетону став рентгенівський аналіз, який полягає в отриманні та вивченні дифракційної картини, що виникає в результаті інтерференції рентгенівських променів, розсіяних електронами атомів опромінюваного об'єкту. З дифракційної картини можливо встановити порядок розташування атомів у просторі: структуру кристалів, розшифрувати будову складних сполук.

Лише дифракційний метод, а саме рентгенівський, має виняткову можливість надавати характеристику фазовому складу. Поняття фазовий склад визначає просторовий однорідний, рівноважний стан речовини, що має визначений елементний склад і структуру. Однією з переваг рентгенофазового аналізу (РФА) полягає в тому, що досліджується саме тверде тіло в незмінному стані і результатом аналізу є безпосередньо

визначення речовини або його складових. Рентгенівські промені досліджують кристал, тобто саме з'єднання, а у випадку поліморфних тіл рентгенівські промені дають можливість відрізнити окремі модифікації притаманні даній речовині (CaCO_3 – кальцит або арагоніт). Дифракційний метод дозволяє помітити найменші зміни в стані атомної сітки кристалу.

Визначення зв'язку між атомною структурою і властивостями речовини дозволяє встановлювати раціональний контроль над технологічними процесам, розкривати причини змін цих властивостей під дією тих чи інших факторів, дає можливість більш свідомо управляти технологічним процесом та змінювати його у потрібному напрямку.

На практиці отримав перевагу рентгенівський порошковий метод, який переважно і використовується в РФА. Цей метод застосовують завдяки тому, що багато природних та синтетичних, технічно важливих матеріалів найчастіше перебувають у полікристалічному стані. Тільки в такому стані можливо вивчення їх структури і властивостей.

Полікристалічний матеріал є сукупністю безлічі дрібних, частіше розорієнтованих кристаликів, які можуть бути щільно зчеплені між собою, або перебувати у вигляді подрібненого порошку. Іноді полікристалічна речовина може складатися з кристалів різних фаз. Кожний фазовий склад характеризується своєю решіткою, визначеним хімічним складом та чітким розподілом атомів у елементарній порі (осередку). Геометрія решітки визначає набір міжплощинних відстаней.

Рентгенограма аморфного зразка має характерний вигляд – це широка лінія за рахунок існування ближнього порядку в розташуванні атомів аморфної фази. У простішому випадку (щільна упаковка сферичних атомів елементів нульової групи) положення першого такого максимуму приблизно відповідає найкоротшій міжатомній відстані [127]. Рентгенофазовий аналіз за ДСТУ Б А.1.1-8 застосовують для визначення наявності фаз (якісний аналіз) та їх відносного вмісту в досліджуваній речовині (кількісний аналіз).

Якісний РФА призначений для визначення природи фазового складу мінералів зразка за характерним для кожної фази набором ліній або піків набором міжплощинних відстаней та інтенсивностей. Кількісний аналіз – для визначення залежності інтенсивності дифракційного відбиття від кількості відповідної фази обчислення її відсоткового вмісту з урахуванням масового коефіцієнту вбирання речовин і кожної фази. Загалом рентгенофазовий аналіз заснований на двох положеннях: - кожна фаза дає властивий тільки їй (незалежний від наявності інших фаз) набір дифракційних ліній; - інтенсивність ліній пропорційна вмісту фази.

Послідовність перетворення фотографії та її комп'ютерна обробка представлені на рисунку 2.3.

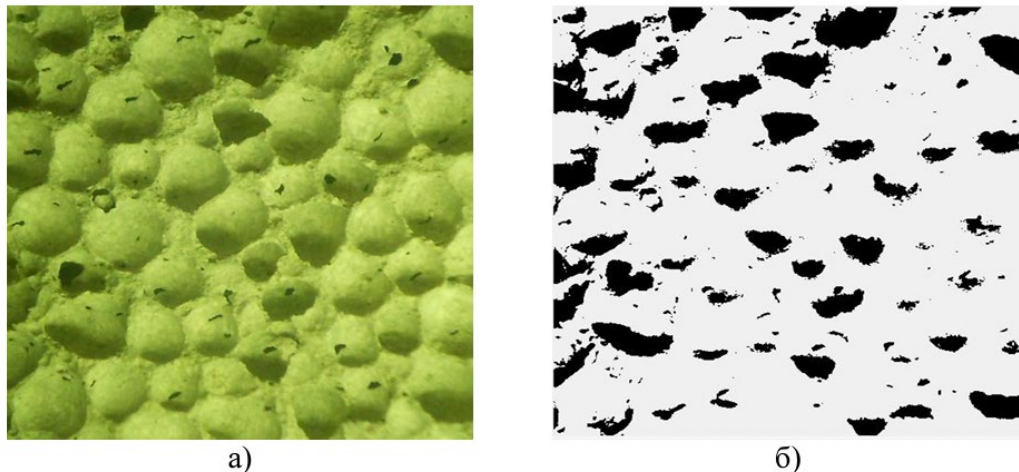


Рисунок 2.3 - Перетворення фотографії поверхні газобетону: а) фотографія зразка; б) монохромна комп'ютерна обробка

У першу чергу фотографію зразка перетворюють у монохромний вигляд (рис. 2.3 б) для позбавлення дефектів та полегшення її програмної обробки. По-друге, за допомогою програмного забезпечення будуються силові лінії, які визначають положення внутрішніх поверхонь розділу у твердій фазі газобетону. Наостанок, будуються еквіпотенціальні поля та визначають напруженості F_i . Дана характеристика дозволяє кількісно оцінити характер структури матеріалу.

3 ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ГАЗОБЕТОНУ

Виготовлення ніздрюватого газобетону автоклавного твердіння має ряд послідовних технологічних процесів. Але процеси які визначають макроструктуру та властивості вже готового матеріалу відбуваються до обробки в автоклавах.

Для того, щоб сформувати вироби с заданими фізико-механічними показниками необхідно забезпечити потрібною пластичною міцністю ніздрювату суміш, яка, в свою чергу, залежить від складу та властивостей вихідних компонентів та їх дисперсності. Введення додаткових активних дисперсних компонентів призводить до зміни реологічних властивостей бетонної суміші, що в результаті може негативно вплинути на експлуатаційних характеристиках готових виробів.

В традиційних технологіях силікатних автоклавних газобетонів головним кремнеземистим компонентом виступає кварц, розчинність якого підвищується в умовах автоклавної обробки. Тому для зниження витрат енергетичних ресурсів автоклавної обробки одним з ефективних способів управління процесами структуроутворення є зміна в'язучого у складі суміші. Можна виділити наступні зміни складів:

- змільчення пісків для підвищення активності;
- використання аморфного кремнезему (відходи промисловості);
- використання кварцевих порід;
- використання порід незавершеної стадії мінералоутворення.

В літературних джерелах [17] була розглянута добавка наноструктурованих модифікаторів для виготовлення газобетонів та доказана їх ефективність. В якості сировини модифікаторів використовували повнокристалічні породи: силікатні мономінеральні осадові породи та алюмосилікатні полімінеральні інтрузивні породи (граніти).

3.1 Склад мінерального модифікатору суміші та його властивості

Високі темпи росту будівництва індивідуального житла, підвищення вимог до якості будівельних матеріалів спонукали до пошуку альтернативних видів сировинних матеріалів, які нададуть готовому продукту необхідні техніко-експлуатаційні характеристики і в той же час зі зниженою собівартістю продукції.

Як правило, для автоклавного ніздрюватого газобетону використовують механічну та хімічно активну сировину для отримання ефективних матеріалів. Хімічно активні компоненти повинні відповідати наступним характеристикам:

- високий ступінь дисперсності, який сприяє утворенню більшої кількості контактів реагуючих мас бетонів;
- здатність до поліморфних перетворень, тобто наявність цих ефектів прискорює хімічні процеси, що протікають в автоклаві. Іноді це призводить до істотного зниження щільності готових виробів, погіршуючи тим самим техніко-експлуатаційні характеристики;
- отримання стійких до впливу агресивних середовищ новоутворень у процесі гідротермальної обробки;
- наявність аморфної чи склоподібної структури – матеріали спочатку мають більшу активність і легше вступають у взаємодію з іншими компонентами.

В дипломній роботі в якості хімічно активної сировини використовували мінеральні модифікатори, отримані на основі природної аморфізованої сировини. Використання аморфізованих порід замість кристалічних обумовлено їх більшою активністю та готовністю сировини до трансформацій у технологічних переділах отримання будівельних матеріалів, що забезпечить скорочення енерговитрат на виробництво виробів [10]. Як вихідні компоненти використовувалися силікатна опока і алюмосилікатний

перліт. Вибір сировини обумовлений багатьма факторами. Серед основних можна назвати наступні:

- доступність сировинних ресурсів належної якості;
- простота видобутку у зв'язку із заляганням у верхніх шарах земної кори;
- максимально дисперсна сировина (відсутня необхідність додатково дрібнити перед безпосереднім використанням).

Серед всього різноманіття осадових порід виділяються кварцові піски, ефективність яких для отримання систем автоклавних модифікованих матеріалів доведена раніше [15], а також алюмосилікатні породи, переважно глини [34]. Однак, нормативними документами на виробництво виробів автоклавного твердіння суворо регламентується та обмежується вміст глинистих компонентів у загальній масі формувальної суміші. Це зумовлено утворенням нестабільних гідрогранатів у структурі матеріалу, формування яких пов'язують із присутністю у системі глинистих компонентів.

Підсумовуючи вищезазначене, практичний інтерес становлять осадові аморфізовані породи з низьким вмістом глинистого компонента, до яких належать діатоміт і опока. Обидві породи характеризуються переважно опал-кристобалітовим складом, що робить їх перспективною сировиною для отримання будівельних матеріалів, що забезпечує зниження енергоємності виробництва за рахунок їхньої термодинамічної активності [16, 18]. З двох представлених компонентів діатоміт відрізняється більшою стабільністю складу та високим вмістом склофази, що зумовлює його застосовність та винятковість у багатьох галузях промисловості. У той же час, з урахуванням специфіки технології мокрого помелу та високопористої структури діатоміту і високої гігроскопічності, його застосування для отримання такого виду мінерального модифікатора не є раціональним. Опока на відміну від діатоміту є менш цінною сировиною, оскільки за кількістю кремнеземистої складової ця порода не поступається діатоміту.

Серед алюмосилікатних аморфізованих порід виділяється перліт -

кисла ефузійна порода, яка була сформована в результаті швидкого остигання вогненно-рідкого силікатного розплаву у водному середовищі. Таке походження породи призводить до утворення великої кількості склоподібної фази у його складі, що забезпечує високу активність перліту при його використанні як компоненту будівельних композитів. При цьому сформована вітрофірова (тобто структура вулканічних порід майже повністю складається зі скла) структура перліту забезпечує низькоенергоємну та швидко підготовку сировини (подрібнення) для застосування в технологічних процесах виробництва блоків.

Все вищезазначене зумовлює можливість використання аморфізованих порід різного складу та генезису для отримання мінерального модифікатора, що використовується як активний компонент виробів автоклавного твердіння.

Активний кремнезем грає головну роль у процесах формування силікатного каменю. Кварцовий компонент практично не реагує в нормальних умовах із вапном як основним в'язучим системи. Цей факт викликає необхідність автоклавної обробки таких виробів. Введення в систему активних кремнеземовмісних компонентів здатних вступати в реакцію з вапном у процесі її гасіння у формувальній суміші сприятиме прискоренню набору ранньої міцності сирцю та фіксації його структури для формування необхідних техніко-експлуатаційних властивостей готових виробів.

Враховуючи особливості складу і структури сировини, яка використовується, мінеральні модифікатори отримані методом суспендування, сутність якого полягає в попередньому сухому подрібненні компонентів і подальшому їх домолі у водному дисперсійному середовищі для досягнення необхідних параметрів[17].

В процесі отримання модифікаторів в першу чергу контролювалася їхня дисперсність. На початковому етапі виконувалося подрібнення перліту та опоки сухим способом до максимально можливої питомої поверхні.

Згідно з отриманими даними (рис. 3.1), дисперсність обох компонентів можна порівняти. Компоненти, які були подрібнені сухим способом, характеризуються піком області розмірів частинок 10–40 мкм, і навіть плато області 2–10 мкм. Це пояснюється полімінеральністю компонентів та їх різною твердістю. Подальше суспендування механоактивованих зразків призведе до зміщення розмірів частинок у менший бік: у загальному об'ємі переважають частинки в діапазонах 1–5 та 9–20 мкм (рис. 3.1, г). При цьому концентрація ультрадисперсної фази в модифікаторі на перліті вища порівняно з аналогічними значеннями для опоки. Це пояснюється особливостями складу та структури опоки, хомогенне походження якої зумовлює високу гігроскопічність і пластичність матеріалу, що подрібнюється, що в процесі помелу призводить до агрегації речовини. Крім того, в обох системах відзначається формування колоїдної фракції розміром частинок менше 0,1 мкм.

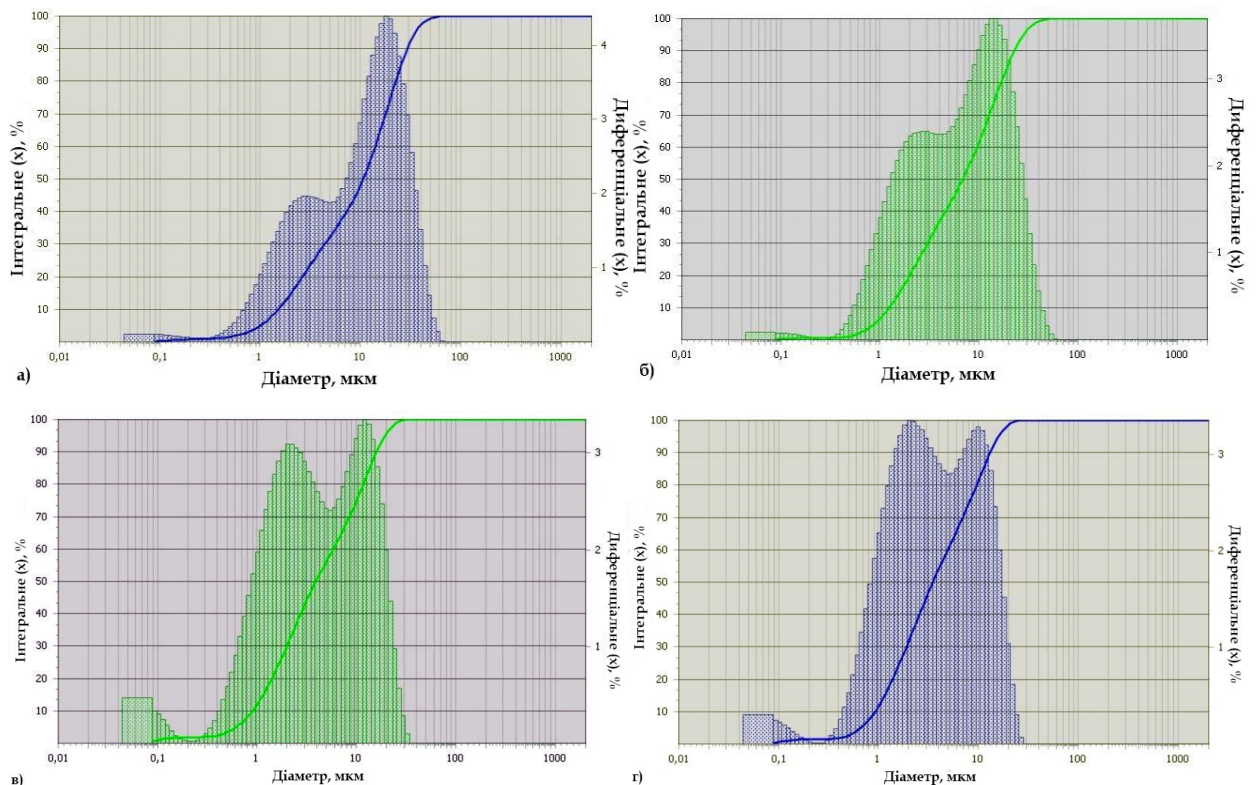


Рисунок 3.1 – Гранулометрія кремнеземовмісних компонентів:
Сухий помел: а – з опоки; б – з перліту. Суспендування: в – із опоки;
г – із перліту

Аналіз питомої поверхні активованих систем підтверджує дані гранулометрії (табл. 3.1). Так, питома поверхня модифікатора на перліті більш ніж на 30% перевищує значення для добавки з опоки. При цьому суспендування перліту дозволяє майже вдвічі підвищити активну питому поверхню кінцевої системи. Тоді як мокре доподрібнення опоки дає збільшення питомої поверхні у 1,5 рази. Тим не менш, питома поверхня модифікаторів, отриманих суспендуванням аморфізованих порід, менша в порівнянні з добавками, отриманими мокрим помелом вихідних кристалічних компонентів на 5% для алюмосилікатних компонентів і на 35% для силікатних.

Описані явища можна пояснити складом та структурою компонентів. Так, в загальному об'ємі опоки є глинисті складові, які виступають прошарком між частинками і тим самим знижують ефективність подрібнення. Внаслідок високої гігроскопічності частинок опоки при її мокрому доподрібненні (суспендуванні) відбувається загальне «замаслювання» системи з формуванням пластичної маси з низьким вмістом дисперсійного середовища. Все це разом перешкоджає якісному подрібненню опоки і формуванню суспензії з високодисперсною фазою на її основі, аналогічною за властивостями з кристалічним кварцовим піском.

Перліт, завдяки скловатій структурі, при механоактивації вільно розкладається на складові. Завдяки включенням у загальному об'ємі породи, серед яких можуть бути польові шпати, біотит і цеоліт, твердість яких значно нижча за мінерали поліморфного ряду кварцу, подрібнення перліту відбувається інтенсивніше як за часом, так і за дисперсністю кінцевого продукту (табл. 3.1).

Аналіз мікроструктурних особливостей активованих компонентів підтверджує отримані дані (рис. 3.2). У структурі подрібненого перліту сухим способом відзначаються частинки різного розміру, що підтверджує дані гранулометрії (рис. 3.2, б). Діапазон уламкового матеріалу коливається від 20–40 мкм – великі частинки вулканічного скла з характерним зломом та

високим вмістом частинок лещадної форми, до 1–5 мкм – рівномірно розподілена в об’ємі дрібнокристалічна фракція.

Таблиця 3.1 – Структурні показники кремнеземистих складових

Найменування матеріалу	Метод помелу	Питома поверхня, м ² /кг	Пористість, см ³ /г
Перліт	Сухий помол	4100	0,005
Опока		3700	0,014
Мінеральний модифікатор з перліту	Суспендування	7800	0,003
Мінеральний модифікатор з опоки		5900	0,008

Мінеральний модифікатор, який був отриманий суспендуванням подрібненого перліту, відрізняється меншими розмірами твердої фази (рис. 3.2, г). Загальна структура матеріалу характеризується більшою щільністю, що також підтверджується даними щодо нанопористості системи (табл. 3.1).

На відміну від перліту, подрібнена опока представляє собою скупчення агрегатів частинок розміром до 1 мкм, які покривають більш крупні частинки (10-20 мкм) (рис. 3.3).

Зважаючи на переважно аморфізовану речовину опоки, загальна маса активованого сухим способом компонента відрізняється пухкою розуцільненою структурою, що підтверджується значеннями пористості (табл. 3.1).

Модифікатор із опоки характеризується масивною структурою загальної маси речовини. Межі між зернами практично стерті. Загальна маса представляє собою глобули, які були сформовані в результаті злипання частинок в процесі диспергації в рідкій фазі, що перешкоджало якісному подрібненню породи з формуванням високодисперсної системи (табл. 3.1).

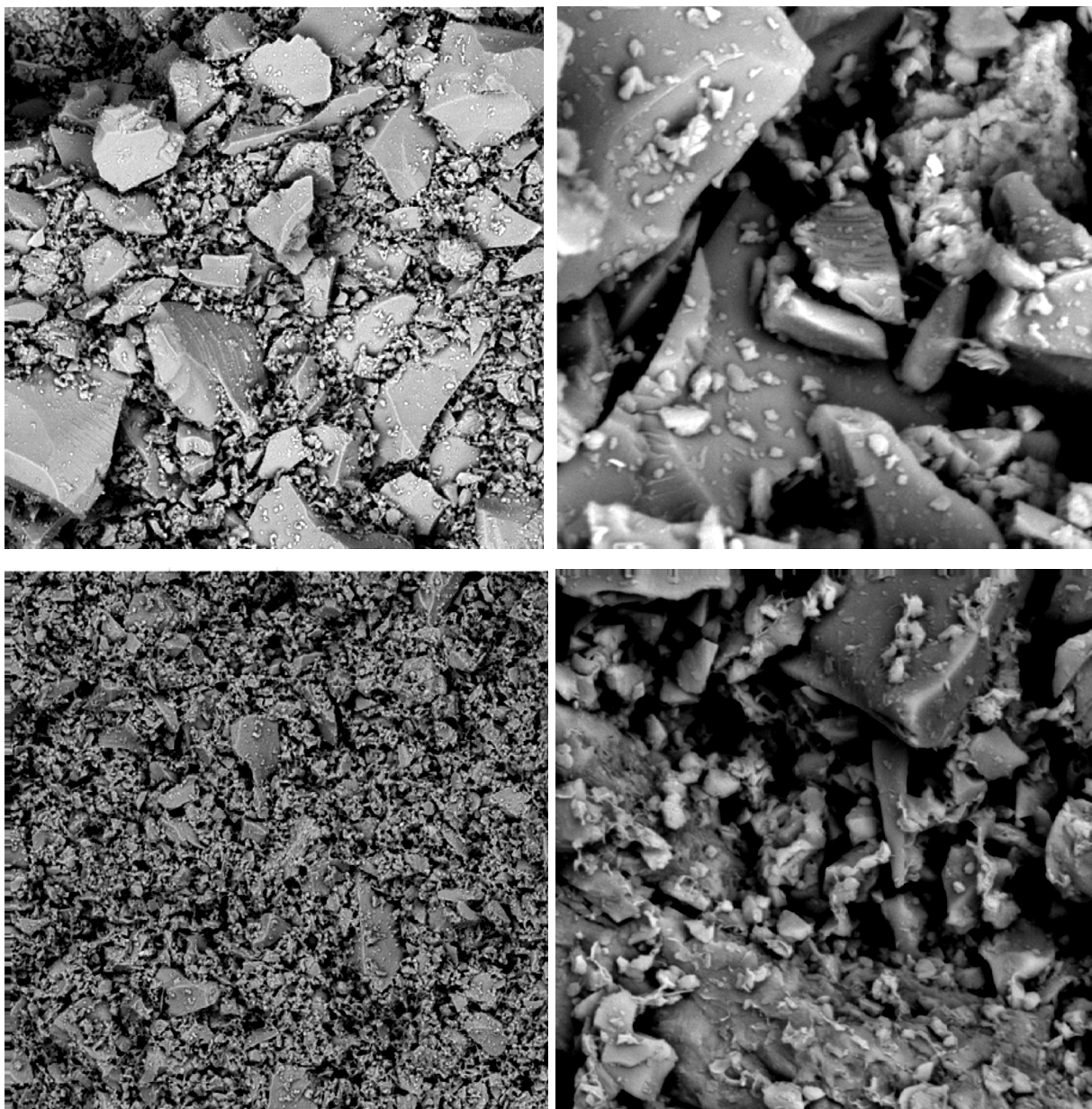


Рисунок 3.2 – Мікроструктура перліту, подрібненого різними способами: а, б – сухий помел; в, г – суспендування

Однією з головних характеристик кремнеземистих компонентів, які використовують як компоненти формувальної суміші виробів автоклавного твердіння, є їх активність.

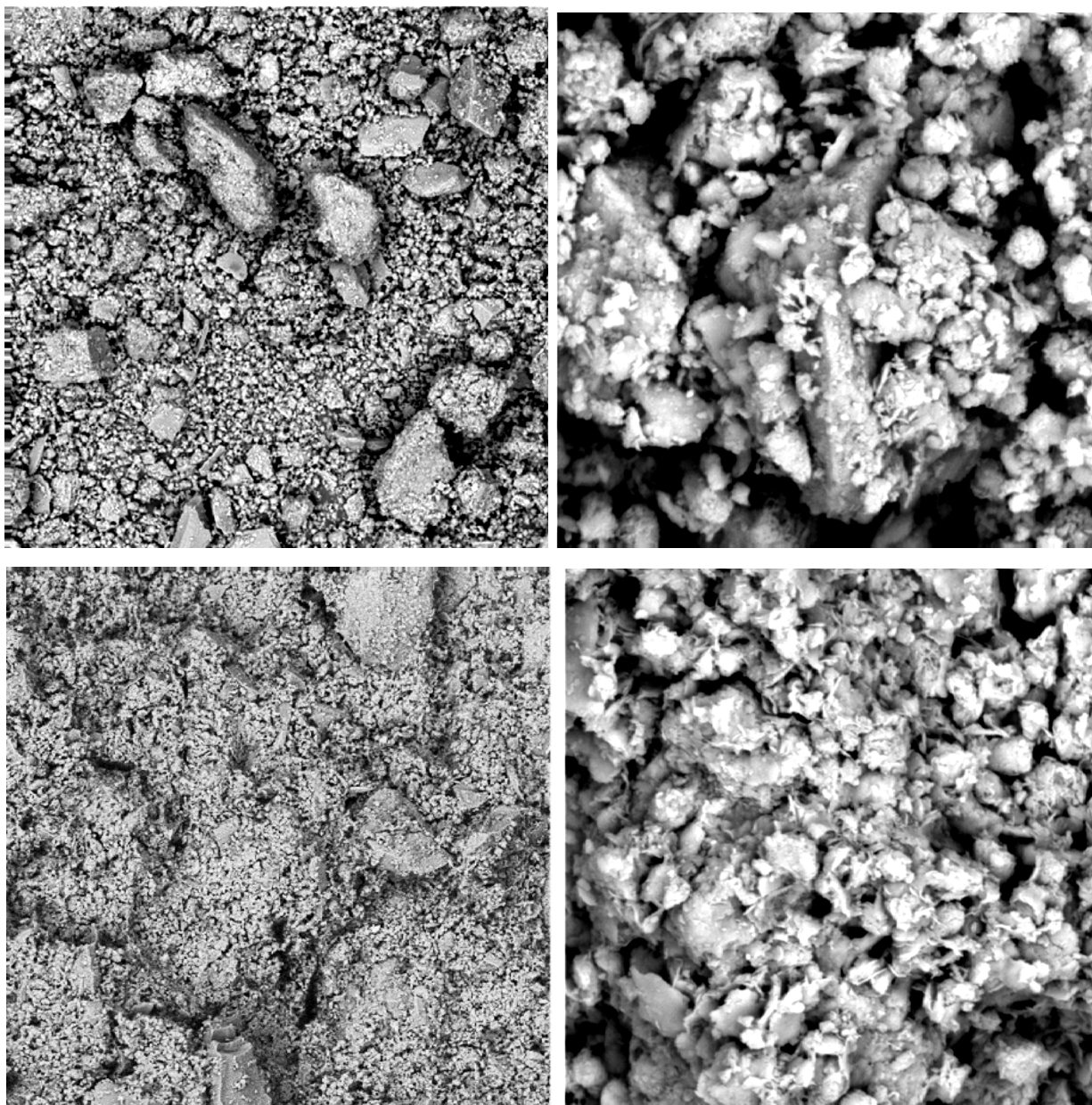


Рисунок 3.3 – Мікроструктура опоки, подрібненої різними способами:
а, б – сухий помел; в, г – суспендування

Таблиця 3.2 – Активність кремнеземистих компонентів

Найменування	Кількість поглиненого CaO, мг/г	Кількість активних кислотних центрів, мг·екв/г
Мінеральний модифікатор з перліту	118	45,2
Мінеральний модифікатор з опоки	112	25,8

Максимальною сумарною активністю за двома показниками характеризується модифікатор, одержаний на основі перліту. Кількість поглиненого СаО та активних центрів перевищує аналогічні показники для алюмосилікатної кристалічної сировини (граніту) на 30 та 40 % відповідно. При цьому перевищення кількості активних центрів на поверхні твердої фази для алюмосилікатної і силікатної аморфізованої сировини становить 1,8 рази. Це обумовлено вихідною «підготовленістю» породи (перліту) у частині скловатої структури, що забезпечує легку диспергованість компонента та високі показники дисперсності в сукупності з низькими значеннями пористості. Активна питома поверхня перлітових активованих компонентів відрізняється майже вдвічі, що також доводить формування значної кількості активних центрів на поверхні твердої фази, зумовлене розвиненою поверхнею компонента.

Незважаючи на значну дисперсність мінерального модифікатора з опоки, слід зазначити, що кількість активних центрів на поверхні твердої фази поступається аналогічним показникам для кристалічної та аморфізованої сировини різного складу. Це зумовлено реалізацією механічного подрібнення (збільшення ступеня дисперсності речовини) породи у процесі суспендування, на відміну перліту, при суспендуванні якого відбувалися процеси механоактивації сировини. Поглинання вільного СаО вапняного розчину відбувалося досить інтенсивно, що підтверджується відповідним значеннями. Поясненням цього є суттєва гігроскопічність породи. При суспендуванні відбувається накопичення вологи в об'ємі породи, її капсуляція. Однак, її кількості недостатньо для реалізації розклинюючої дії водного середовища. В результаті спостерігається злиття частинок із формуванням щільної маси, введення якої у вапняний розчин забезпечує додаткове поглинання СаО з розчину, що підтверджується відповідними показниками.

Таким чином, теоретично обґрунтовано можливість використання аморфізованих порід силікатного та алюмосилікатного складу для отримання

активного мінерального модифікатора автоклавних систем. Активність модифікуючих добавок обумовлена генетичними особливостями і специфікою технології їх отримання: високим ступенем аморфізації (наявність склоподібної фази); суттєвою полідисперсністю та полімінеральністю системи.

3.2 Визначення властивостей модифікованих сировинних сумішей

Формування властивостей ныздрюватого бетону починається з приготування суміші з певною рухливістю для якісного формування виробів. Розуміння процесів і властивостей пористої бетонної суміші, що відбуваються в цей період, дає можливість керувати процесами структуроутворення в газобетоні, що забезпечить формування масивів із заданими експлуатаційними характеристиками.

На реологічні властивості газобетонної суміші впливають: водотвердне співвідношення, питома поверхня компонентів, а також зміна температури під час приготування суміші. У разі відхилення цих параметрів від оптимальних спостерігається порушення мікро- та макроструктури готового продукту, що призводить до низьких показників техніко-експлуатаційних характеристик.

Наприклад, температура суміші у процесі формування на підприємствах регулюється за допомогою зміни співвідношення гарячої та холодної води [36]. Однак, градієнти температур у масивах під час приготування та спучування обумовлені в першу чергу процесом гасіння вапна, який нестационарний [13]. Одним із способів контролю цього процесу є, у тому числі, застосування дисперсних компонентів, що активно взаємодіють з компонентами суміші, забезпечуючи стабільність початкового структуроутворення композиту [38].

Незначна кількість високодисперсної речовини призводить до зміни реологічних характеристик системи. У зв'язку з цим були проведені дослідження з вивчення впливу на реологію пористої суміші наявності аморфізованого мінерального модифікатора двох різних складів.

На реологічні властивості суміші впливали показники вихідної сировини. Класичні цементні системи відрізняються тиксотропним перебігом своїх суспензій, тобто спостерігається різке зниження початкової в'язкості системи при найменшому навантаженні. Це зумовлює широку застосовність даного компонента при реалізації будь-яких технологій отримання будівельних матеріалів з його використанням. Тому вивчення реології цементу в роботі не проводилося, оскільки формувальна суміш з його застосуванням не відрізнятиметься від класичних.

Суспензії, які були отримані мокрим подрібненням вихідних компонентів за технологією ВКВС, як правило, характеризуються складною реологічною картиною [24]. У зв'язку з цим у роботі були вивчені реотехнологічні особливості мінеральних модифікаторів як основних компонентів суміші, що комплексно впливають на її властивості.

Обидва модифікатори характеризуються класичним тиксотропним характером: відзначається плавне зниження початкової в'язкості системи практично до нульового значення. Тим не менш, загальний характер перебігу обох суспензій з мінеральним модифікатором на опоці та на перліті дозволяє рекомендувати їх як складові формувальних сумішей, оскільки їх введення не вплине на характер реології сумішей.

Оскільки основним компонентом, що виконує структуроформуючу функцію в доавтоклавний період, у загальному об'ємі суміші є цемент, було прийняте рішення про ведення активного дисперсного компонента (ММ) замість частини цементу, у тому числі з метою його економії та зниження вартості. Крім того, в роботі [14] показано, що автоклавування цементної системи призводить до формування альфагідрату двокальцієвого силікату, наявність якого в загальній масі кристалічних утворень небажана, оскільки

дане з'єднання є найменш стабільною речовиною, що піддається фазовим і об'ємним перетворенням при мінімальних змінах системи.

Розрахунок складу сировинної суміші здійснювався відповідно до СН 277-80, а також з урахуванням розроблених складів та вимог до сировинних компонентів. Дослідження реологічних властивостей здійснювалося на формувальних сумішах без поризуючої добавки з різним вмістом мінеральних модифікаторів різного складу: від 10 до 50% з градацією 10% і 100 %, тобто повне виключення цементу зі складу суміші.

В'язкість складів з добавкою перліту в середньому в два рази перевищує аналогічні показники для сумішей з добавкою з опоки.

Найбільшою початковою в'язкістю відрізняються склади з заміною цементу на мінеральний модифікатор (ММ). Початкова в'язкість безцементного складу з модифікатором на основі перліту більш ніж у 2 рази вище, ніж у складу з аналогічним вмістом ММ на основі опоки, що пояснюється великою кількістю активних центрів, що сприяють утворенню первинних сполук.

Варто відзначити, що більшою початковою в'язкістю (у випадку зі складами з додаванням ММ на основі опоки), у порівнянні з контрольним, має тільки суспензія з повною заміною цементу на модифікатор, у той час як практично всі значення початкової в'язкості на реограмі газобетонних сумішей з додаванням ММ на перліті лежать вище точки початкової в'язкості, що відповідає контрольному складу, що також підтверджує більшу активність ММ на основі перліту.

Визначено, що текучість суспензій з добавкою ММ на основі опоки фіксуються менші значення напруги зсуву в порівнянні з контрольним зразком і з зразками з використанням ММ на перліті, що свідчить про наявність великої кількості води, яка служить мастилом, що перешкоджає тертю між частинками під час руху. Характер перебігу майже всіх систем ідентичний, крім зразків із вмістом опоки понад 20%. При збільшенні градієнта швидкості зсуву відбувається руйнування коагуляційної структури

систем, що призводить до падіння напруги зсуву та в'язкості системи. Надалі перебіг суспензій проходить при мінімальних значеннях в'язкості системи, що прагнуть до нуля.

В залежності від виду сировини переважне значення мають різні фактори. У разі опоки має місце фізичний фактор на систему за рахунок високої сорбуючої здатності компонента; у разі перліту збільшення в'язкості обумовлюється хімічною взаємодією активної складової модифікатора з компонентами суміші з формуванням первинних новоутворень та досить стійкої коагуляційної структури суміші.

Отримані значення початкової в'язкості безцементних складів дозволяють прогнозувати вищі показники газотримуючої здатності суміші, оскільки між ними існує пряма залежність.

Отримано збільшення початкової в'язкості систем при введенні модифікуючих компонентів різного складу, що обумовлено високою дисперсністю модифікаторів, їх фізико-хімічною активністю по відношенню до основних компонентів суміші, а також процесами взаємодії складових системи. Все це дозволяє прогнозувати високі показники щодо газотримуючої здатності масивів та забезпечення формування раціональної структури композиту з необхідними експлуатаційними характеристиками готових виробів.

3.3 Порізація суміші з добавками мінеральних модифікаторів

Невисокі техніко-експлуатаційні характеристики ніздрюватих бетонів автоклавного твердіння диктують використання їх у будівництві лише в малоповерховому будівництві та каркасною технологією. Технологічні обмеження отримання високих показників міцності, морозостійкості та інших критеріїв високоефективного матеріалу пов'язані з великою кількістю

дефектів стінок силікатного каменю які розділяють повітряні осередки, що пов'язано з неякісною поризацією суміші. Це ставить завдання оптимізації процесів спучування та структуроутворення системи.

Модифікатор вводили до складу сумішей замість цементу. Кінетику поризації сумішей оцінювали за методикою, описаною у роботі [14].

На основі отриманих даних можна зробити висновок про те, що наявність модифікатора у складі суміші сприяє інтенсифікації процесів структуроутворення газобетонного масиву в доавтоклавний період.

Таблиця 3.3 – Показники параметрів спучування газобетонних сумішей

Вміст мінерального модифікатора, %	Приріст об'єму суміші				Коеф. спучування	
	см ³		%			
0 (контрольний)	74		56,9		1,57	
	перліт	опока	перліт	опока	перліт	опока
10	76	75	58,5	57,7	1,59	1,58
20	78	78	60	60	1,60	1,60
30	85	83	65,4	63,8	1,65	1,64
40	94	89	72,3	68,5	1,72	1,69
50	102	100	78,5	77	1,79	1,77
100	119	116	91,5	89,2	1,92	1,89

Зі збільшенням концентрації модифікаторів в суміші спостерігається приріст об'єму масиву порівняно з вихідним контрольним зразком без добавки: до 60 % для модифікатора з перліту та до 55 % для добавки з опоки (табл. 3.3).

Відзначається збільшення коефіцієнта спучування складів із добавкою модифікатора. При цьому коефіцієнт спучування суміші безцементного складу з модифікатором з перліту вище за аналогічний показник для сумішей з опокою. Збільшення коефіцієнта спучування сумішей з модифікатором перевищує аналогічне значення для контрольного складу без модифікатора на 22% при використанні алюмосилікатної добавки і на 20% - при

використанні силікатного модифікатора.

Згідно з отриманими даними, запровадження добавок-модифікаторів дещо інтенсифікує процеси спучування газобетонної суміші. Так, збільшення об'єму суміші у перші 20 секунд реакції газовиділення у сумішах з модифікатором вище в залежності від концентрації добавки.

Варто зазначити, що чисельна різниця приросту об'єму в залежності від складу модифікатора незначна (до 6-10%). При цьому введення модифікуючих компонентів забезпечує скорочення спучування сумішей при зниженні частки цементу у складі сумішей від 8 до 35 % в залежності від складу суміші.

Повне виключення цементу зі складу сумішей із заміною на активні модифікуючі компоненти скорочує час реакції майже вдвічі. Це створює передумови зниження часу попередньої витримки масивів, що забезпечить скорочення енерговитрат виробництва ніздрюватих бетонів та виробів з них.

Зазначені факти обумовлені властивостями модифікаторів (активністю, дисперсністю), оптимізацією реологічних характеристик системи у присутності добавок, і навіть скороченням вмісту цементу.

Наявність цементу у складі сумішей з одного боку, гарантує скорочення усадочних деформацій у процесі первинного структурування системи до автоклавної обробки. З іншого боку – при підвищених температурах витримки масивів (40–50°C) гідратація цементу прискорюється, що являється структуроутримуючим чинником, тобто газовиділення триває, але збільшення об'єму масиву немає.

В результаті подальше спучування відбувається «вхолосту» з виходом газу в атмосферу та формуванням додаткових осередків (пор) та порожнин, що забезпечують структурну недосконалість масиву та зниження основних експлуатаційних показників.

Введення модифікаторів (незалежно від їх складу) забезпечує деяке формування необхідної в'язко-пластичної системи, в якій реакція основного сполучного з гідроксидом алюмінію відбувається при збереженні темпів і

об'ємів газу, що виділяється, однак, за рахунок деякого загушення системи, перешкоджає виходу сформованого газу з суміші, що обумовлює суттєвий приріст її об'єму.

Таким чином, встановлені особливості порізації пористих сумішей з додаванням модифікаторів.

Введення добавок забезпечує інтенсифікацію газовиділення та суттєве збільшення об'ємів суміші. Це зумовлено властивостями модифікаторів та скороченням частки клінкерної складової у складах суміші, що призводить до формування системи з оптимальними в'язко-пластичними властивостями.

З технологічної точки зору запровадження модифікаторів при виробництві дозволить знизити час дозрівання масиву, а також витрату газоутворювача, або одержувати вироби нижчої щільності із збереженням колишніх норм витрати алюмінієвої пасти.

4 СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРА ГАЗОБЕТОНУ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДІННЯ З МОДИФІКАТОРАМИ

Газобетон автоклавного твердіння найбільш масштабно застосовується у будівництві як конструкційно-теплоізоляційний матеріал. Для підвищення конкурентоспроможності виробів у виробничих умовах стоїть завдання збільшення коефіцієнта конструктивної якості матеріалу, що полягає у збільшенні характеристик міцності при одночасному зниженні його густини.

Техніко-експлуатаційні властивості пористих виробів безпосередньо залежать від макро- і мікропористості композиту, сформованих у процесах доавтоклавного структуроутворення, а також від складу та властивостей компонентів, що входять до нього, що забезпечують формування необхідного складу новоутворень і структури під час гідротермальної обробки.

Враховуючи той факт, що матеріали розпорядкованої структури

спочатку мають більшу активність, в далі було вивчено вплив мінеральних модифікаторів на основі аморфізованої сировини на процеси фазоутворення, що протікають у гідротермальних умовах, а також кінцеві властивості готових пористих виробів.

4.1 Мінералоутворення в газобетонних системах з добавкою мінеральних модифікаторів

Зважаючи на багатокомпонентність досліджуваної системи та високу складність ідентифікації окремих, найчастіше рентгеноаморфних, фаз мінералоутворення в умовах гідротермального синтезу було взято за основу систему складу «вапно – модифікатор з аморфізованої сировини» при співвідношенні компонентів 1:3; 1:1,5; 1:1; 1,5:1 та 3:1. Кремнеземна складова у вигляді піску як заповнювача та цемент були виключені з системи для «чистоти» ідентифікації фаз, новоутворених у результаті взаємодії вапняного та аморфізованих компонентів.

Слід зазначити, що прийняті у роботі співвідношення основних взаємодіючих компонентів вище реальних, що використовуються під час виробництва силікатних матеріалів автоклавного твердіння (зазвичай, співвідношення вапно:пісок перебуває у межах 1:5). Такі завищені концентрації складових композиції обрані для гарантії взаємодії компонентів та кристалізації новоутворень, що ідентифікуються. Оцінка концентрації сформованої після гідротермальної обробки рентгеноаморфної речовини та аналіз впливу мінерального складу автоклавованих в'язучих систем на міцність не проводилися.

Слід відзначити, що дифракційні методи не дають інформації щодо будови аморфних утворень. Виняток становлять лише рентгенівські методи визначення параметрів ближнього порядку. Дані про кількісні

концентраційні показники новоутворених гідросилікатів кальцію як продуктів викристалізованих з С-S-H-гелю дають достатню основу для висновків щодо фазового складу гелю.

Як основний аналітичний інструмент для діагностики та кількісного визначення вагових концентрацій кристалічних мінеральних утворень у консолідованих в'язучих використовувався метод повнопрофільного кількісного РФА.

Частка кристалічних новоутворень, яких у загальному об'ємі сформованих фаз залежно від співвідношення компонентів системи «вапно – мінеральний модифікатор» міститься в діапазоні 55–85% у при використанні ММ опоки, вихідна концентрація аморфної компоненти в якому становить приблизно 60%, і 20-70% у разі ММ з перліту, вихідна концентрація аморфної компоненти в якому становить приблизно 90%. Вміст аморфної компоненти співвідноситься зі ступенем розбавлення ММ вапном.

Дослідні композиції «вапно – ММ із опоки»

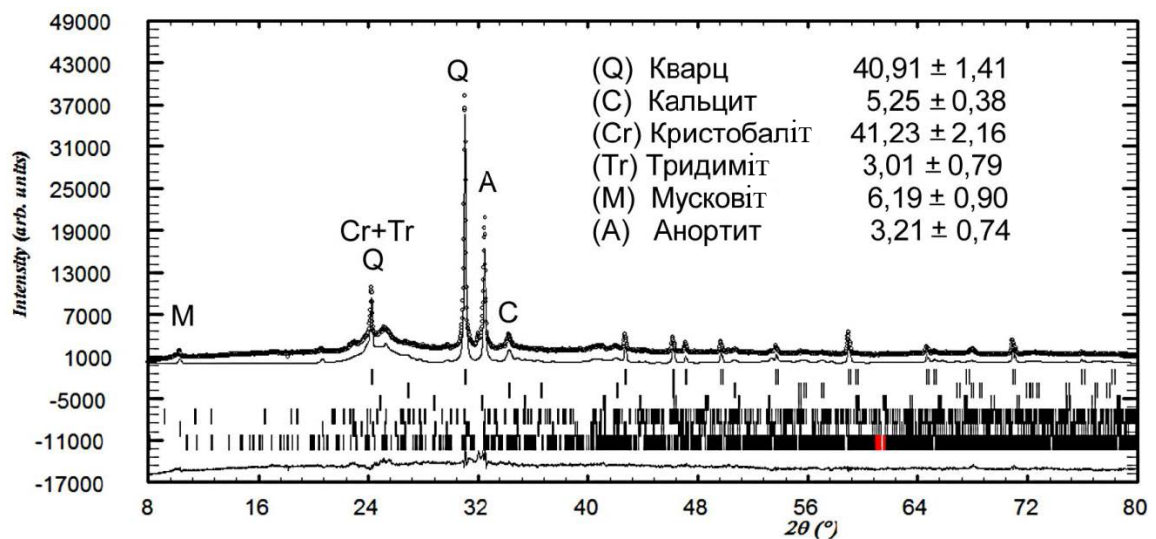


Рисунок 4.1 – Результат повнопрофільного кількісного РФА модифікатора з опоки

Як видно з результатів РФА (рис. 4.1), мінеральний склад модифікатора ідентичний мінеральному складу вихідної кремнеземної сировини - опоки. При цьому основу цього мінерального утворення осадового походження становлять, крім дрібнокристалічного кварцу, наноструктуровані мінеральні

форми кремнезему – низькотемпературні кристобаліт та тридиміт, які є компонентами СТ-опалів (від англійської аббревіатури Cristobalite-Tridymite).

Рентгенометрична діагностика показала, що у складі модельних в'яжучих композицій після автоклавної обробки присутні такі гідросилікати кальцію, як $\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_{2.5}(\text{H}_2\text{O})$ та $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$ ($\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4)\cdot(\text{H}_2\text{O})$) (рис. 4.2).

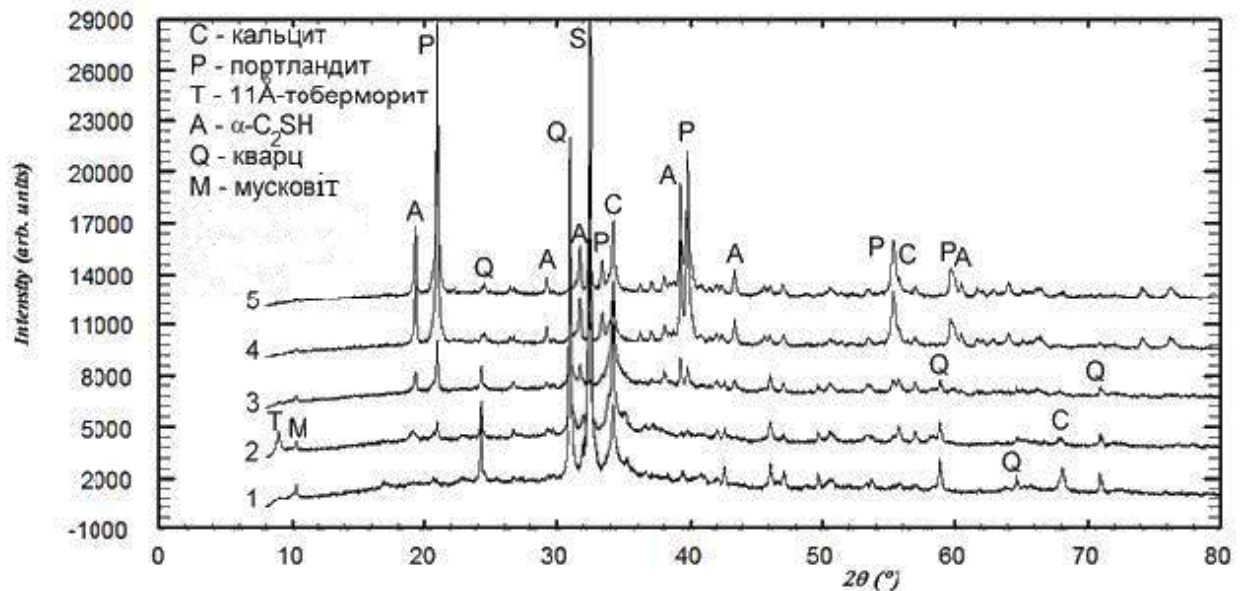


Рисунок 4.2 – Рентгенограма автоклавних модельних в'яжучих композицій системи «вапно - ММ з опоки» в співвідношенні 1 – 1:3; 2 – 1:1,5; 3 – 1:1; 4 – 1,5:1; 5 – 3:1

На всіх рентгенограмах відсутні ознаки існування у модельних композиціях нанорозмірних кристалічних форм кремнезему у вигляді СТ-опалу (рис. 4.2, 1–5). Це значить, що СТ-опал був повністю розчинений у лужному середовищі вапна і вступив з нею в реакційну взаємодію з утворенням гідросилікатного гелю, з якого частково закристалізувалися зафіксовані рентгенографічно 11Å-тоберморит і $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$.

Кількісний аналіз мінерального складу сформованих фаз дозволяє зробити висновок про строгу залежність фазового складу композиції від вихідного співвідношення компонентів (таблиця 4.1).

Підвищення вмісту кремнеземистого компонента у системі викликає дефіцит взаємодіючих компонентів. Спостерігається формування малої

кількості кристалічних низькоосновних гідросилікатів кальцію. При збільшенні частки вапняного компонента (1:1,5) отримуємо оптимальне співвідношення реагуючих фаз, що призводить до формування більшої кількості тобермориту. Подальше зміщення співвідношення основних взаємодіючих компонентів призводить до дефіциту активного реакційного кремнезему, і як наслідок відбувається формування нестабільних високоосновних новоутворень типу α -C₂SH.

Таблиця 4.1 – Мінеральний склад модельних в'язучих композицій системи «вапно-ММ з опоки» після автоклавної обробки

Мінеральні складові	Співвідношення компонентів системи вапно:ММ з опоки				
	1:3	1:1,5	1:1	1,5:1	3:1
Кварц	68,60±2,34	32,93±1,38	24,41±1,21	2,59±0,19	1,52±0,13
Портландит	0	9,30±0,97	20,82±1,11	47,89±1,95	48,50±1,97
Кальцит	17,43±0,86	29,27±4,02	24,71±3,12	6,57±0,75	0
11Å-тоберморит	2,39±1,24	13,19±1,03	1,98±0,85	0	0
α -C ₂ SH	0	3,46±1,68	20,33±1,42	40,43±1,58	39,84±1,58
Мусковіт	11,58±2,10	11,85±1,74	7,76±2,31	2,52±1,72	2,78±1,02

Збільшення кількості кремнеземистого компонента в системі призводить до дефіциту взаємодіючих компонентів. Відбувається формування незначної кількості кристалічних низькоосновних гідросилікатів кальцію. Збільшення частки вапняного компонента (1:1,5) сприяє оптимальному співвідношенню реагуючих фаз, що призводить до формування більшої кількості тобермориту. Подальше зміщення співвідношення основних взаємодіючих компонентів призводить до дефіциту активного реакційного кремнезему, що викликає формування нестабільних високоосновних новоутворень типу α -C₂SH.

В лабораторії експериментально визначені межі існування для 11Å-тобермориту приблизно 37 мас. % СаО та α -C₂SH приблизно 60 мас. % СаО (рис. 4.4 та 4.5).

Привертає увагу відсутність на рентгенограмах затверділих в'язучих композицій широких профілів відображення характерного для СТ-опала,

присутніх на рентгенограмах опоки і модифікатора на її основі. При цьому концентрація кварцу в затверділих зразках модельних в'язучих композицій суттєво відрізняється від теоретичних значень, які можуть бути отримані із значень концентрацій кварцу у вихідному сировинному матеріалі (опоці), розведених до модельних концентрацій. Наприклад, якщо концентрація кварцу в опоці дорівнює 38 мас.%, то в модельних складах (у припущенні відсутності взаємодії з компонентами в'язучої системи) вона повинна дорівнювати:

$$C_{\text{ММ}} \times C_{\text{Кварц в опоці}}$$

де $C_{\text{ММ}}$ - концентрація мінерального модифікатора в модельній композиції.

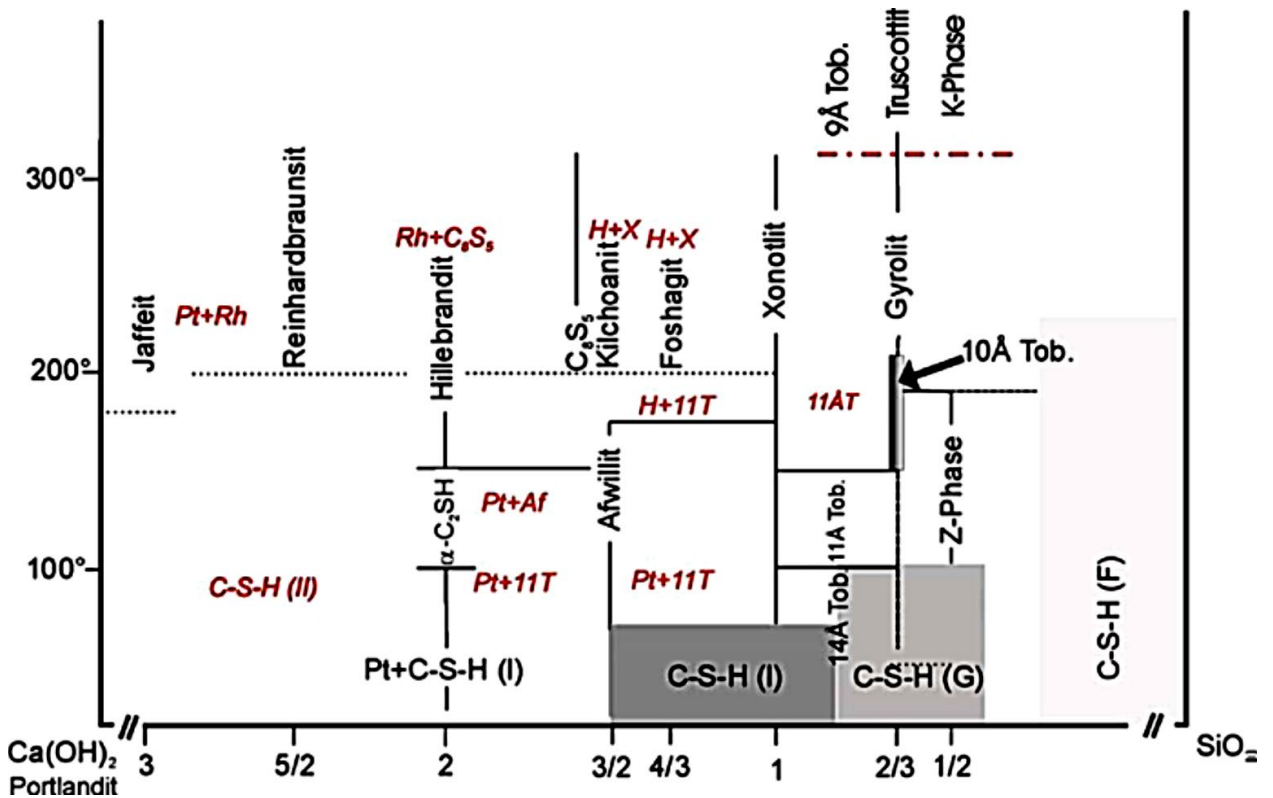


Рисунок 4.4 – Температурно-концентраційні області утворення гідросилікатів кальцію за [14]

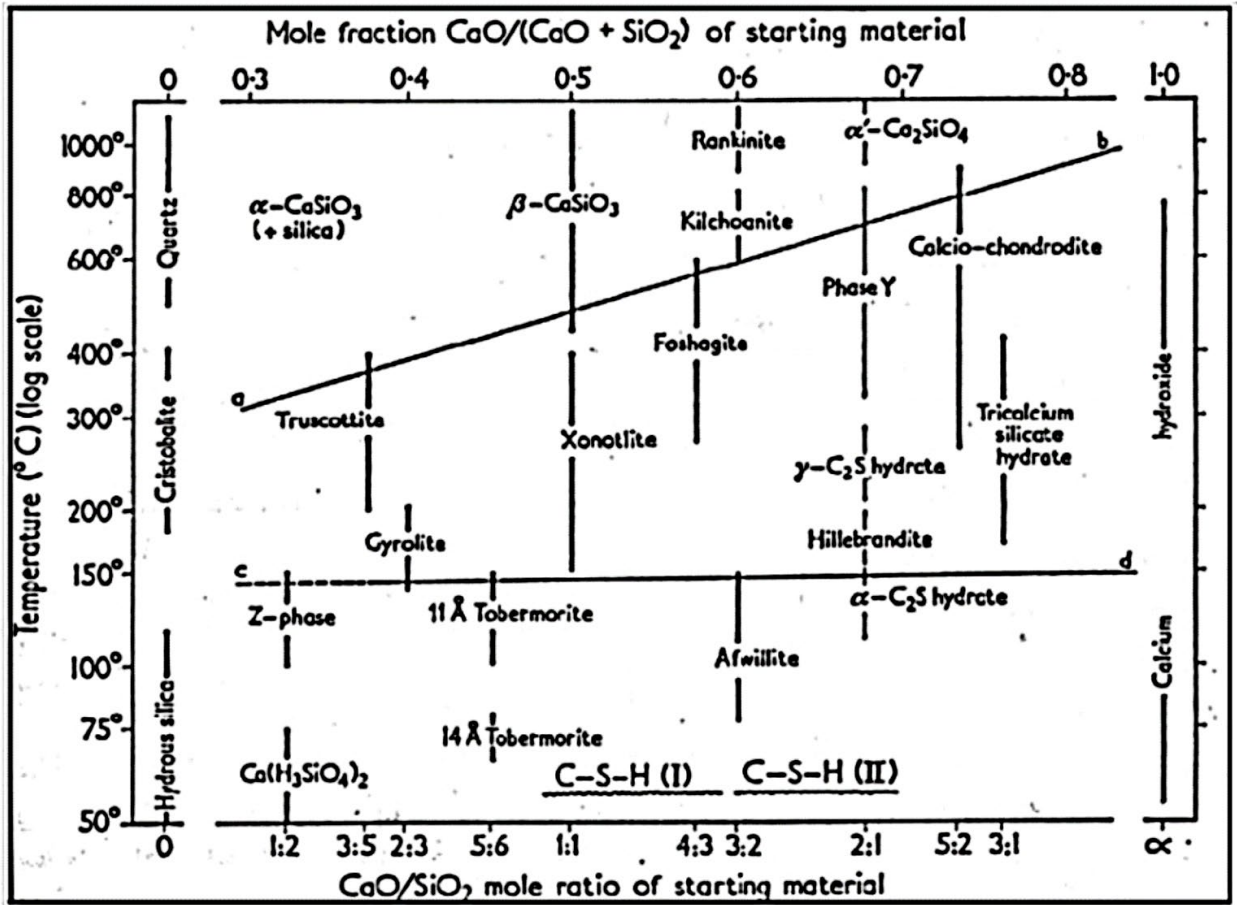


Рисунок 4.5 - Температурно-концентраційні області утворення гідросилікатів кальцію за [15]

Беручи до уваги, що основним реакційно-активним компонентом опоки при синтезі мінерального модифікатора на її основі є наноструктурована форма кремнезему у вигляді СТ-опалу (низькотемпературний кристаболіт і тридиміт), то логічно припустити, що кремнезем саме цих мінеральних утворень в братиме участь у формуванні C-S-H гелю, з якого викристалізуюватимуться гідросилікати кальцію.

На рисунку 4.6 представлені залежності розрахункової та експериментально визначеної концентрацій кварцу в модельних в'язучих композиціях, залежно від концентрації в них ММ.

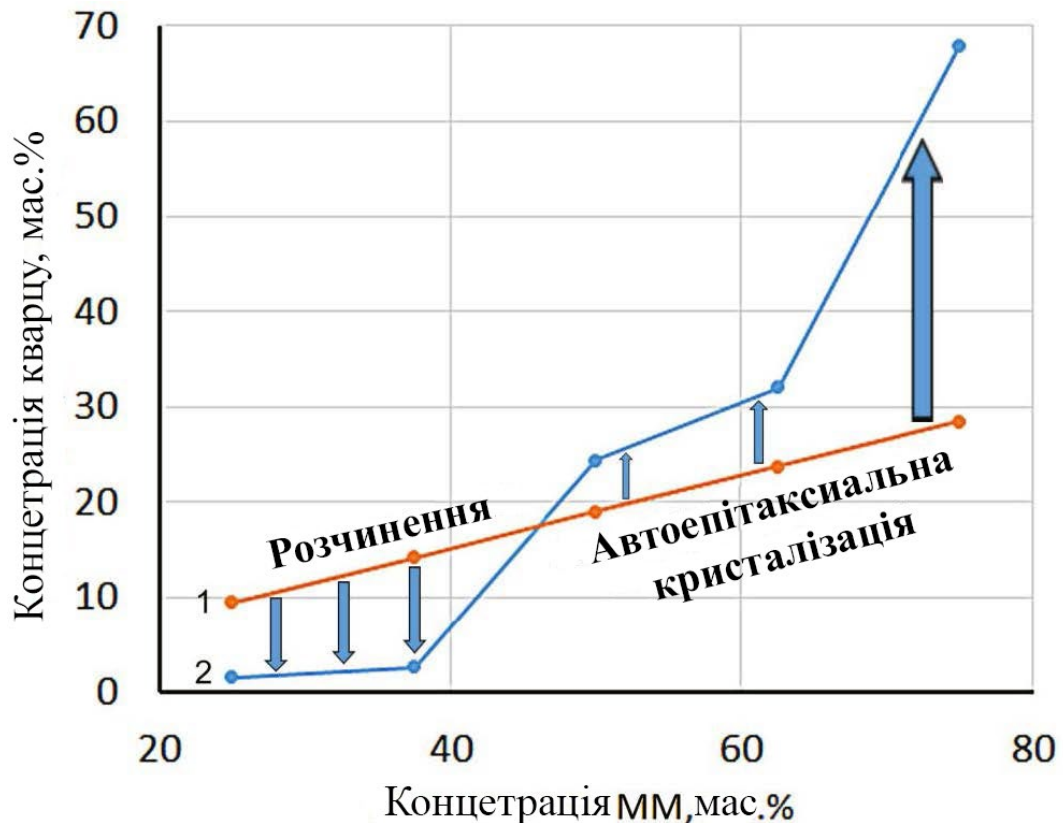


Рисунок 4.6 – Залежність концентрації кварцу від концентрації модифікатора в модельних композиційних сумішах: 1 – розрахункова, 2 – експериментальна

Суттєва відмінність концентраційних залежностей одна від одної може бути пояснена як результат розчинення кварцу у високоосновній області модельних складів (частина діаграми з областю розчинення).

Перевищення експериментально визначених концентрацій кварцу над його теоретичними значеннями (частина діаграми з автоепітаксимальною кристалізацією), є наслідком автоепітаксимальної кристалізації колоїдного кремнезему на кристалічних осередках кварцу.

Модельні композиції системи «вапно – ММ із перліту».

Мінеральний модифікатор на основі породи вулканогенно-осадового походження – перліту значно відрізняється мінеральним та фазовим складом від ММ на основі опоки.

За даними РФА перліт складається переважно з рентгеноаморфної речовини. Складність однозначного визначення мінерального складу перліту

полягає в нанорозмірному стані його мінеральних компонентів. Зокрема, на рентгенограмі перліту, крім інтенсивного профілю аморфної фази (так званого «гало»), фіксуються окремі селективні відбиття кристалічних мінеральних компонентів (рис. 4.7). На відміну від опоки, кристалічні утворення перліту представлені переважно кварцом, тоді як у опоці переважно відзначаються опалові утворення. Це можна пояснити генезисом порід: формування кремнезему як опала неможливо за умов формування еффузивних порід.

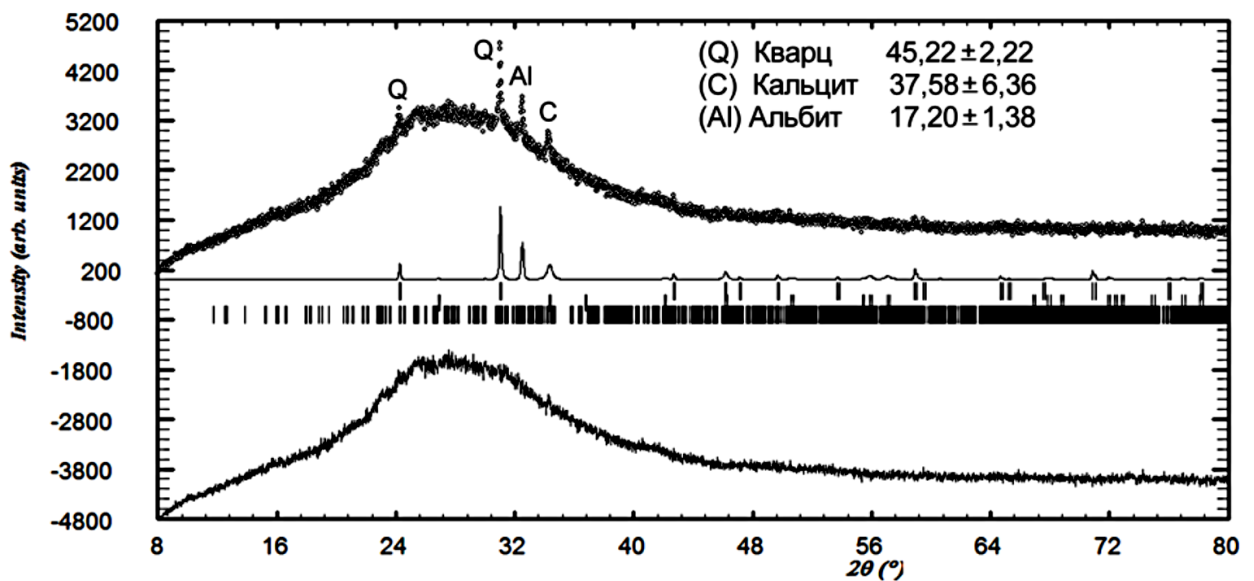


Рисунок 4.7 – Оцінка повнопрофільного кількісного РФА кристалічних мінеральних компонентів перліту

Аналіз кількісного вмісту аморфної компоненти перліту не проводилося, але за співвідношенням інтегральних інтенсивностей дифракційних профілів аморфної та кристалічних компонентів можна зробити висновок, що вміст аморфної компоненти в перліті не менше 95 мас. %.

Мінеральний склад модельних в'язучих композицій системи «вапно – ММ з перліту» після обробки автоклаву, визначений методом кількісного повнопрофільного РФА, який схожий з аналогічними даними для модифікатора з опоки (рис. 4.9, табл. 4.4).

Основна маса кристалічних утворень представлена низькоосновними гідросилікатами кальцію, зокрема тоберморитом. Проте концентрація кристалічної новоутвореної речовини вище порівняно з модельними системами із опоки.

Максимальна концентрація тобермориту в разі модифікатора з перліту відзначається при рівному співвідношенні взаємодіючих компонентів (співвідношення вапно:ММ з перліту 1:1), тоді як у випадку добавки з опоки потрібно більше кремнеземистого компонента (співвідношення вапно:ММ із опоки 1:1,5). При цьому при зазначених співвідношеннях компонентів системи, кількість закристалізованого тобермориту при використанні перліту перевищує аналогічне значення при введенні опоки майже вдвічі (табл. 4.1, 4.4).

Варто відзначити відсутність алюмінатних сполук, що фіксуються при використанні кристалічних алюмосилікатних порід (наприклад граніту) [8].

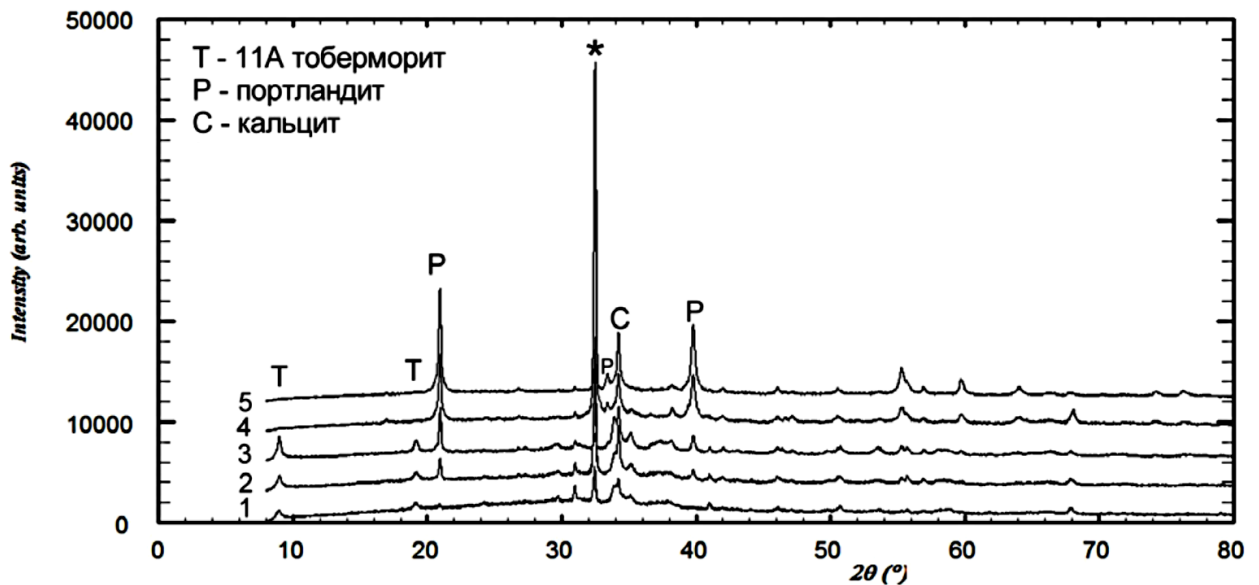


Рисунок 4.9 – Рентгенограма модельних композицій системи «вапно-ММ з перліту» після автоклавної обробки у співвідношенні: 1 – 1:3; 2 – 1:1,5; 3 – 1:1; 4 – 1,5:1; 5 – 3:1

Талиця 4.4 - Мінеральний склад модельних в'язучих композицій системи «вапно-ММ з перліту» після автоклавної обробки

Мінеральні складові	Співвідношення компонентів системи вапно:ММ з опоки				
	1:3	1:1,5	1:1	1,5:1	3:1
Кварц	1,46±0,05	0,99±0,11	0,78±0,08	0	0
Портландит	0,23±0,12	2,24±0,14	4,62±0,20	13,06±0,54	15,34±0,39
Кальцит	83,94±10,75	80,30±6,72	67,78±5,51	81,99±7,39	82,31±8,36
11Å-тоберморит	11,87±1,01	16,47±0,96	23,05±1,26	2,04±0,64	0,84±0,38
Корунд	2,50±0,17	0	0	0	0
Магнезит	0	0	2,65±0,41	2,91±0,51	1,51±0,41

Можна зробити висновок, що відсутність алюмінатних фаз на рентгенограмах пояснюється наявністю в складі перліту калінатрієвих польових шпатів, які відрізняються низькою розчинністю, що обумовлено високим ступенем полімеризації кремнеземного силікатного компоненту в їх структурі, а також високим вмістом рентгеноаморфної фази у новоствореній речовині, ідентифікація складу якої рентгенівськими методами неможлива.

На основі отриманих даних запропоновано механізм фазоутворення в модельних системах «вапно – мінеральний модифікатор» з урахуванням хіміко-мінеральних особливостей аморфізованої сировини та технології отримання модифікатора. Використання опоки (силікатна сировина) у високих концентраціях призводить до розчинення активного кремнезему та його взаємодії з вапном з формуванням гідросилікатного гелю та його подальшої кристалізації низькоосновні гідросилікати тоберморитової групи. При цьому надлишок розчиненого кремнезему сприяє його епітаксійної кристалізації на твердих частинках різного складу. Скорочення частки опоки в системі призводить до зміщення рівноважних концентрацій основних компонентів, необхідних для утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію, та формування нестабільних α -C2SH-утворень.

Використання перліту (алюмосилікатна сировина) забезпечує стійке формування низькоосновних гідросилікатів кальцію, що обумовлено

наявністю у складі перліту рентгеноаморфного кварцу. Відсутність алюмінатних (алюмініймістких) кристалічних новоутворень обумовлено малорозчинними калінатрієвими польовими шпатами, що входять до складу перліту з високим ступенем полімеризації силікатної складової.

Для формування максимальної кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію – гарантів міцності виробів автоклавного твердіння – оптимальним співвідношенням взаємодіючих компонентів системи «вапно – мінеральний модифікатор» варто вважати 1:1 у разі використання перліту та 1:1,5 у разі використання опоки.

4.2 Вплив складу модифікованої суміші на властивості пористих газобетонних сумішей

Газобетон автоклавного твердіння успішно поєднує всі найважливіші властивості сучасного будівельного матеріалу. При цьому найбільший вплив на якість виробів з газобетону надає склад сировинних матеріалів. Розуміння механізмів впливу кожного компонента суміші окремо та в цілому створить можливість цілеспрямовано керувати властивостями композиту на усіх стадіях виробництва.

Мінеральні модифікатори інтенсифікує процеси порізації та структуроутворення суміші у доавтоклавний період. Основним завданням цього етапу досліджень є вивчення характеру впливу мінеральних модифікаторів з аморфізованої сировини різного складу на властивості газобетону автоклавного твердіння.

Для вивчення фізико-механічних характеристик пористих виробів були заформовані зразки-куби з розміром 10x10 см. Мінеральні модифікатори вводили замість цементу відповідно з певним дозуванням (розділі 3). Далі зразки витримувалися в тепловологому середовищі для проходження

процесів порізації суміші. Після цього розформовані зразки проходили автоклавну обробку. Після повного охолодження кубки були випробувані на основні фізико-механічні властивості (таблиця 4.5).

Варто відзначити, що збільшення вмісту модифікатора в суміші сприяє зменшенню щільності готових виробів. Спостерігається зниження марки за щільністю D500 (контрольний склад) до D400. При цьому загальне падіння щільності у випадку зі зразками ММ на основі перліту становить 29 %, а для виробів з ММ на основі опоки – 24 %. Зразки, у складі яких присутня ММ на основі перліту відрізняються нижчими показниками щільності порівняно з виробами з додаванням модифікатора на основі опоки з аналогічним відсотковим вмістом, що підтверджує отримані результати коефіцієнта спучування сумішей і збільшення об'єму.

Таблиця 4.5 – Властивості газобетонних виробів різного складу

Вміст ММ, %	Густина, кг/м ³	Марка за густиною	Межа міцності на стиск, МПа	Клас міцності
Контрольний зразок	532	D500	4,02	B3,5
На основі перліту				
10	523	D500	5,31	B5
20	513	D500	4,87	B3,5
30	502	D500	4,58	B3,5
40	473	D450	4,21	B3,5
50	451	D450	3,43	B2,5
100	420	D400	2,85	B2,5
На основі опоки				
10	519	D500	4,73	B3,5
20	509	D500	4,33	B3,5
30	495	D500	3,85	B3,5
40	464	D450	3,14	B3,5
50	443	D450	2,8	B2,5
100	407	D400	2,12	B1,5

Ефект зниження марки за густиною пояснюється високою початковою активністю мінерального модифікатора по відношенню до вапна, що призводить до інтенсифікації процесів спучування та газоутворення в суміші,

а також меншою щільністю сировинних компонентів модифікатора в порівнянні з цементом.

На теперішній час виробниками газобетону реалізовані технології отримання виробів з газобетону з марками за щільністю до D100, проте, практичну реалізацію матеріали з щільністю нижче D400, як правило, не отримують через недостатню міцність таких виробів, що вимагає особливі умови з транспортування та безпосередньої роботи з такими виробами при зведенні будівель. Введення ММ на основі перліту в діапазоні 10–50 %, при одночасному зниженні щільності композитів сприяє збільшенню міцності до 30 %, а використання ММ на основі опоки у складі сировинної суміші – до 20%.

Подальше збільшення відсотка вмісту модифікатора призводить до незначного зниження міцностних властивостей зразків газобетону. Газобетонні матеріали з використанням модифікуючого компонента незалежно від його складу характеризуються істотним запасом міцності, що дозволить розширити номенклатуру продукції на виробничих підприємствах при одночасній економії матеріальних ресурсів.

Зниження густини, що забезпечується інтенсифікацією процесів порізації суміші, сприятиме поліпшенню ізолюючої здатності матеріалів. Для підтвердження отриманих даних проводилися дослідження вимірювання коефіцієнта теплопровідності зразків газобетону різного складу методом циліндричного зонда.

Збільшення кількості модифікатора у системі призводить до зниження коефіцієнта теплопровідності (табл. 4.6). Варто відзначити невелику різницю у показниках теплопровідності матеріалів, залежно від складу аморфізованої сировини для модифікатора. Це можна пояснити подібним характером впливу обох модифікаторів на систему: відзначається зниження щільності суміші зі збільшенням ступеня її спучування. Незначні відхилення показників теплопровідності для добавок різного складу можна пояснити механізмом їх впливу: у разі додавання силікатної опоки більшою мірою

відбувається «механічний» вплив у частині ущільнення суміші та сорбції активного компонента; у випадку додавання алюмосилікатного перліту відбувається хімічне зв'язування компонентів суміші із формуванням щільної замкнутої структури.

Таблиця 4.6 – Показники теплоізоляційних властивостей зразків газобетону з модифікаторами

Вміст ММ, %	Коеф. теплопровідності, Вт/(м·°С)	
	ММ на основі опоки	ММ на основі перліту
0	0,120	
10	0,113	0,111
20	0,109	0,108
30	0,106	0,105
40	0,102	0,100
50	0,097	0,095
100	0,080	0,078

Відповідно до основного нормативного документу властивості газобетону (ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови») повинні відповідати наступним вимогам: для конструкційно-теплоізоляційного газобетону клас міцності на стиск не менше ніж В1,5, марка середньої густини не більше D700; для теплоізоляційного газобетону – міцність не нижче класу В0,35 та щільність не вище D400. Враховуючи отримані результати досліджень, можна зробити висновок, що отримані у роботі зразки теплоізоляційного і конструкційно-теплоізоляційного газобетону автоклавного твердіння різного складу повністю відповідають вимогам нормативних документів.

Максимально високою якістю у разі конструкційно-теплоізоляційного матеріалу характеризуються склади з вмістом 10% мінерального модифікатора, оскільки при однаковій марці за середньою густиною порівняно з контрольним складом міцність виробів зростає на 30% при використанні ММ на основі перліту та на 17 % при введенні ММ на основі опоки. При цьому також покращуються показники теплопровідності, паропроникності та морозостійкості. Повна заміна цементу у складі пористої

суміші на ММ дозволяє отримувати теплоізоляційні вироби із середньою щільністю близько 400 кг/м^3 з високими для даної марки за густиною показниками міцності на стиск.

Отже, завдяки використанню у складі пористої суміші мінерального модифікатора можна отримувати вироби низької щільності з високими показниками міцності. У виробництві будівельних матеріалів отримання низькощільних ніздрюватих виробів автоклавного твердіння пов'язане з багатьма проблемами через низьку початкову міцність сирцю, внаслідок чого доводиться вводити цемент, який в деяких випадках погано впливає на готовий виріб. Проте, мінеральний модифікатор здатний вступати в реакцію з компонентами суміші ще до гідротермальної обробки, оптимізуючи процеси спучування та газоутворення, і надає масиву для транспортування в автоклав необхідну початкову міцність.

На основі комплексу виконаних досліджень обґрунтовано принципи одержання газобетону автоклавного твердіння з використанням мінеральних модифікаторів на основі аморфізованих систем, які полягають в оптимізації доавтоклавного структуроутворення та інтенсифікації мінералоутворення при гідротермальній обробці. Мінеральний модифікатор з аморфізованих порід незалежно від складу в доавтоклавний період виступає як структуроформуючий компонент, що зумовлює скорочення поризаційних процесів з формуванням системи з поліпшеною мікро-і макроструктурою. Під час автоклавної обробки активні компоненти модифікатора забезпечують синтез новоутворень раціонального складу, що зумовлюють отримання матеріалу з необхідними фізико-механічними властивостями. Все це в сукупності забезпечує отримання пористих виробів з підвищеними техніко-експлуатаційними характеристиками за зниженої матеріаломісткості виробництва.

4.3 Особливості структуроутворення виробів з газобетону автоклавного твердіння в залежності від складу

Низкою авторів [17-25] було доведено, що фізико-механічні властивості газобетону перебувають у тісному взаємозв'язку з якістю макроструктури. Відомо, що наявність каркаса, пронизаного великою кількістю замкнених і несполучених між собою пір, перешкоджає вільному проходженню теплового потоку, покращуючи тим самим теплоізоляційні властивості пористого бетону.

Згідно даних вчених [18] міцність матеріалу залежить від кількості та однорідності пір, рівномірності їх розподілу по всьому обсягу, а також від товщини та міцності міжпорових перегородок. Інші вчені зазначають, що пори повинні бути замкненими правильними багатогранниками з глянсовою поверхнею, розділені тонкими і щільними перегородками однакової товщини [16].

Досягти правильної геометричної форми пір, так само як і формування абсолютно однакових по товщині міжпорових перегородок у всьому об'ємі матеріалу досягти не можна. Тому при оцінці макроструктури газобетону слід враховувати наступні фактори:

- ступінь сферичності пір та їх діаметр;
- рівномірність їх розподілу;
- розміри пір неправильної форми;
- товщину міжпорових перегородок та їх дефектність.

Вище зазначалося, що мінеральний модифікатор інтенсифікує процеси спучування та газоутворення у суміші, прискорює час дозрівання та збільшує приріст об'єму масиву.

Макроструктура зразків газобетону контрольного складу без добавок характеризується нерівномірністю розподілу полідисперсних пір переважно неправильної форми (рис. 4.10). У матеріалі спостерігається злиття кількох

пір в одну, що можна пояснити розпорядковістю між процесами порізації та твердінням системи (рис. 4.10, а). Поверхня пір нерівна і ніби посипана багатьма раковинами. Міжпорові перегородки мають пухку структуру та відрізняються більшою товщиною (рис. 4.10, б).

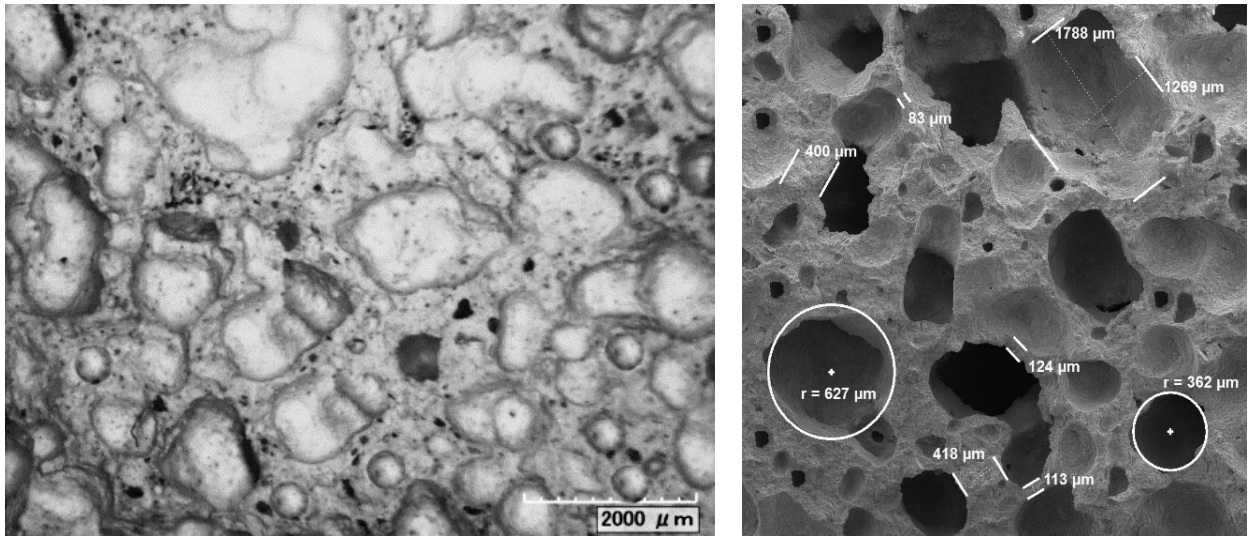


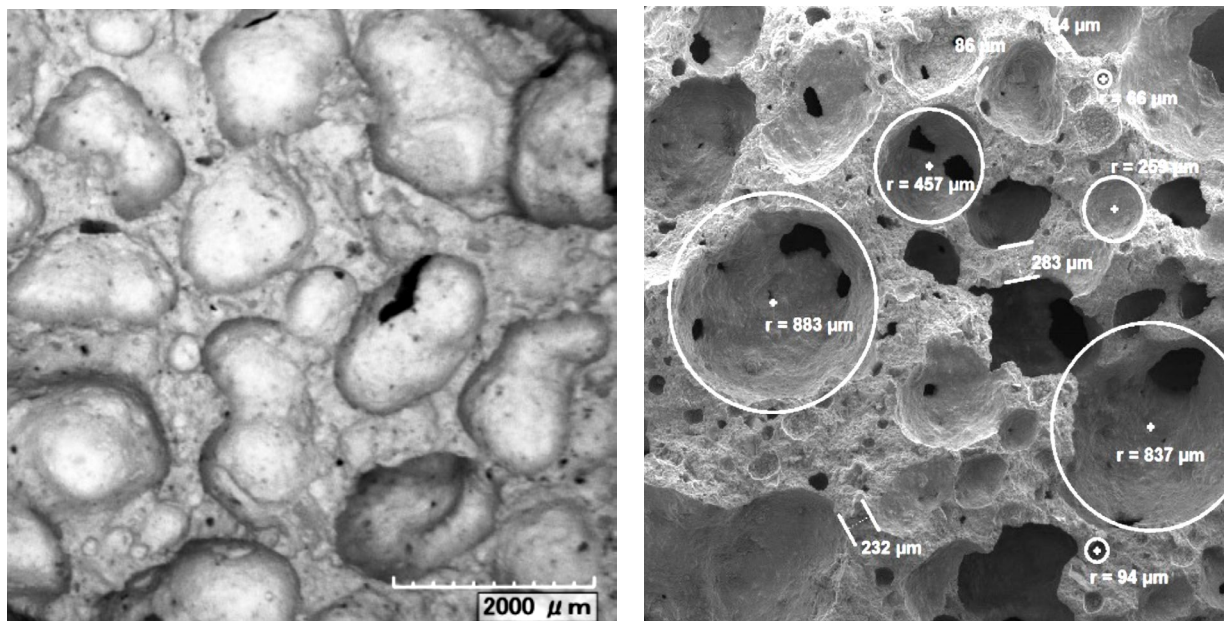
Рисунок 4.10 – Макроструктура контрольного зразка без добавок модифікаторів

При додаванні до складу пористої суміші мінерального модифікатора в кількості 10-50% спостерігається збільшення розміру пір у структурі композиту (рис. 4.11). Максимальний діаметр пір спостерігається у зразку із вмістом 10% ММ на основі перліту (рис. 4.11, 3, 4). Межі між порами чіткі, невеликої товщини з відсутністю видимих дефектів у вигляді тріщин та раковин.

Основна маса пір формою наближена до сферичної (рис. 4.11, 4). Пори меншого діаметра рівномірно розподілені між порами більшого розміру.

Макроструктура зразка з вмістом 10% мінерального модифікатора на основі опоки має схожий характер (рис. 4.11, 1, 2), однак, міжпоровий простір матеріалу містить велику кількість мікропор, що негативно позначається на міцностних властивостях.

ММ з опоки в кількості 10%



ММ з опоки в кількості 20%

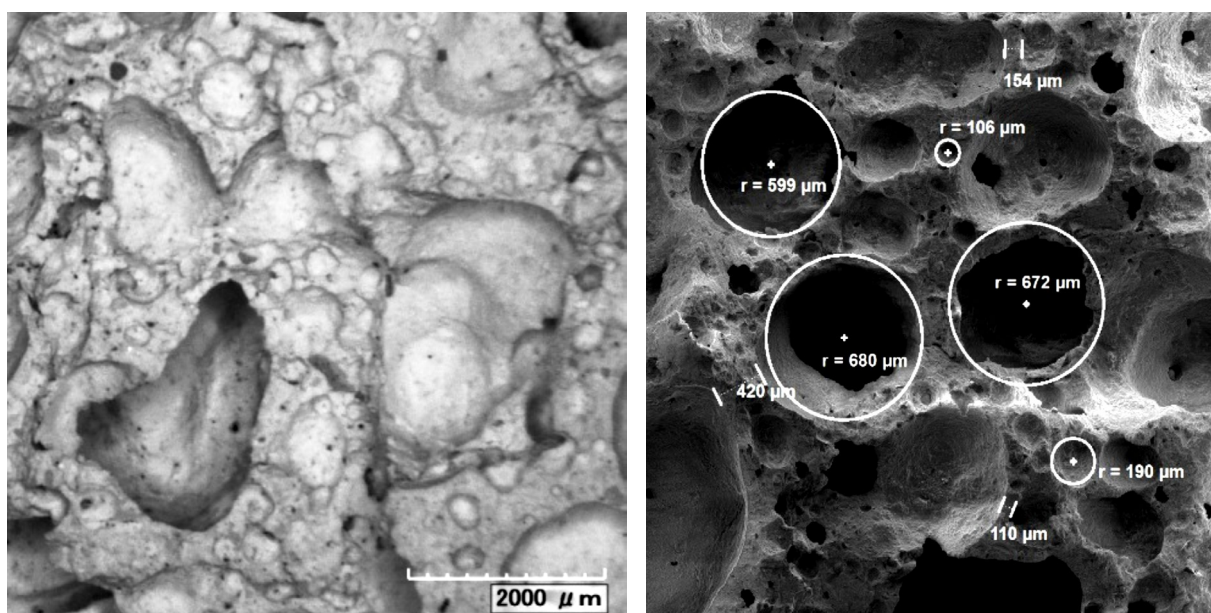
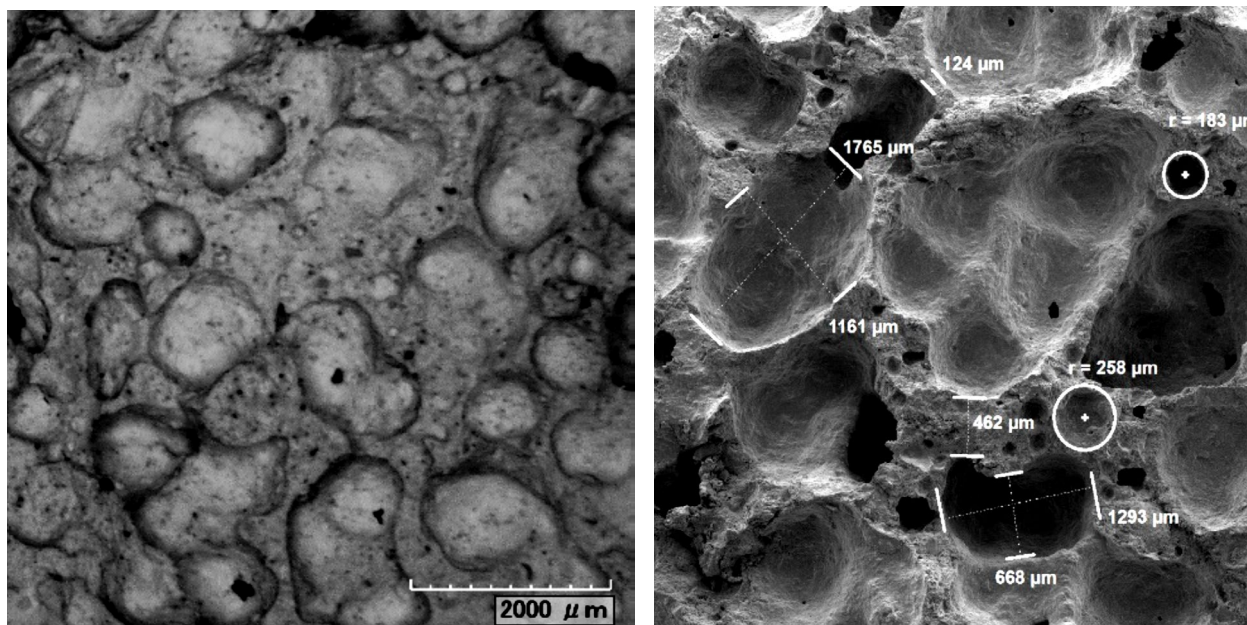


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (початок)

ММ з опоки в кількості 30%



ММ з опоки в кількості 40%

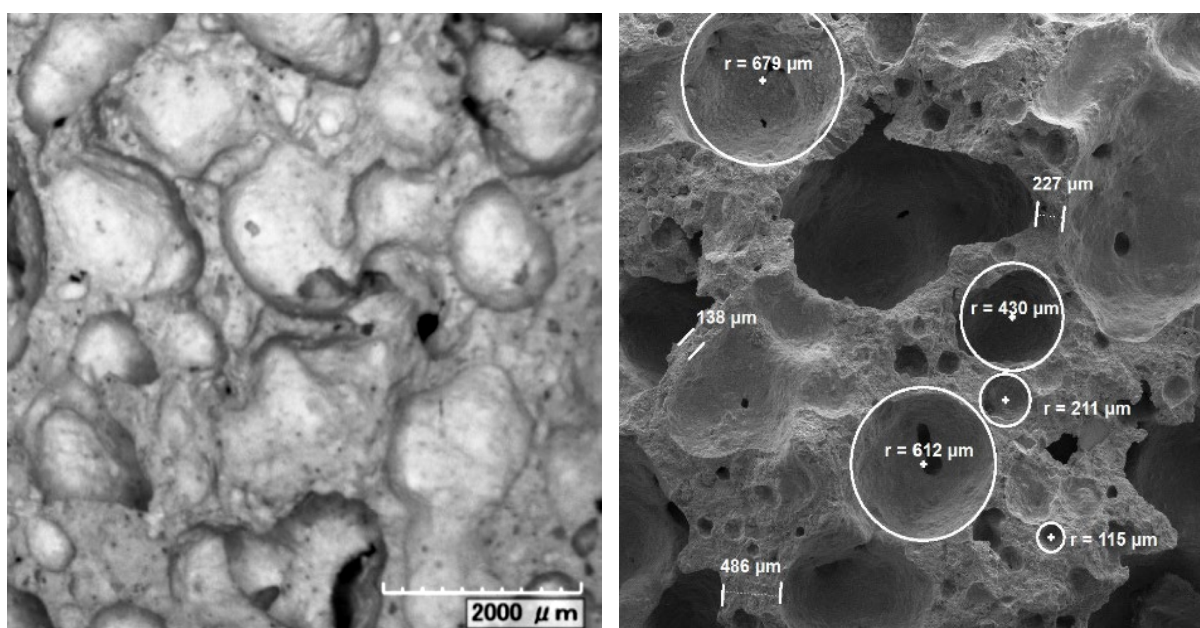
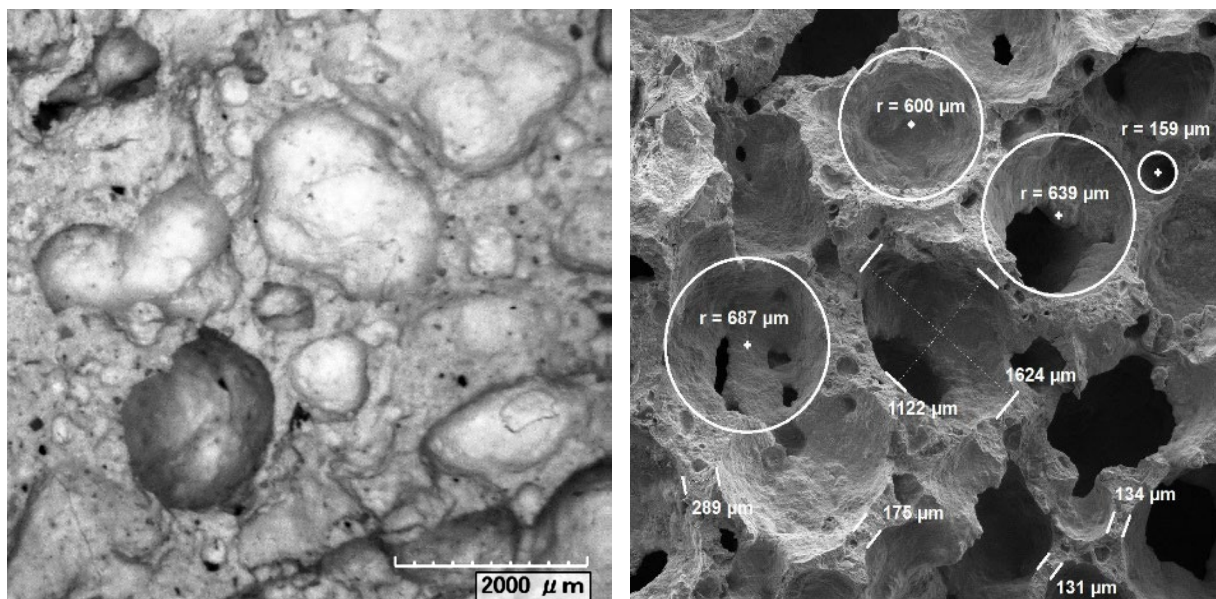


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з опоки в кількості 50%



ММ з опоки в кількості 100%

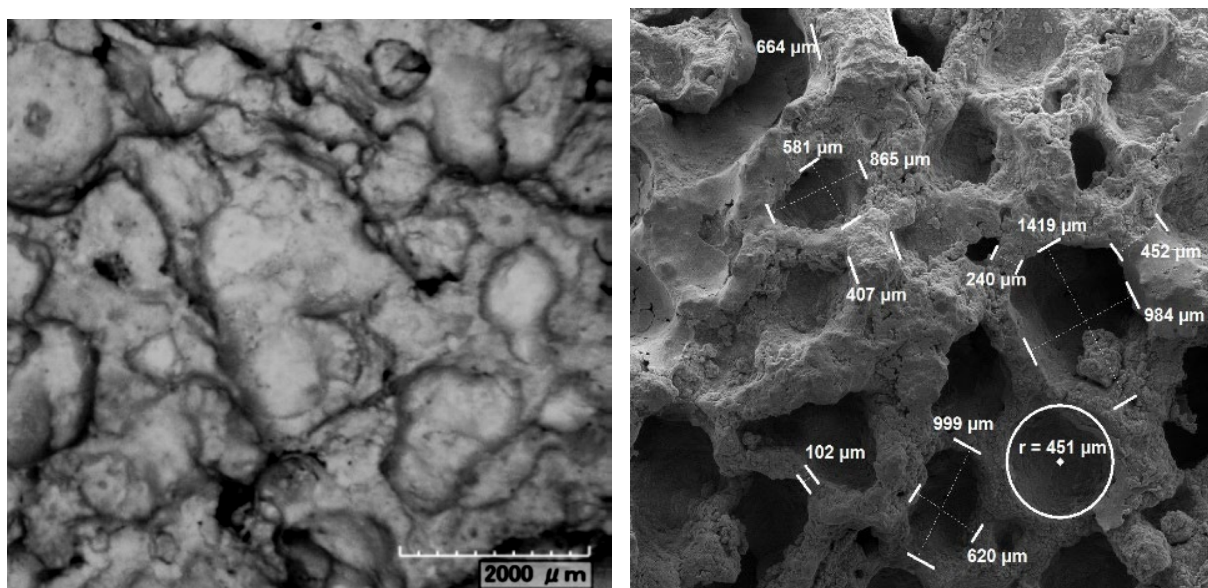
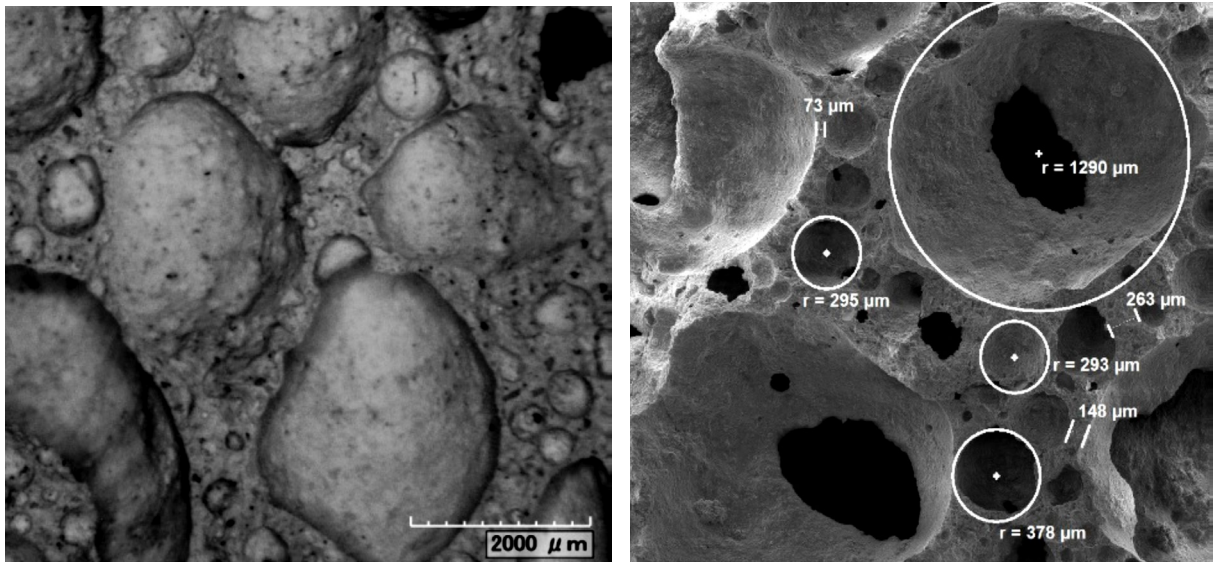


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з перліту в кількості 10%



ММ з перліту в кількості 20%

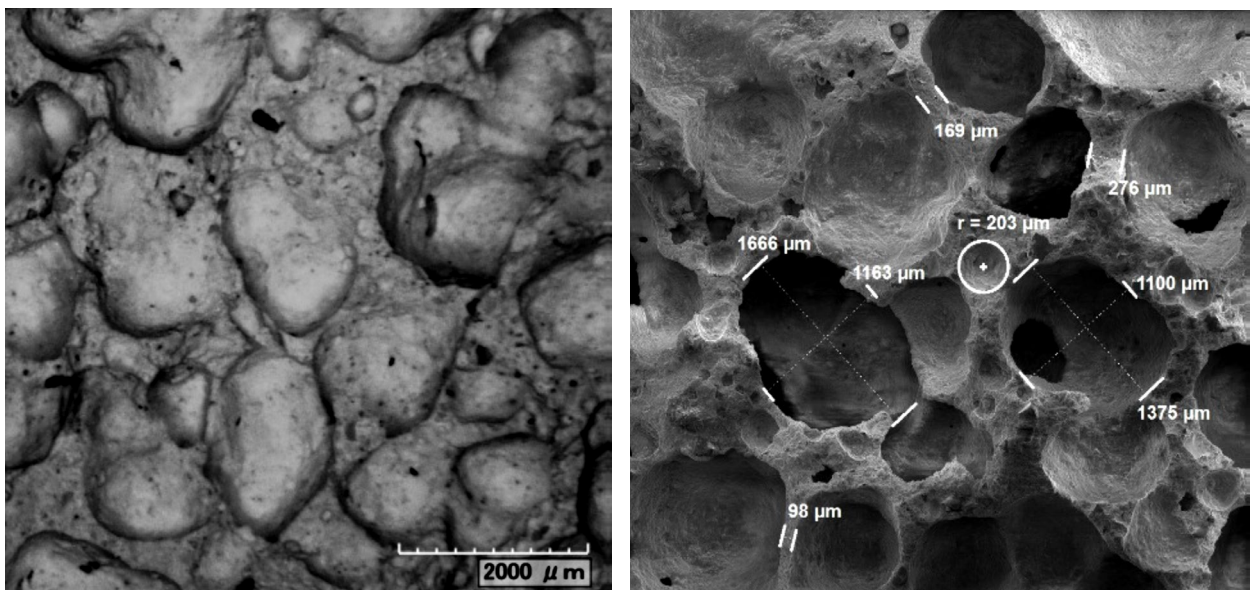
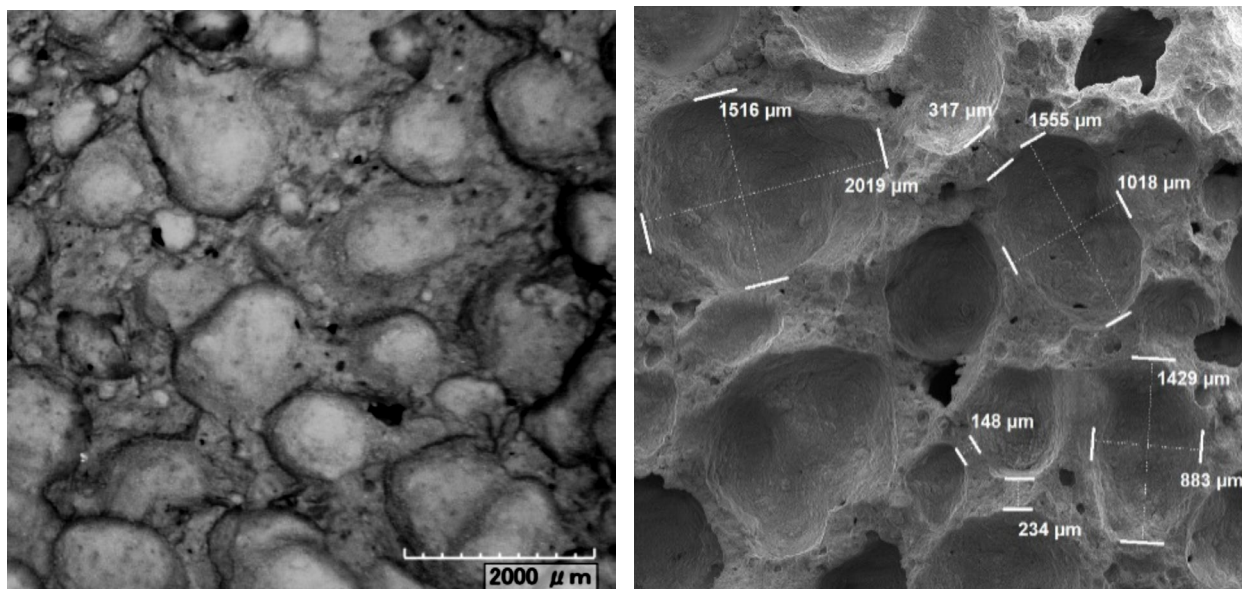


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з перліту в кількості 30%



ММ з перліту в кількості 40%

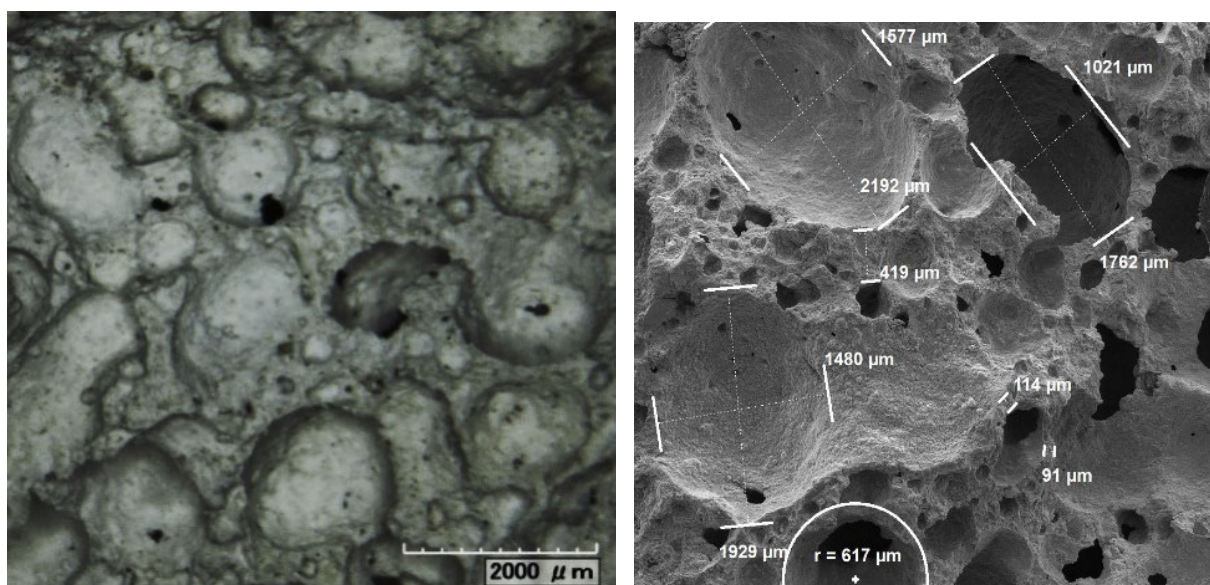
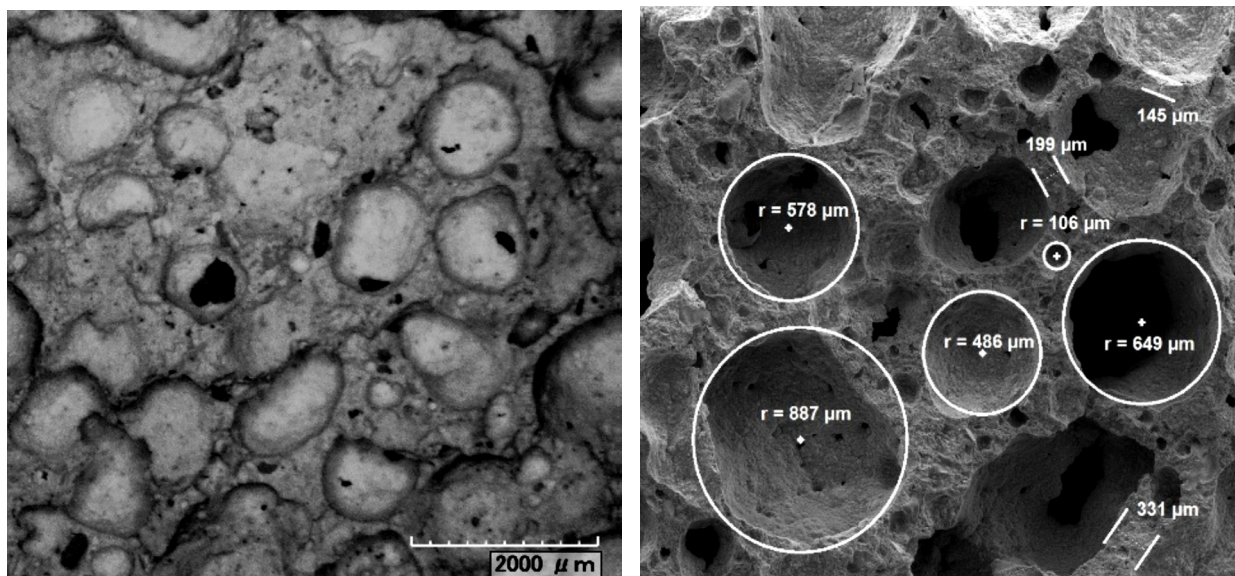


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з перліту в кількості 50%



ММ з перліту в кількості 100%

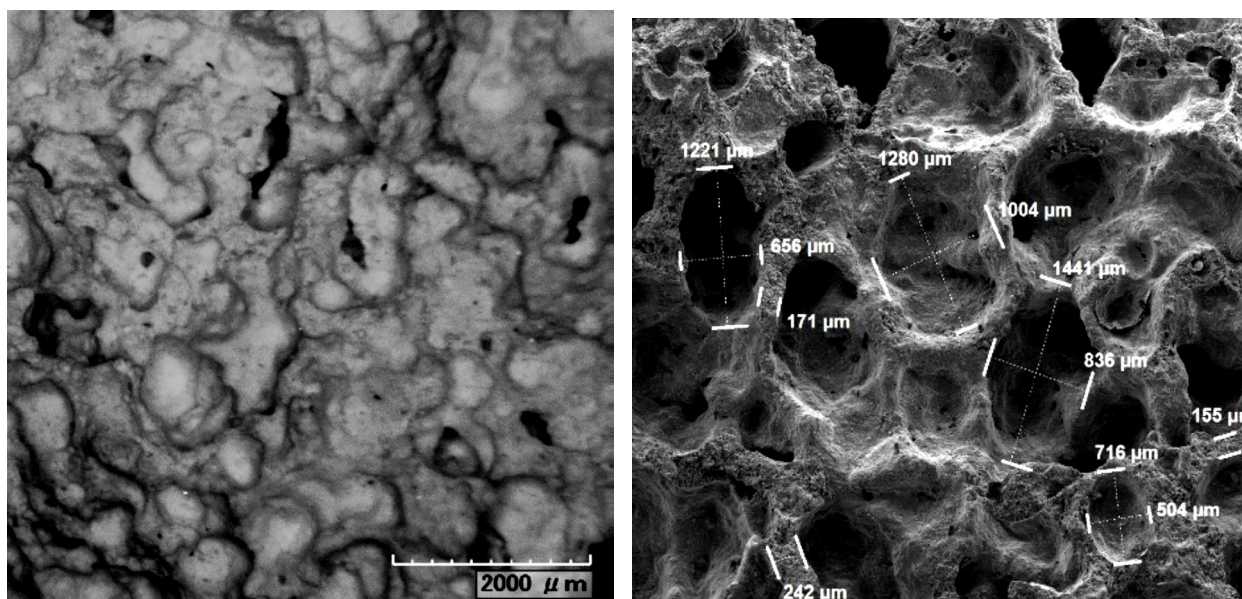


Рисунок 4.11 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (кінець)

Зниження щільності готових виробів і збільшення теплопровідності пояснюється формуванням додаткової пористості масивів при відносно високих дозах модифікатора. Зразки з вмістом у складі ММ на основі опоки відрізняються більш дефектною структурою у порівнянні із зразками з таким

же процентним вмістом модифікатора на основі перліту, що підтверджує отримані раніше показники міцності модифікованих композитів.

Однак при повній заміні цементу в системі на мінеральний модифікатор структура газобетону зазнає суттєвих змін (рис. 4.11). Каркас матеріалу пронизаний великою кількістю ізольованих один від одного пір з перегородками невеликої товщини (100-250 мкм). Пори мають менший розмір порівняно з іншими зразками (400-60 мкм), що пояснюється більшою в'язкістю формувальної суміші. Зважаючи на високу активність, модифікатор прискорює процес набору масивом пластичної міцності, перешкоджаючи тим самим виходу бульбашок газу з матеріалу назовні, а також розриву стінок-мембран самих пір. Отже, стало можливим одержання газобетону автоклавного твердіння зниженої густини з покращеними теплоізоляційними властивостями.

Таким чином, введення активної мінеральної добавки незалежно від її складу призводить до поліпшення внутрішнього простору композиту щодо збільшення пір і зменшення в результаті ущільнення міжпорових перегородок. Очевидно, що високі показники міцності зразків автоклавного газобетону з додаванням ММ при одночасному зниженні щільності пояснюються оптимізацією структури як на макро-, так і на мікрорівні.

4.4 Мікроструктура виробів з газобетону автоклавного твердіння в залежності від складу

Для підтвердження отриманих вище результатів проводилося дослідження мікроструктури зразків газобетону різного складу.

У першому дослідженні видно, що структура міжпорової перегородки зразка контрольного складу відрізняється значною дефектністю (рис. 4.12). Відмічалася наявність тріщин, в яких спостерігається зростання кристалічних

новоутворень голкового типу.

Мікроструктура модифікованих бетонів з додаванням модифікаторів у кількості 10-50%, незалежно від складу ММ, що вводиться, має схожий характер (рис. 4.13). Вона представлена новоутвореннями, сформованими в результаті гідратації цементу та взаємодії основних компонентів фаз, а також частинками кремнеземистого компонента, що виступають підкладкою для кристалізації новоутворень у процесі структуроутворення ніздрюватого композиту. На поверхні частинок заповнювача видно сліди «роз'їдання», так звані структурні розчинення, які сприяють кращому зчепленню з кристалічними новоутвореннями (рис. 4.13).

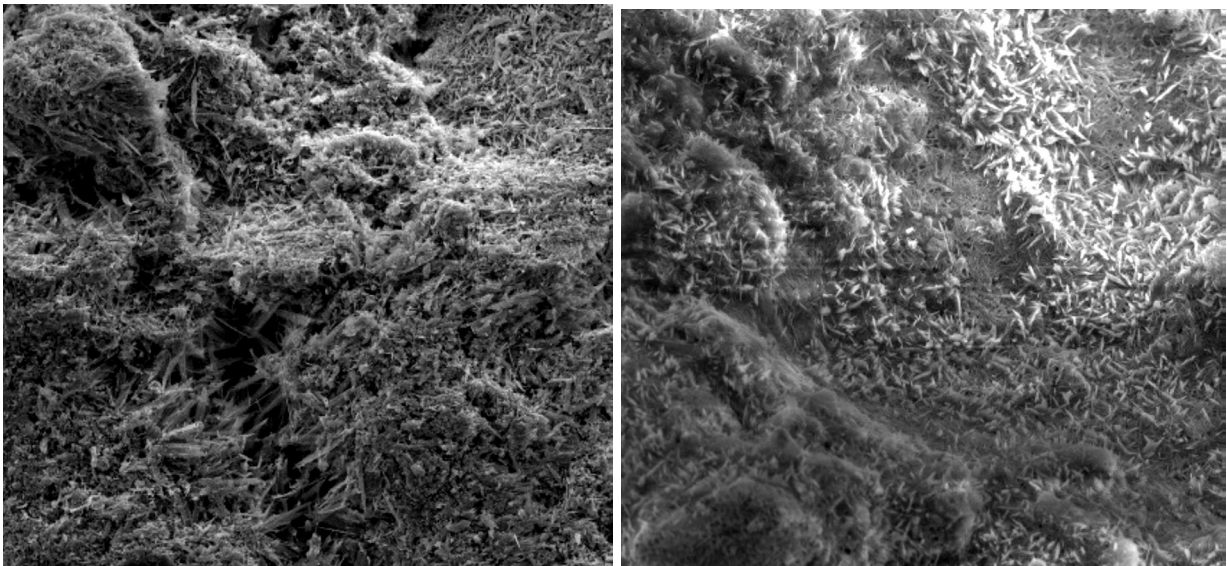
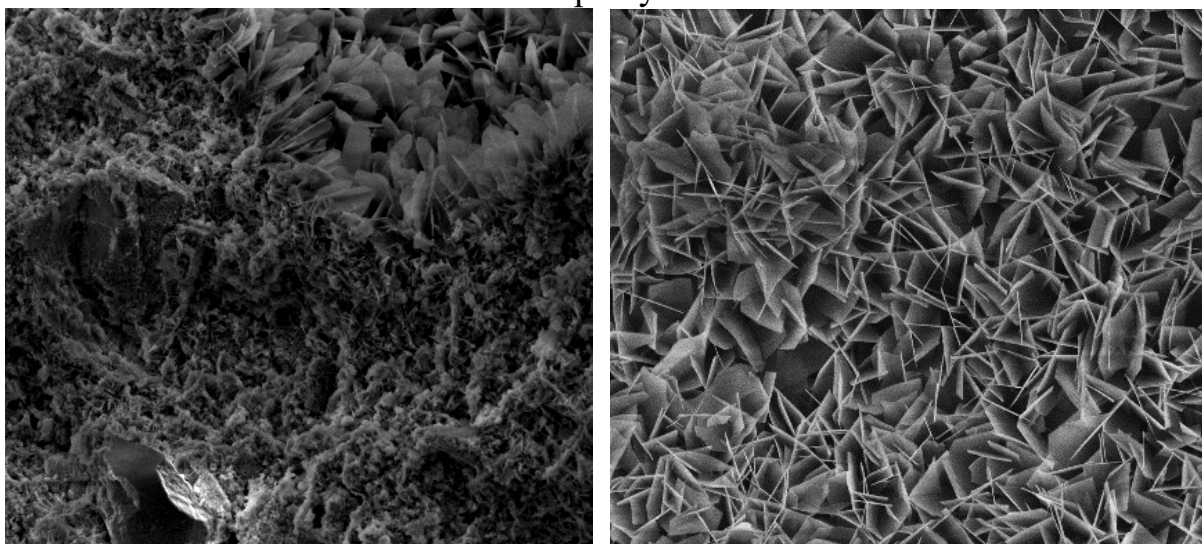


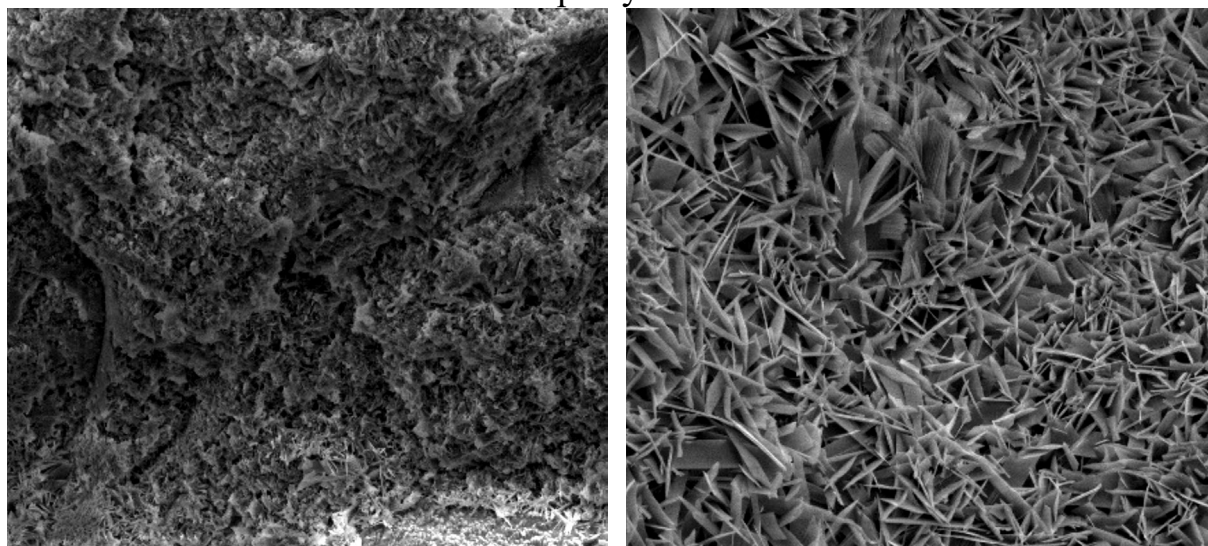
Рисунок 4.12 – Мікроструктура контрольного зразка без додавання модифікаторів

Весь об'єм композиту представлений розгалуженою сіткою новоутвореної речовини. Порожнини, тріщини та інші дефекти мікроструктури модифікованих композитів відсутні (рисунок 4.13). При цьому відзначаються деякі відмінності у загальному об'ємі кристалічних утворень. У структурі матеріалів з використанням ММ з перліту переважно формуються кристали пластинчастої та голчастої форми (рисунок 4.13), розміри яких зменшуються зі збільшенням концентрації модифікатора в системі. Це обумовлено високою активністю компонентів, і, як наслідок, формуванням переважно рентгеноамффонної речовини з малими розмірами кристалів.

ММ з перліту в кількості 10%



ММ з перліту в кількості 20%



ММ з перліту в кількості 30%

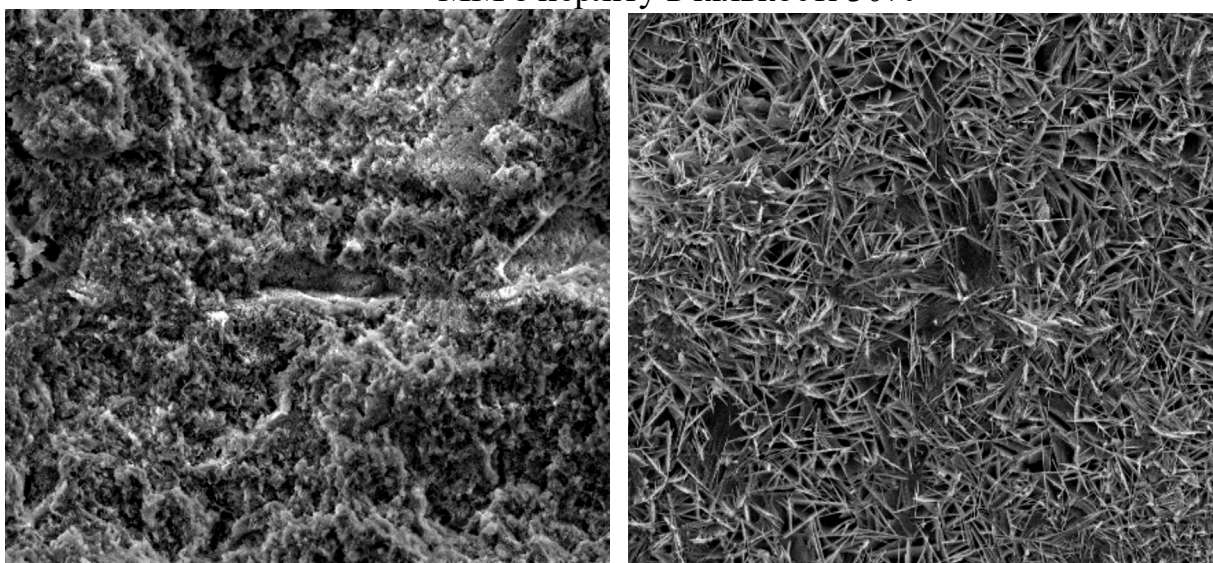
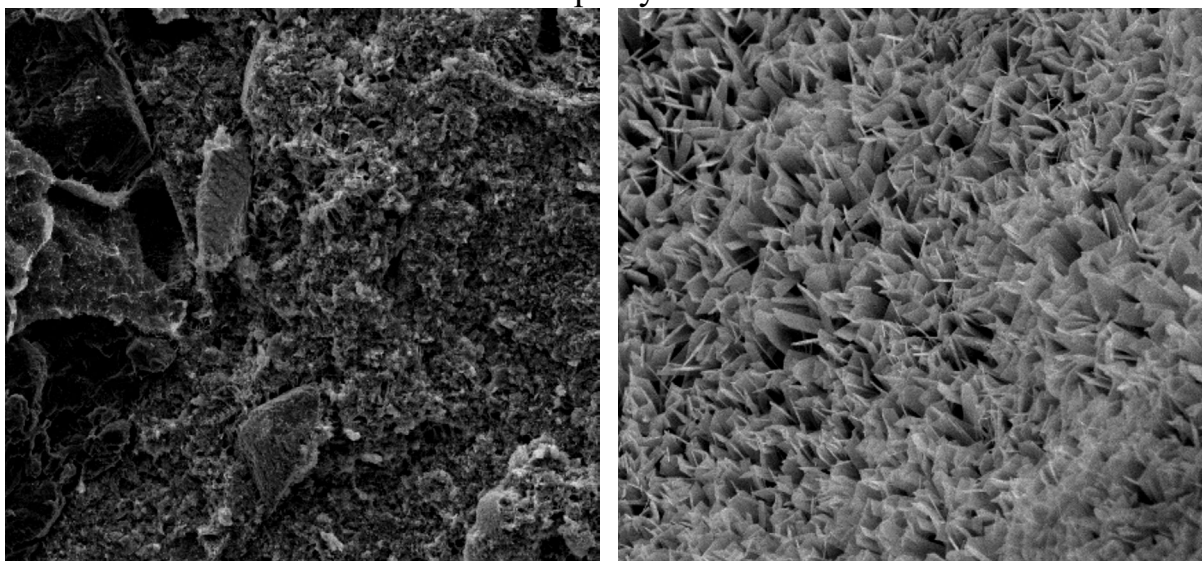
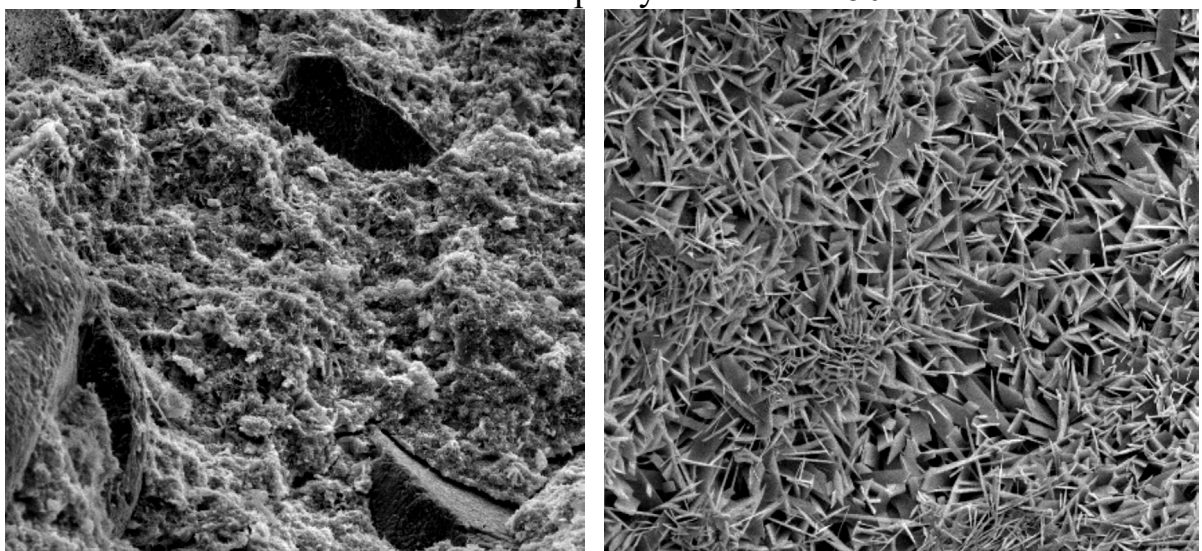


Рисунок 4.13 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (початок)

ММ з перліту в кількості 40%



ММ з перліту в кількості 50%



ММ з перліту в кількості 100%

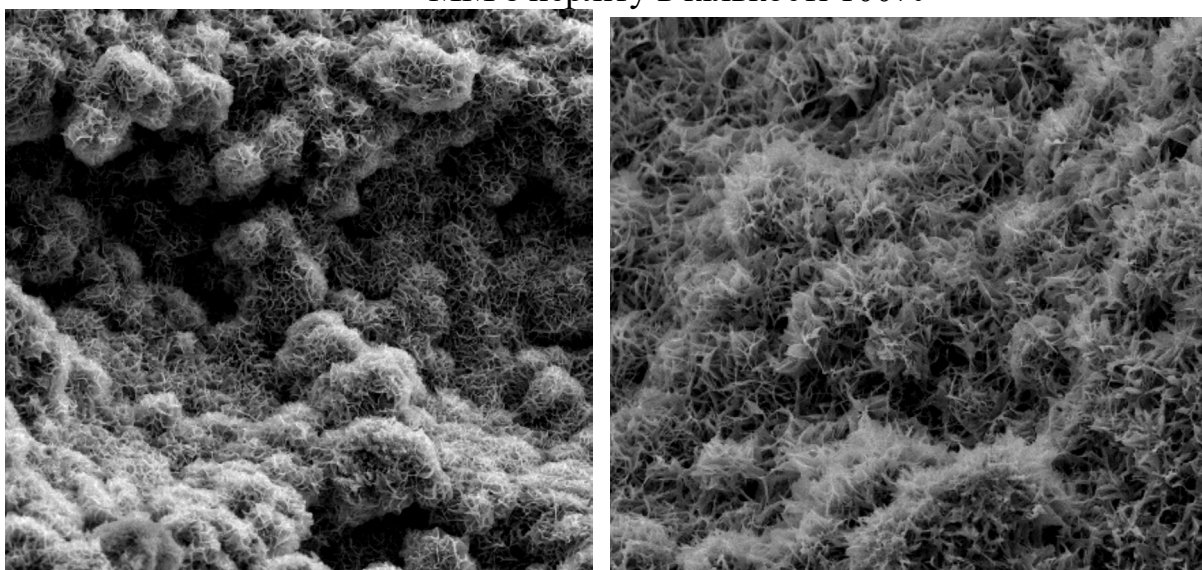
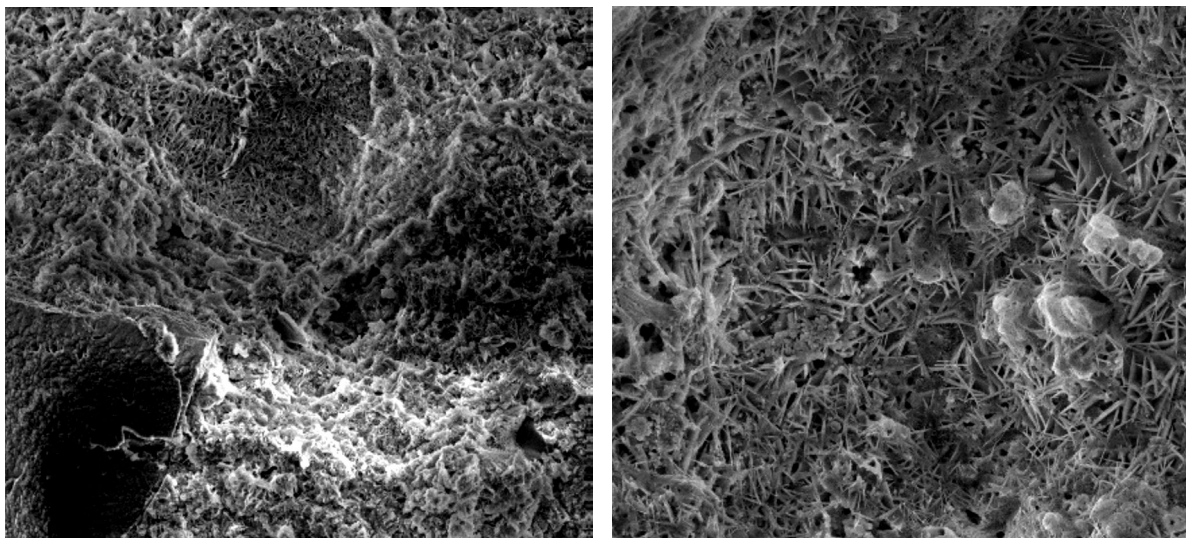
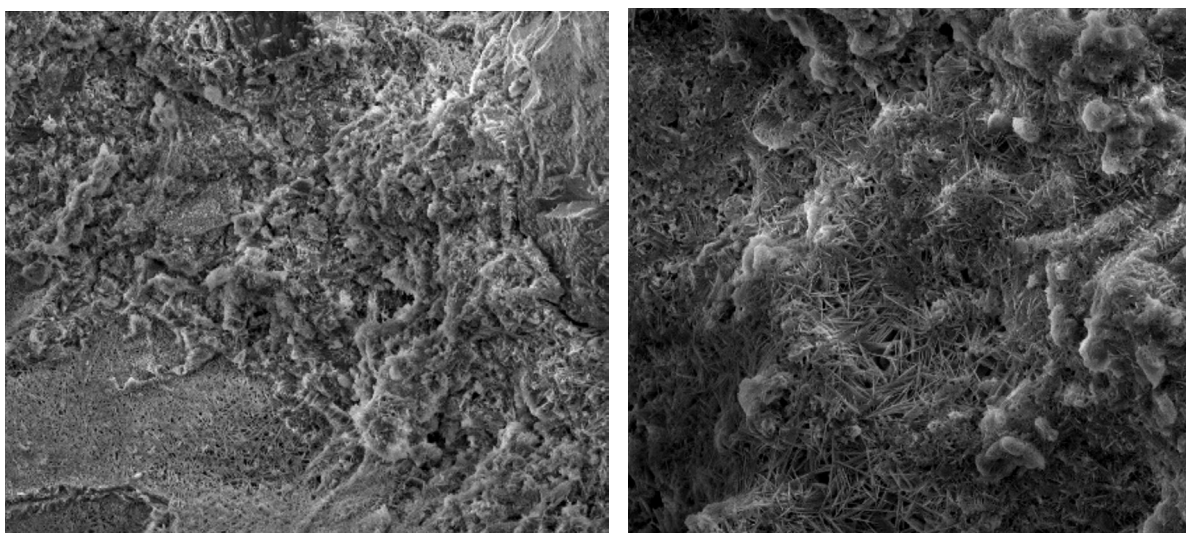


Рисунок 4.13 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з опоки в кількості 10%



ММ з опоки в кількості 20%



ММ з опоки в кількості 30%

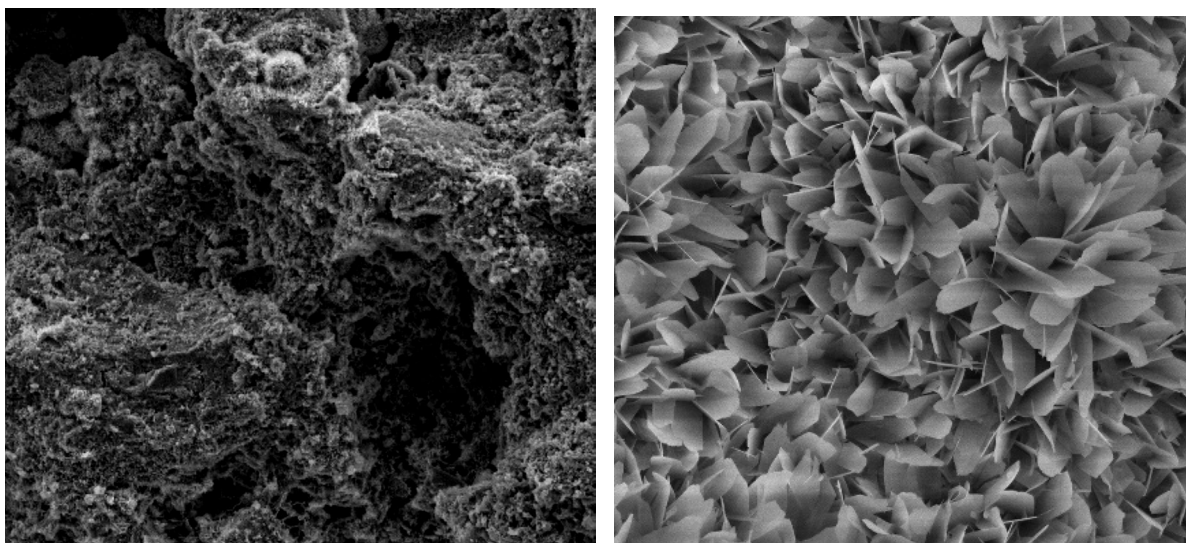
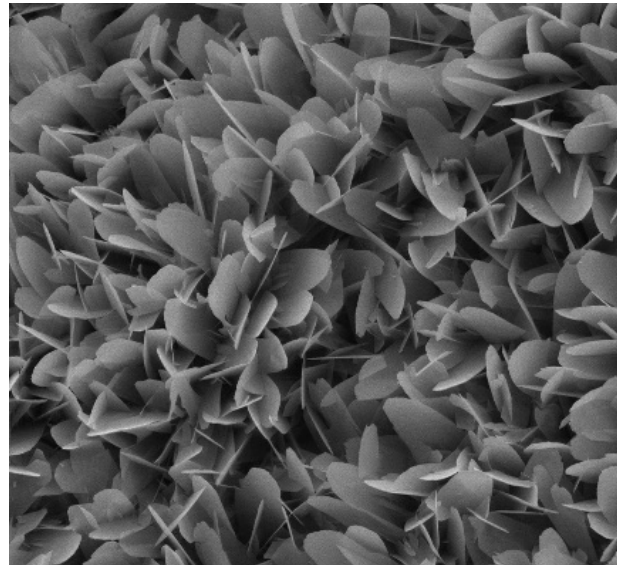
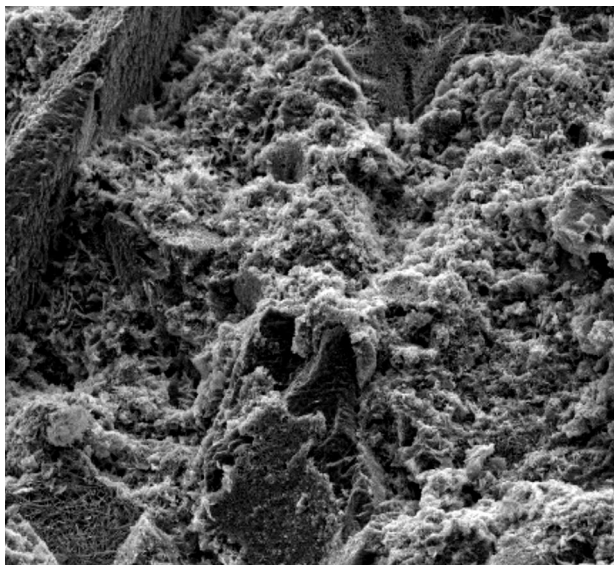
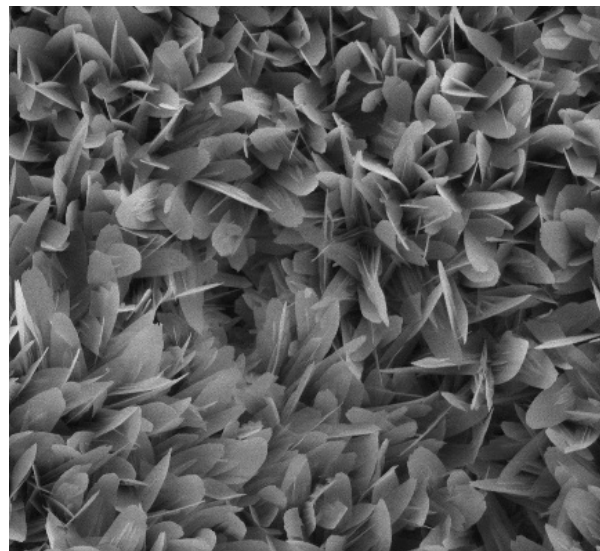
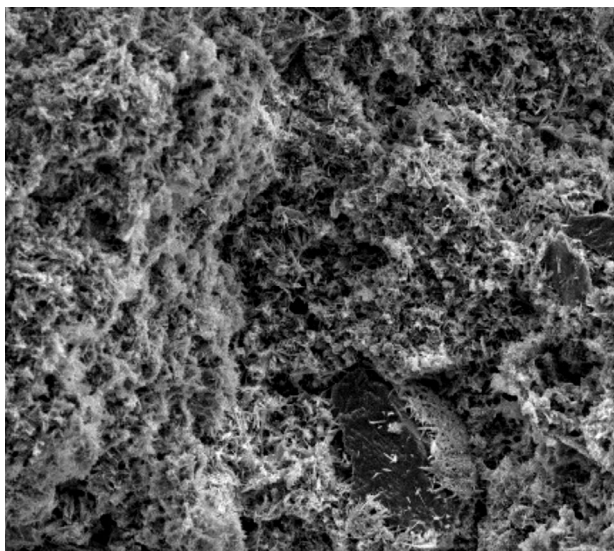


Рисунок 4.13 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (продовження)

ММ з опоки в кількості 40%



ММ з опоки в кількості 50%



ММ з опоки в кількості 100%

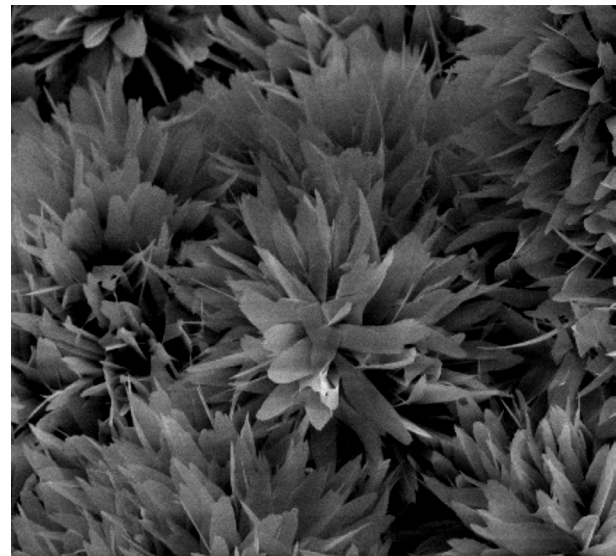
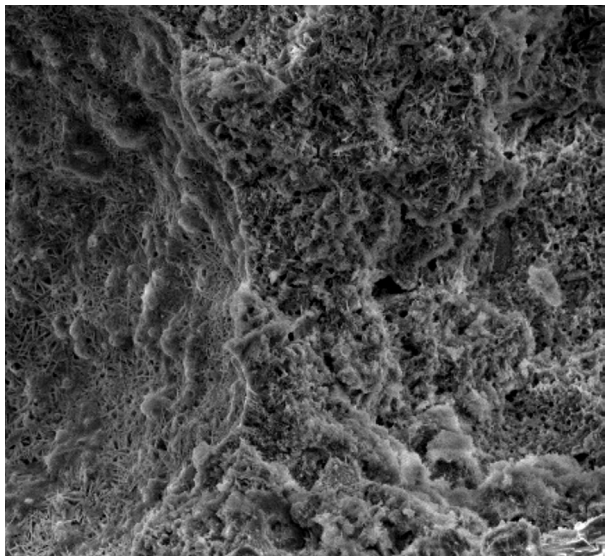


Рисунок 4.13 – Макроструктура зразків газобетону в залежності від виду та кількості модифікаторів (кінець)

При цьому з пластинчастих новоутворень формується просторовий каркас у вигляді сот, що забезпечує матеріалу необхідні міцнісні властивості. Зі збільшенням кількості модифікатора на основі перліту до 30% спостерігається перетворення пластинчастих новоутворень у стеблоподібні зі збільшенням ступеня закристалізованості силікатного бетону.

У разі модифікатора з опоки новостворена речовина відрізняється пелюсткоподібною формою кристалів, поперечні розміри яких також знижуються при збільшенні активної речовини в системі (рисунок 4.13).

Повне виключення цементу із системи та заміни на модифікатор із перліту забезпечує формування розвиненої павутини голчастих новоутворень, схожих по габітусу з мінералами тоберморитової групи розміром не більше 2 мкм (рисунок 4.13). Новоутворення переплітаються між собою, формуючи щільний масив, що рівномірно покриває частинки заповнювача.

У разі складу з опокою виняток цементу призводить до формування суміші із пелюсткових новоутворень: новостворена речовина концентрується у своєрідні друзи з центром на поверхні частинок заповнювача (рисунок 4.13). Зважаючи на те, що ці пелюстки мають меншу зону контакту між собою, у таких зразках відзначається падіння характеристик міцності порівняно зі зразками із вмістом 10% ММ на основі перліту.

Таким чином, введення мінерального модифікатора з аморфізованої сировини сприяє суттєвій зміні морфології кристалічних новоутворень в пористому композиті. Модифікатор сприяє інтенсифікації процесів кристалоутворення за рахунок наявності у складі високоактивної речовини, що виступає як центри кристалізації.

Кристалічні новоутворення заповнюють міжзерновий простір, сприяючи тим самим формуванню єдиного міцного конгломерату.

ВИСНОВКИ

Досліджено принципи одержання газобетону автоклавного твердіння з використанням мінеральних модифікаторів на основі аморфізованих систем, які полягають в оптимізації доавтоклавного структуроутворення та інтенсифікації мінералоутворення при автоклавній обробці. Мінеральний модифікатор з аморфізованих порід незалежно від складу в доавтоклавний період виступає як структуроформуєчий компонент, що зумовлює скорочення поризаційних процесів з формуванням системи з поліпшеною мікро- і макроструктурою. У разі автоклавної обробки активні компоненти модифікатора забезпечують синтез новоутворень раціонального складу, що зумовлюють отримання матеріалу з необхідними фізико-механічними властивостями. Все це в сукупності забезпечує отримання пористих виробів з підвищеними техніко-експлуатаційними характеристиками за зниженої матеріаломісткості виробництва.

Досліджено ефективність використання у технології виробництва газобетону аморфізованих порід силікатного (опоку) та алюмосилікатного (перліт) складу як активних мінеральних модифікаторів, отриманих методом суспендування. Використання методу суспендування дозволяє збільшити активність модифікатора в порівнянні з основним кварцовим компонентом вапняно-кремнеземистого в'язучого, отриманим сухим помелом, що виражається зростанням кількості активних центрів в 2,5 рази в модифікаторі на основі перліту і в 1,4 рази в модифікації. а також збільшенням кількості поглиненого СаО на 64% та 56% відповідно. Висока активність полідисперсних, полімінеральних модифікаторів зумовлена хіміко-мінеральними та структурними особливостями сировини.

Встановлено підвищення ефективності технології виробництва газобетону на різних технологічних етапах виробництва газобетонних виробів за допомогою використання активних мінеральних модифікаторів.

Внаслідок високої дисперсності та полімодальності розподілу частинок твердої фази модифікатора, його введення в пористої суміші незалежно від типу сировини, що використовується для його отримання, призводить до збільшення початкової в'язкості, що забезпечує збільшення об'єму суміші більш ніж на 30% порівняно з бездобовковим складом за рахунок збереження газу суміші. Внаслідок високої активності модифікаторів відбувається більш повна взаємодія основних сполучних компонентів суміші в процесі автоклавної обробки з формуванням гідросилікатів кальцію різної основності, що призводить до підвищення міцності готових виробів при повній або частковій заміні цементу на модифікатор.

Використано механізми фазоутворення у модельних системах «вапно – мінеральний модифікатор» з урахуванням хіміко-мінеральних особливостей аморфізованої сировини та технології отримання модифікатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкин Л. Й. Бетони спеціального призначення : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Конор», 2018. 354 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-49-96 Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. [Чинний від 1997.04.01]. Вид. офіц. Київ : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. 10 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. [Чинний від 2017.04.01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2017. 32 с.
4. Дворкін Л.Й. Мироненко А.В. Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2019. 298 с.
5. Будівельне матеріалознавство : підручник / П.В. Кривенко, К.К. Пушкарьова, та ін. Київ : «Видавництво Ліра-К», 2015. 624 с.
6. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оцінка властивостей топливних зол як компонентів композиційних матеріалів. *Будівельні матеріали*. 2019. №4. С. 77-83.
7. Пастушков П.П., Гагарин В.Г. Дослідження залежності теплопровідності від щільності та коефіцієнту теплотехнічної якості автоклавного газобетону. *Будівельні матеріали*. 2017. № 5. С. 26-28.
8. Grinfeld G.I., Korkina E.V., Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Erofeeva I.V. The system of the protecting designs providing the increased energy saving in buildings. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitek-tura*. 2016. Vol. 3, P. 25-35.
9. Солтисік Р. А. Марущак У. Д., Позняк О. Р., Дума В. О. Аспекти сталого розвитку в будівництві. *Сталий розвиток – стан та перспективи* : зб. матеріалів міжнар. наук. симпозіуму SDEV'2018, м. Львів, 28 лют.-3 берез. 2018 р. Львів, 2018. С. 92–93.

10. Обсяги сучасного виробництва і споживання газобетону. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/a255738-obsyagi-suchasnogo-virobnitstva.html>. (дата звернення: 15.11.2023).
11. Namsone E. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 760-767.
12. Позняк О.Р., Мельник В.М., Завадський І.О. Виробництво, властивості і застосування газобетону неавтоклавного тверднення. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва”*. 2017. № 877. С. 160–166.
13. Рунова Р. Ф., Гоц В. І. Гелевера О. Г. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів : підручник / за заг. ред. Р. Ф. Рунова. Київ, 2017. 528 с.
14. Poznyak O., Sanytsky M., Zavadsky I., Braichenko S., Melnyk A. Research into structure formation and properties of the fiberreinforced aerated concrete obtained by the non-autoclaved hardening. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/6 (93). с. 39-46.
15. Якимечко Я. Б. Вапняно-гіпсові в'язучі з покращеними експлуатаційними характеристиками. *Будівельні матеріали та виробу*. 2012. № 5 (76). С. 4–8.
16. Amran Y. H. M. Farzadnia N., Abang Ali A. A Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*. Vol. 101, Part 1. 2015. P. 990-1005.
17. Martynov V. Influence of the Structure of a Material Solid Phase on the Properties of Cellular Concrete. *National Journal of Composite Materials*. 2015. №4. Vol. 5. P. 79–80.
18. Pozniak O., Melnyk A. Non-autoclave aerated concrete from modified binders composition containing supplementary cementitious materials. *I architektura. Politechnika Lubelska*. 2014. Vol. 13(2). P.127–134.
19. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин : ТОВ “Видавництво “АспектПоліграф”, 2010. 228 с.

20. Дворкін Л.Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах : монографія. Київ : КНУБА, 2017. 216 с.
21. Zulkarnain F. Durability of Performance Foamed Concrete Mix Design with Silica Fume for Housing Development. *Journal of Material Sciences and Engineering*. 2011. P. 518–527.
22. Сердюк В. Р. Мінеральні та хімічні 153 добавки в технології газобетонів. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2011. № 39. С. 141–146.
23. Крилов Є. О., Мартинов Є. О. Використання карбонатного наповнювача в газобетоні неавтоклавного тверднення. *Структурування, міцність та руйнування композиційних матеріалів і конструкцій* : зб. тез міжнар. наук-техн. конф. Одеса : ОДАБА. 2018. С. 76–79.
24. Крилов Є. О., Мартинов, Г. Г., Ткаченко В. І. Неавтоклавний газобетон на комплексному активованому в'язучому. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : мат-ли міжнар. сем. Одеса : ОДАБА. 2018. С. 71–73.
25. Krylov E., Martynov V., Mykolaiets M., Martynova O., Vietokh O. Influence of modification of the solid component on the properties of non-autoclaved aerated concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol.3. No.6 (99). P.53–59.
26. Мартинов В. І. Експериментально–теоретичні основи виробництва пінобетонів з заданою структурою та прогнозованими властивостями : дис. ... доктора техн. Наук : 05.23.05. Одеса, 2017. 286 с.
27. Poznyak O., Sanytsky M., Zavadsky I., Braichenko S., Melnyk A. Research into structure formation and properties of the fiber-reinforced aerated concrete obtained by the non-autoclaved hardening. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/6 (93). P. 39–46.
28. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ). Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні

умови. [Чинний від 2010.04.01]. Вид. офіц. Київ : НДІБВ, 2010. 52с.

29. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008. Настанова щодо застосування хімічних добавок в бетонах і будівельних розчинах. [Чинний від 2010.04.01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 17 с.

30. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010.04.01]. Вид. офіц. Київ.: Мінрегіонбуд України. 2010. 36 с.

31. ДСТУ Б В.2.7-137:2008. Блоки з ніздрюватого бетону стінові дрібні. Технічні умови. [Чинний від 2008.04.01]. Вид. офіц. Київ.: Мінрегіонбуд України. 2008. 15 с.

32. Мартинов В. І., Крилов Є. О. Підбір складу в'язучого для неавтоклавного газобетона. *Наук-техн. збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектури»*. Київ, 2015. Випуск 7. С. 167–173.

33. Belov V., Abramov D., Ahmed R. Technological Prerequisites for Designing Automated Control System for Technological Process of Production of High-Strength FineGrained Concrete on Local Fibrous Basalt Wool Wastes. *International Russian Automation Conference, AutoCon*. 2018. P. 85-176.

34. ДСТУ Б В.2.769-98. Добавки для бетонів. Методи визначення ефективності. [Чинний від 1999.01.01]. Вид. офіц. Київ.: Держбуд України, 1999. 38 с.

35. Bulayev V.G., Gushchina N.V., Kuvshinov D.Yu. Utilizatsiya stroitelnykh otkhodov. *Disposal of construction waste. Upravleniye tekhnosferoy*. 2020, no. 2, pp. 259–270.