

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: Покращення властивостей ніздрюватих бетонів за рахунок модифікації їх складових

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-2
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)
Татаренко Віталій Петрович
(прізвище та ініціали)

Керівник доц., к.т.н., Мішук К.М.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Рецензент проф., д.т.н. Банах В.А.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Запоріжжя
2023

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

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
 Рівень вищої освіти другий магістрський рівень
 (другий (магістерський) рівень)
 Спеціальність 192 "Будівництво та цивільна інженерія"
 (шифр і назва)
 Освітньо-професійна програма "Промислове і цивільне будівництво"
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач каф.

ПЦБ

проф. Арутюнян І.А.

" " " 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ /ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Татаренко Віталій Петрович

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Покращення властивостей ніздрюватих бетонів
за рахунок модифікації їх складових

керівник роботи Мішук К.М., к.т.н., доц. каф. ПЦБ

(прізвище, ім'я по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від " 1 " квітня 2023 року №637-С

2. Строк подання студентом роботи

3. Вихідні дані до роботи Сучасні технології виготовлення ніздрюватих бетонів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Зробити аналіз сучасних технологій ніздрюватих бетонів









2 Виконати аналіз складових для виготовлення ніздрюватих бетонів

3 Виконати порівняльний аналіз технологій модифікування ніздрюватих бетонів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

8 листів А4

6. Консультанти розділів роботи

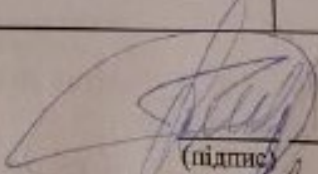
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 Аналіз сучасних технологій ніздрюватих бетонів	Мішук К.М.		
Розділ 2. Вибір складових для виготовлення ніздрюватих бетонів	Мішук К.М.		
Розділ 3. Технологія виготовлення неавтоклавних бетонів	Мішук К.М.		
Розділ 4. Покращення властивостей неавтоклавних бетонів раціонального складу	Мішук К.М.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
Розділ 1	Аналіз сучасних технологій ніздрюватих бетонів	з 01.09 по 30.09.2023	
Розділ 2	Вибір складових для виготовлення ніздрюватих бетонів	з 1.10 по 24.10.2023	
Розділ 3	Технологія виготовлення неавтоклавних бетонів	з 25.10 по 15.11.2023	
Розділ 4	Покращення властивостей неавтоклавних бетонів раціонального складу	з 16.11 по 06.12.2023	

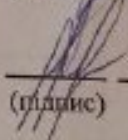
Студент


(підпис)

Татаренко В.П.

(прізвище та ініціали)

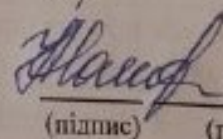
Керівник роботи/проекту


(підпис)

Мішук К.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено


(підпис)

Данкевич Н.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Татаренко Віталій Петрович. Покращення властивостей ніздрюватих бетонів за рахунок модифікації їх складових.

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

В сучасній будівельній сфері ніздрюватий бетон являється провідним будівельним матеріалом, та особливо в індивідуальному домобудівництві. Продукцію з ніздрюватого бетону використовують в цивільному та житловому будівництві у багатьох країнах з різноманітними кліматичними умовами. Номенклатура виробів з ніздрюватих бетонів дуже різноманітна – як огорожуючі конструкції (тобто панелі, стінові блоки, тощо), теплоізоляційні матеріали, а також використовують в монолітному будівництві.

За час повномасштабного вторгнення, попри постійні виклики, обстріли, блекаут будівельне виробництво зазнало значних трансформацій. Знизилися об'єми виробництва будівельних матеріалів і виробів, деякі виробництва були перенесені в інші регіони. Крім того, на Україну чекає відбудова, яка має бути швидкою, але без зниження якості. В цьому випадку ніздрюваті бетони можуть зайняти лідируюче місце серед матеріалів як для нового будівництва, так і для віднови та реконструкції постраждалого житла.

Питання енергозбереження завжди тісно пов'язані з питаннями економіки, екології, конкурентоспроможності продукції, збереженням власних природних ресурсів та забезпеченням життєдіяльності майбутніх поколінь держави. Тому ще однією перевагою даного матеріалу є його теплопровідність, яка забезпечується за рахунок повітря в порах – він відмінно утримує тепло всередині будинку. Ніздрюватий бетон є високопористим матеріалом. У технологіях ніздрюватих бетонів при формуванні пористої структури відбувається на стадії формування, яка є самою відповідальною технологічною

операцією. У процесі спучування та подальшого структуроутворення ніздрюватих сумішей необхідно точне дотримання принципу відповідності швидкостей газовиділення та збільшення реологічних властивостей суміші. У зв'язку з цим значну вагу набуває регулювання реологічних властивостей суміші, а саме граничної напруги зсуву та в'язкості в період інтенсивного пороутворення. Оптимізація реологічних характеристик ніздрюватих бетонів в момент спінювання може бути реалізовано шляхом збільшення значень пластичної в'язкості та зменшення значень граничної напруги зсуву та пластичності. Це надасть можливість стабілізувати процес спінювання ніздрюватої суміші та створити матеріал з оптимальною пористою структурою.

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

Список публікацій магістранта:

1) Татаренко В.П., Мішук К.М. Покращення міцностних характеристик бетонів за рахунок модифікування добавками. III Всеукраїнська науково-практична конференція за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України», Запоріжжя : ЗНУ, 2023.

2) Мішук К.М., Татаренко В.П. Перспективні напрямки виробництва газобетону в Україні. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України», Запоріжжя : Олді+, 2023. 588-591 с.

ABSTRACT

Tatarenko Vitaly Petrovich. Reduction of authorities of unsound concrete for the purpose of modification of their warehouses.

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

In the current everyday life, non-damaging concrete is a durable material, especially in individual home furnishings. Products made from durable concrete are used in civil and everyday life in rich countries with different climatic minds. The range of components from intact concrete is very diverse - such as enclosing structures (panels, wall blocks, etc.), heat-insulating materials, as well as vikorist in a monolithic building .

During the hour of a large-scale invasion, amid constant shouts, shelling, and blackout, the active world witnessed significant transformations. The volume of production of waste materials and germs has decreased, and production has been transferred to other regions. In addition, Vidbudova is counting on Ukraine, which means that it will be smooth, but without a decrease in vigor. In this situation, undamaged concrete can take the leading place among materials both for a new everyday life and for the renewal and reconstruction of a damaged building.

Nutritional energy conservation will in the future be closely linked with the nutrition of the economy, ecology, product competitiveness, conservation of natural resources and ensuring the livelihood of future generations of the country. Moreover, another advantage of this material is its thermal conductivity, which ensures the flow of air in the pores - it effectively removes heat from the middle of the room. Durable concrete is a highly porous material. In technologies of intact concrete, when molded, the porous structure is formed at the molding stage, which is the most reliable technological operation. In the process of swelling and further structure formation of healthy sums, it is necessary to more accurately emphasize the principle of the fluidity of gaseous fluids and increase the rheological power of the sums. In

connection with this, the regulation of the rheological forces of the mass, and the boundary stress and viscosity itself, arises during the period of intensive formation. Optimization of the rheological characteristics of dry concrete at the time of curing can be achieved by increasing the value of plastic viscosity and changing the value of the boundary stress and plasticity. This makes it possible to stabilize the process of spinning the dry mixture and create a material with an optimal porous structure.

Key words: intact concrete, technology of intact concrete, cement, slag, sludge activation, foaming agent, TEC ash, Portland slag cement.

List of publications of the master's student:

1) Tatarenko V.P., Mishuk K.M. Improving the value characteristics of concrete through modification with additives. III All-Ukrainian scientific and practical conference with the participation of young scientists “Current nutrition of the current scientific, technical and socio-economic development of the regions of Ukraine”, Zaporizhzhya: ZNU, 2023.

2) Mishuk K. M., Tatarenko V. P. Prospective directions for the production of aerated concrete in Ukraine. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Geostrategic Transformations and the Trajectory of National Security in the Context of the Future and Contemporary Development of Ukraine”, Zaporizhzhya: Oldi+, 2023. 588-591 p.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ.....	11
1.1 Аналіз видів і властивостей ніздрюватих бетонів.....	11
1.2 Аналіз формування пористої структури ніздрюватих бетонів	14
1.2.1 Способи формування пористої структури.....	15
1.2.2 Структура пор.....	17
1.3 Аналіз показників якості пінобетону та їх взаємозв'язок.....	19
2 ВИБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ.....	23
2.1 В'язучі речовини для виготовлення ніздрюватих бетонів.....	23
2.2 Наповнювачі і добавки для ніздрюватих бетонів.....	26
2.3. Кремнеземісті компоненти для виготовлення ніздрюватих бетонів.	28
2.4 Використання пороутворювачів в технологіях ніздрюватих бетонів.....	31
2.5 Мікроармування ніздрюватих бетонів.....	40
3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕАВТОКЛАВНИХ БЕТОНІВ.....	56
3.1 Модифікування неавтоклавних бетонів фізико-хімічними методами	56
3.2 Модифікування неавтоклавних бетонів прискорювачем твердіння...	58
3.3 Модифікування неавтоклавних бетонів тонкодисперсним шлаком...	60
3.4 Модифікування неавтоклавних бетонів мікрокремнеземом та модифікатором.....	62
3.5 Оцінка раціональних параметрів компонентів неавтоклавних бетонів.....	63
4 ПОКРАЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕАВТОКЛАВНИХ БЕТОНІВ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ.....	68
4.1 Структура модифікованого неавтоклавного бетону раціоального складу.....	68
4.2 Технічні властивості неавтоклавного бетону раціонального складу..	71
4.2 Гідрофізичні властивості неавтоклавного бетону раціонального складу.....	73
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПАР – поверхнево-активна речовина

ВІР – внутрішня поверхня розділу

В/Т – водотверде відношення

АМД – активна мінеральна добавка

РФА – рентгенофазовий аналіз

ВТК – відділ технічного контролю

БЗВ – бетонозмішувальний вузол

КВ – композиційні в'язучі

КАЦ – кальційалюмінатні цементи

АСШЦ – алюмосульфатошлаковий цемент

ВСТУП

Актуальність теми: Економічно ефективні, екологічні, технологічні будівельні матеріали, такі як неавтоклавний конструкційно-теплоізоляційний ніздрюватий бетон, вкрай потрібні для реалізації державних програм відновлення, реконструкції та розвитку (будівництва) інфраструктури України. Використання перспективних технологій виробництва екологічних, енергозберігаючих матеріалів, розвиток альтернативних сировинних матеріалів є пріоритетними напрямками, тому поліпшення властивостей ніздрюватих неавтоклавних бетонів зводить це питання ранг актуальних.

В традиційних технологіях ніздрюватих бетонів використовуються наступні мінеральні в'язучі: цементи, гіпс, будівельне вапно, відходи промисловості, такі як шлаки, або золи-винесення ТЕС. Під час виробництва ніздрюватого неавтоклавного бетону різальною технологією необхідно застосовувати в'язуче з високомарочних портландцементів для досягнення необхідної структурної міцності на стадії попереднього витримання ніздрюватого бетону.

До головного недоліку ніздрюватих бетонів неавтоклавного способу твердіння є низький ступінь гідратації в'язучого, в той час як при автоклавному способі виробництва твердіння пористої суміші відбувається як в результаті гідратації в'язучого при підвищених температурі і тиску, так і в результаті гідротермальної реакції взаємодії діоксиду кремнію (кварцового піску) та оксиду кальцію (вапна). Особливість технології ніздрюватого безавтоклавного бетону потребує підвищену витрату цементу, в той же час при гідратації та твердінні автоклавного в режимі пропарювання ($t=70-80^{\circ}\text{C}$) формується кінцева міцність виробів за рахунок високого хімічного потенціалу системи цемент-вода. Наслідком поганої закристилізованості продуктів гідратації є низький рівень гідратації цементу, що може бути причиною усадки неавтоклавних бетонів в подальшому процесі експлуатації. Подолати цей недолік можна за рахунок модифікації складу ніздрюватих

бетонів використовуючи прискорювачі гідратації та твердіння, активних мінеральних добавок та зниження початкового водотвердого відношення за допомогою ПАР.

Метою роботи є покращення властивостей неавтоклавних ніздрюватих бетонів за рахунок модифікування складів добавками.

Виходячи із зазначеної мети поставлені наступні **задачі**:

1. Дослідження матеріалів сировини – складу та властивостей;
2. Дослідження виду, кількості та дисперсності добавок;
3. Дослідження процесів стуктурування ніздрюватих неавтоклавних бетонів;
4. Визначення головних напрямків вдосконалення якості неавтоклавних ніздрюватих бетонів;
5. Дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих ніздрюватих неавтоклавних сумішей і способів їх регулювання;
6. Отримання ніздрюватого неавтоклавного бетону з заданими властивостями і різноманітними добавками та виявлення закономірностей для зміни складу суміші в виробничих умовах.

Об'єктом дослідження є ніздрюватий неавтоклавний бетон з вдосконаленими експлуатаційними властивостями.

Предметом дослідження є раціональний склад компонентів ніздрюватого неавтоклавного бетону з вдосконаленими експлуатаційними властивостями.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в підборі раціонального складу ніздрюватого неавтоклавного бетону шляхом вар'їрування компонентів та додавання модифікаторів, які забезпечують покращення експлуатаційних властивостей заданої суміші, а саме усадку, міцність, водопоглинання, теплопровідність, тощо).

Методи дослідження. В основі роботи лежить основа системно-структурного підходу будівельного матеріалознавства: «Сировина(склад)-технологія-структура-властивості та область застосування»,

використовувалися методи узагальнення, порівняння, методи системного підходу, експерименти, математичне планування і обробка результатів експериментів.

Апробація. Магістерська робота була представлена на наступних конференціях:

1) Татаренко В.П., Мішук К.М. Покращення міцностних характеристик бетонів за рахунок модифікування добавками. III Всеукраїнська науково-практична конференція за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України», Запоріжжя : ЗНУ, 2023.

2) Мішук К.М., Татаренко В.П. Перспективні напрямки виробництва газобетону в Україні. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України», Запоріжжя : Олді+, 2023. 588-591 с.

Структура і об'єм магістерської роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, загальних висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Основною темою текст викладено на 79 сторінках, з них 10 малюнків, 15 таблиць, та містить списки літератури зі 18 найменування праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

1.1 Аналіз видів і властивостей ніздрюватих бетонів

Будівельний матеріал, який складається з великої кількості пор, виготовляється на основі мінеральних складових та кремнеземистих пористих заповнювачів називається ніздрюватий бетон. Цей матеріал відноситься до легких бетонів і відрізняється великою кількістю пір, що робить його легким і «теплим». Ніздрювата структура може формуватися двома різними способами – газоутворенням або змішуванням суміші з піною. Використання ніздрюватих бетонів дуже різноманітне – від утеплення конструкцій до зведення огорожуючих конструкцій.

Класичний рецепт для виготовлення ніздрюватого бетону наступний[2]:

- в'язуча речовина в кількості не більше 10-13%. Для ніздрюватих бетонів це головний компонент. В якості в'язучого може бути використаний цемент, вапно або їх суміш;
- кремнеземистий наповнювач з високим (не менше 95%) вмістом діоксиду кремнію. В якості кремнеземистого наповнювача може бути використаний кварцовий пісок, шлак або зола-винесення ТЕС;
- пороутворювач, який саме і утворює ніздрювату структуру. В якості пороутворювача може бути алюмінієва пудра (для газобетонів) або поверхнево-активна речовина (ПАР) (для пінобетонів);
- модифікуючі добавки. В якості таких добавок використовують пластифікатори, прискорювачі твердіння, тощо.

Ніздрюватий бетон розділяють на види:

- цементний (у складі суміші є 50% цементу);
- вапняний (із вмістом вапна до 50%, гіпсу або шлаку до 15%);
- змішаний (з цементом 15-50%, вапном та шлаком);

- зольний (з присутністю зол понад 50%);
- шлаковий (із вмістом шлаку до 50%).

Згідно класифікації ГОСТ 25485-89 (Ніздрюваті Бетони) існують наступні види пористих бетонів:

1. За способом пороутворення:

- газобетон, який отримують шляхом додавання алюмінієвої пудри або пасти в цементно-піщаний (вапняно-піщаний) розчин. Алюміній вступає в реакцію з в'язучим в результаті чого утворюється водень. Під тиском газу бетонна суміш підіймається й становиться пористою та легкою.

- пінобетон, в якому пороутворювачем є стійка технічна піна. Її отримують збиванням у піногенераторі і вмішують в готовий цементний розчин, або додають ПАР д бетонної суміші, а потім збивають розчин під тиском.

Існує ще газобетон який отримують комбінованим методом, але на практиці його не застосовують.

2. За призначенням:

- теплоізоляційний, з самими низькими показниками щільності (200...500 кг/м³) і теплопровідності (марки D200...D500);

- конструкційно-теплоізоляційний, з середніми показниками щільності (450...900 кг/м³) і теплопровідності (марки D450...D900);

- конструкційний, з високими показниками щільності (800...1200 кг/м³) і теплопровідності (марки D800...D1200).

3. За умовами твердіння:

- неавтоклавний, який набирає міцності в звичайних умовах;

- автоклавний, який пропарюють в автоклавах при температурі 160...190°C і тиском 9...15 атмосфер.

4. За наявністю армування:

- неармований, який виробляють без використання арматури;

- дисперсно-армований, в якому в якості армуючого матеріалу використовують фібру (пінопропіленову або іншу полімерну як

приклад);

- армований, в якому в якості армуючого матеріалу використовують залізо або склопластик, в основному при монолітному бетонуванні.

Головною властивістю пористого бетону є його міцність та теплоізоляційні якості, які забезпечуються щільністю матеріалу та його пористістю (Табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика властивостей ніздрюватих бетонів

Пористість (%)	Теплопровідність (Вт/м ² ·К)	Щільність (кг/м ³)	Міцність на стиск (МПа)
95	0,06	200	0,4...0,7
90	0,06...0,08	200...300	0,7...1,2
80	0,10...0,14	400...600	1,2...4
70	0,17...0,22	700...800	2,5...5
60	0,24...0,30	900...1100	5...12
50	0,33...0,40	1100...1200	10...15

Таблиця 1.2 - Класифікація ніздрюватого бетону за показником міцності

Марка ніздрюватого бетону	Клас міцності
D300	B0,75...1
D400	B1,5...2,5
D500	B1,5...3,5
D600	B2...4
D700	B2...5
D800	B3,5...7,5
D900	B3,5...10
D1000	B7,5...12,5
D1100	B10...15

1.2 Аналіз формування пористої структури ніздрюватих бетонів

В ніздрюватому бетоні газ, який міститься в порах відіграє роль такого малотеплопровідного наповнювача. Об'єм пір і якість пористості безпосередньо впливають на головні властивості ніздрюватого бетону.

В технологіях ніздрюватих бетонів оцінку про розподілення пір за розмірами дають за такими параметрами:

- середній діаметр пір;
- полідисперсність осередків- кількісне розподілення за розмірами - середньоквадратичне відхилення від середнього діаметру пір.

Аналіз цих показників в ніздрюватих макроструктурах бетонів показує, що чим нижче щільність бетону, тим більше полідисперсне розподілення пір за розмірами, що, в свою чергу, знижує фізико-технічні властивості[1].

Вплив на фізичні властивості а також на мікроструктуру матеріалу напряму чинить спосіб утворення пір (газо- чи піноутворення). Визначення структури ніздрюватого бетону здійснюється твердою мікропористою матрицею та наявністю макропор. Головною відмінністю газобетону є те, що пори в ньому частіше форми еліпсу, вони різні за розміром і розташуванням в бетоні. В пінобетоні пори мають форму сфери, вони малі і здебільшого замкнуті та розміщуються рівномірно в бетоні. (Рис. 1.1 та 1.2)

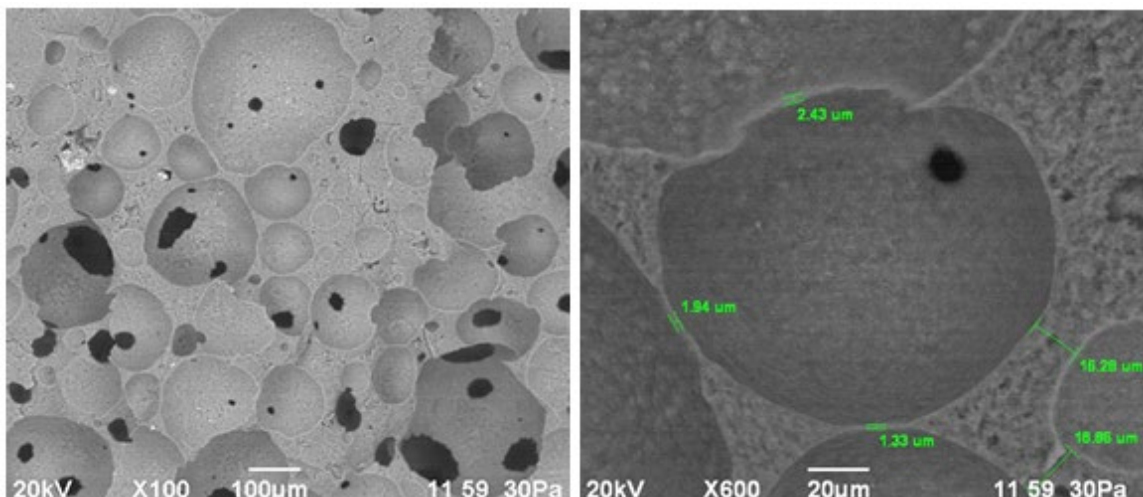


Рисунок 1.1 – Мікроструктура пір ніздрюватого бетону

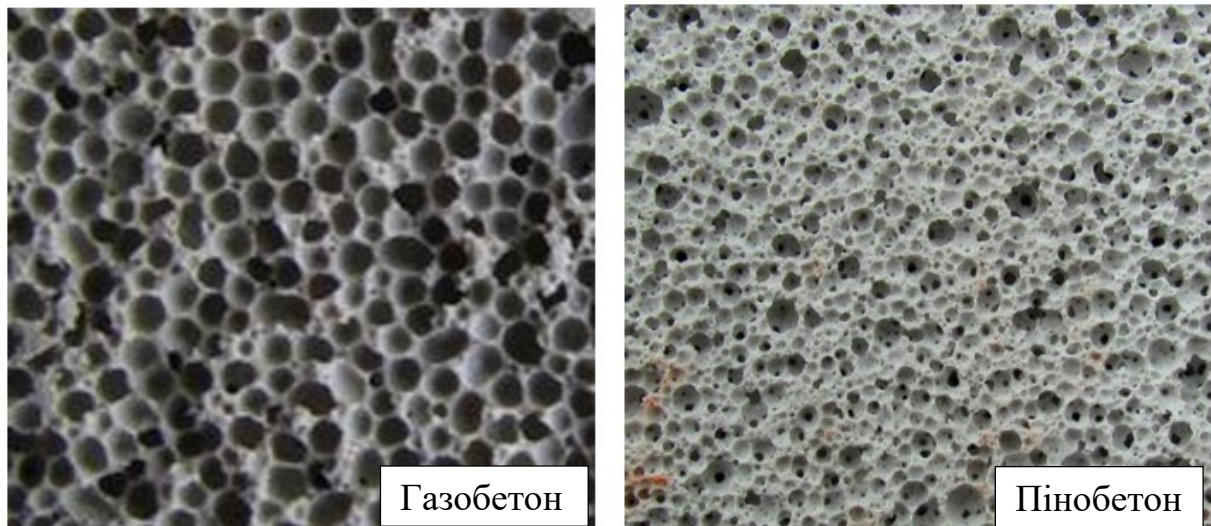


Рисунок 1.2 – Структура пір ніздрюватих бетонів

На головні властивості ніздрюватого бетону впливають характеристики макроструктури:

- діаметр пор і їх розподілення за розміром;
- рівномірність розподілення макропор та загальний обсяг макропористості в бетоні;
- форма пор та відстань між порами.

Структура автоклавного ніздрюватого бетону значно відрізняється від неавтоклавного газобетону різницею в режимах гідратації в'язучої речовини, які призводять до різниці властивостей матеріалів[3].

Так, наприклад, автоклавний ніздрюватий бетон має більшу міцність ніж неавтоклавний за рахунок тобермориту.

1.2.1 Способи формування пористої структури

Ніздрюватість в бетоні слід оцінювати з позицій розміру пор та їх походження.

Структура пористого бетону характеризується подвійним характером

пористості, яка обумовлена наявністю макропор та мікропор. Розмір осередків залежить від щільності бетону та технологічних факторів.

Пори розташовані в бетоні рівномірно, в об'ємі макропори крупні та утворені газо- або піноутворювачем. Об'єм пор можливо регулювати змінюючи дозування пороутворювача [6].

Осередки в ніздрюватому бетоні можна розподілити на типи (Табл. 1.3)

Таблиця 1.3 – Характеристика пор ніздрюватого бетону

Щільність кг/м ³	Загальний об'єм пор, %	Об'єм твердої фази, %	Тип пор ніздрюватого бетону					
			ніздрюваті		капілярні		гелеві	
			розмір, м	об'єм, м	розмір, м	об'єм, м	розмір, м	об'єм, м
200	92	8	10^{-6} - $0,25 \cdot 10^{-2}$	83	10^{-7} - 10^{-6}	7,5	$<10^{-8}$	1,5
300	88	12	10^{-6} - $0,20 \cdot 10^{-2}$	76	10^{-7} - 10^{-6}	9,0	$<10^{-8}$	3
400	84	16	10^{-6} - $0,15 \cdot 10^{-2}$	70	10^{-7} - 10^{-6}	10.5	$<10^{-8}$	3,5

Ніздрюваті пори – головний тип в ніздрюватому бетоні, які визначають головні властивості. В бетоні ці пори утворюються спеціальними технологічними операціями шляхом поризації розчинної частини бетонної суміші.

Для отримання легкого призваного бетону потрібно внесення бульбашок маленького розміру для заповнення вузлів між пухирцями більшого розміру. Розташування сферичних пор двох різних діаметрів називають дво-modalною схемою заповнення.

Зазвичай в практиці виробництва пінобетону на швидкісних змішувачах турбулентного типу можна спостерігати оптимальне співвідношення бульбашок різного розміру з точки зору отримання матеріалів низької щільності. Застосування таких швидкісних змішувачів турбулентного типу у виробництві ніздрюватих бетонів забезпечує отримання оптимальної схеми розміщення сферичних осередків різноманітних діаметрів [5].

Співвідношення кількості пор різного діаметра і структури залежать від складу сировини і методів догляду за бетоном під час набору міцності. На міцність ніздрюватого бетону впливає склад суміші, спосіб пороутворення, структура пор, їх розмір, вік бетону та водонасичення.

1.2.2 Структура пор

Під час процесу гідратації змінюється кристалічна структура неавтоклавного ніздрюватого бетону: від голчатих кристалів до гексагональних та заблокованих гідратних кристалів.

До головних параметрів порової структури відносять: розміри та форму пор, розподілення пор по розмірам а також внутрішню питому поверхню пор.

Найбільш важливі характеристики які впливають найбільше на фізико-механічні властивості наступні: характеристики істинної, інтегральної та диференціальної пористості.

За формою та розміщенням в товщі бетону пори можна класифікувати так:

- за формою: клиновидні, трубчаті, пляшкоподібні, щіловидні та їх комбінації;
- по протяжності: прямі, звивисті, петлюваті;
- за непереривністю: відкриті, тупикові, закриті.

Аналіз показників середнього діаметру пор та полідисперсність осередків ніздрюватих структур бетонів показав, що чим нижче щільність бетону, тим більше полідисперсне розподілення пор в ньому за розмірами, що знижує фізико-технічні властивості ніздрюватих бетонів.

Також, на фізико-технічні показники ніздрюватих бетонів впливають властивості міжпорових перегородок:

- вид та міцність матриці бетону;

- товщина перегородок;
- відхилення товщини перегородки;
- дефекти в структурі перегородки, а саме тріщини, капіляри, тощо.

Макропори ніздрюватого бетону утворюються в наслідок розширення матеріалу під тиском газу. Такі пори не впливають на міцність на стиск ніздрюватого бетону.

Мікропори утворюються під впливом вологи в стінках макропор. Ці пори негативно впливають на осадові властивості ніздрюватих бетонів.

Специфіка пористої структури визначає анізотропію основних властивостей ніздрюватих бетонів. Міцність при стиску перпендикулярно напрямку спучування на 15...20 % більше чим при навантаженні в паралельному напрямку спучування. Це можна пояснити деформацією пор, яке відбувається внаслідок осідання свіжеспученої пористої маси та тиском верхніх шарів маси суміші на нижні. В результаті пори деформуються, становляться овальними з максимальним розміром по горизонталі.

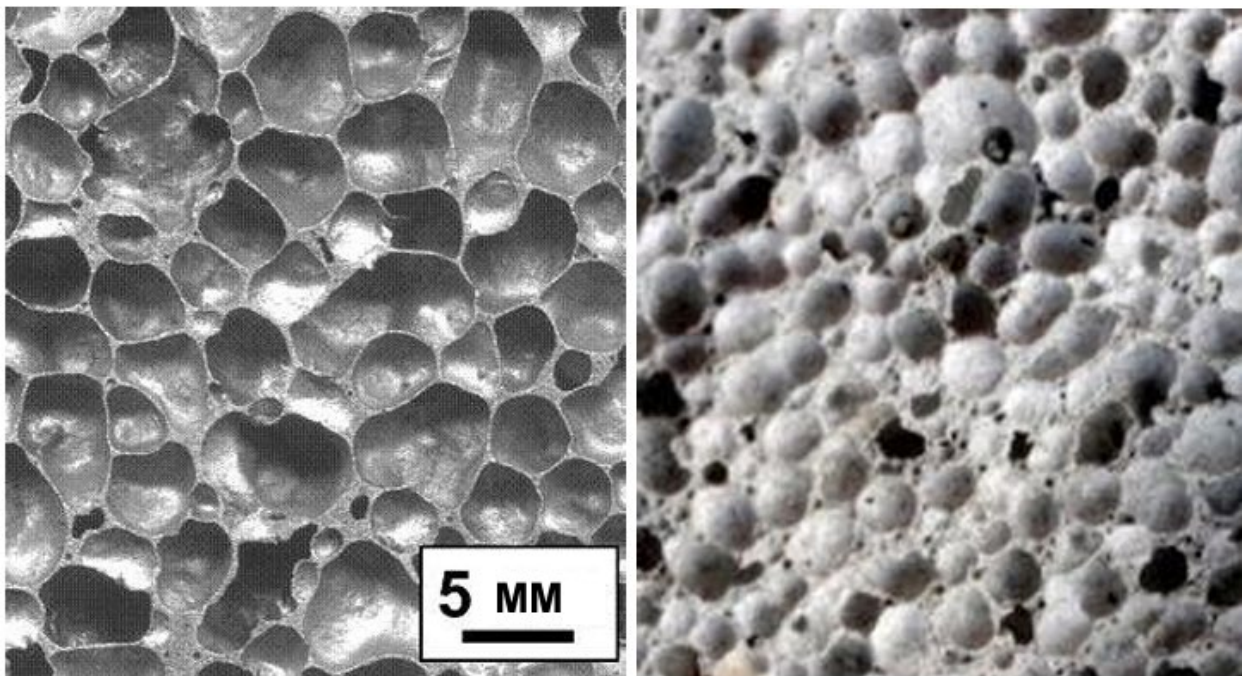


Рисунок 1.3 – Структура пор в ніздрюватих бетонах

1.3 Аналіз показників якості пінобетону та їх взаємозв'язок

Ніздрюваті бетони характеризуються наступними показниками:

- пористість 60-80%;
- середня щільність 200 - 1200 кг/м³;
- теплопровідність 0,07 - 0,3 Вт/(м·°С);
- міцність при стиску 0,3 – 15,0 МПа;
- водопоглинання 20 – 30 %;
- морозостійкість 35 – 50 циклів.

Пористість ніздрюватого бетону визначати більш важче ніж середню щільність, саме тому при оцінці якості матеріалу використовують саме середню щільність (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Показники якості ніздрюватих бетонів

Марка бетону за середньою щільністю	Теплопровідність бетону Вт/(м·°С)	Паропроникність бетону, г/м·ч·Па
D300	0,08 – 0,09	0,035 – 0,031
D400	0,09 – 0,1	0,030 – 0,027
D500	0,1 – 0,12	0,026 – 0,024
D600	0,13 – 0,14	0,023 – 0,021
D700	0,15 – 0,18	0,020 – 0,018
D800	0,18 – 0,21	0,018 – 0,016
D900	0,20 – 0,24	0,016 – 0,014
D1000	0,23 – 0,29	0,015 – 0,013
D1100	0,26 – 0,34	0,014 – 0,011
D1200	0,29 – 0,38	0,013 – 0,011

Теплопровідність ніздрюватих бетонів залежить від пористості, характеристик пор, від наповнювача та вологості матеріалу. На теплопровідність в значній мірі впливає температура матеріалу, в порах якого знаходиться вода, водяний пар або повітря.

Паропроникність ніздрюватих бетонів характеризується здатністю пропускати вологе повітря або пару під впливом перепаду тисків. Завдяки саме цьому показнику якості ніздрюваті бетони «дихають», тим саме забезпечується сприятливий мікроклімат всередині будівлі.

Показник водопоглинання в залежності від виду в'язучого, пористості та характеру структури. Чим вище цей показник, тим нижче міцність матеріалу. Сорбційне зволоження призводить до зниження міцності та підвищенню теплопровідності. Так як пори в ніздрюватому бетоні замкнуті, водопоглинання в такому бетоні нижче ніж в інших матеріалів з капілярною структурою. Саме тому ніздрюваті бетони все частіше використовують для підземних поверхів в будівлях з відповідною гідроізоляцією.

Відпускна вологість пористих бетонів не повинна перевищувати 25% по масі на піску та 35% – на інших кремнеземистих компонентах.

Показники міцності ніздрюватих бетонів залежать від виду в'язучого та умов твердіння. Найбільш міцним з ніздрюватих бетонів є автоклавний – його міцність більша у 8-10 разів. Марки по міцності при стиску ніздрюватих бетонів існують наступні: М5; М10; М15; М25; М35; М50; М75; М100; М150; М200. Також існують наступні класи по міцності при стиску: В0,35; В0,5; В0,75; В1,0; В1,5; В2,0; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В17,5; В20 (табл. 1.5).

Кількість води затворення напряму впливає на міцність стінок матеріалу в ніздрюватих бетонах. Під час затворення, тільки частина води расходується. Інша частина води залишається в міжпоровому просторі і вже після твердіння і подальшого розходу води, в товщі застаються пустоти, канали та окремі замкнуті пори.

В технологіях ніздрюватих бетонів прийнято визначати водо-твердне співвідношення, тобто води затворення до суми твердих складових в суміші 9в'язучого і добавок). При збільшенні В/Т зменшується міцність ніздрюватого бетону [5].

Таблиця 1.5 – Марки ніздрюватих бетонів

Марка за середньою щільністю (D)	Марка міцності при стиску (M)	Клас міцності при стиску (B)	Марка за морозостійкістю (F)	Водопоглинання %
400	10	0,75	-	6-9
500	10	0,75	15	6-9
	15	1,00	15-25	
	25	1,50	15-35	
600	15	1,00	15-25	6-9
	25	1,50	15-25	
	35	2,50	35-75	
700	25	1,50	15-35	5-7
	35	2,50	15-50	
	50	3,50	15-75	
800	35	2,50	15-35	5-7
	50	3,50	15-50	
	75	5,00	15-75	

Для ніздрюватих бетонів існує кубічна залежність міцності від пористості і середньої щільності: при зменшенні середньої щільності у 2 рази, міцність знижується у 8 разів.

Морозостійкість ніздрюватих бетонів встановлюють виходячи з кількості почергового заморожування і відтавання та виражають наступними марками: F15; F25; F35; F50; F75; F100 (табл. 1.5).

Значно впливає на морозостійкість ніздрюватих бетонів будова та вид в'язучого каменю та умови твердіння.

Ніздрюваті бетони неавтоклавного твердіння з цементним в'язучим в основі більш морозостійкі ніж автоклавні з вапняно-кремнеземистою основою в'язучого.

Усадка має значний вплив на якість ніздрюватих бетонів. Цей показник при висушуванні ніздрюватого бетону не нормується. Але неавтоклавний бетон має більшу усадку ніж автоклавний. Усадка призводить до утворення тріщин в поверхневих шарах бетону, що, в свою чергу, знижує довговічність даного матеріалу.

Вогнетривкість ніздрюватих бетонів значно вище за важках бетонів що обумовлено ніздрюватою структурою.

Ніздрюватий бетон можливо використовувати для стін всіх класів пожежобезпеки тому що він не горить та не розповсюджує вогонь.

Звукоізолююча здатність ніздрюватих бетонів достатньо висока, перевищує даний показник багатьох інших будівельних матеріалів.

Технологічність ніздрюватих бетонів на високому рівні – такі бетони можна легко обробляти, а саме пиляти, різати, свердлити, тощо.

Ніздрюваті бетони відносяться до екологічно чистих матеріалів. Цей матеріал не має в складі токсичних речовин, не вділяє їх в навколишнє середовище.

2 ВИБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

Традиційний склад ніздрюватого бетону включає: в'язучу речовину, воду або інший затворювач, кремнеземисту речовину, утворювач пор та добавки. Склад, кількість, стан кожного компонента суміші визначаються заданими характеристиками ніздрюватого бетону, технологією виготовлення та режимом твердіння.

2.1 В'язучі речовини для виготовлення ніздрюватих бетонів

Головною складовою ніздрюватих бетонів є в'язучі речовини, які впливають на структуроутворення бетону та його реологічні властивості[12].

Від характеристик в'язучої речовини залежить швидкість схвачування бетонної суміші та її структуроутворення - чим повільніше схоплення суміші, тим більша буде усадка бетонної суміші.

Висока активність в'язучого компонента забезпечує підвищення міцності ніздрюватого бетону та зміцнення міжпорових перегородок.

Для ніздрюватих бетонів неавтоклавного твердіння як правило використовують портландцемент високих марок без будь-яких добавок (таких як попіл, опока, глинисту, тощо).

Пропонується використання алітового портландцементу, який забезпечує лужне середовище в системі для протікання реакції гідратації. Він має в складі не менше 50% C_3S , який виділяє $Ca(OH)_2$ при гідратації. Вміст C_3A має бути не більше 6 – 8%. Терміни схвачування: початок – не раніше 2 годин, кінець – не пізніше 4 годин. Для такого цементу питома поверхня повинна бути 250-300 m^2/kg для конструктивно-теплоізоляційного

ніздрюватого бетону та 300-400 м²/кг для теплоізоляційного.

Використовуючи в'язуче низького водозатворення (ВНВ) забезпечується більш швидкий набір структурної міцності поризованої ніздрюватої бетонної маси.

Під час взаємодії цементу з водою відбувається адсорбційне та хімічне диспергування, зерна в'язучого розпадаються на окремі частки, які покриваються диполями води та утворюють гідратуючі частки вихідних матеріалів. Визначити швидкість диспергації можливо розчиненням алюмінатних і ферроалюмінатних з'єднань, а також розклинюючою дією води, яка проникає в мікротріщини часток цементу при зволоженні.

При взаємодії С₃А з водою питома поверхня збільшується у 80 разів – з 300 до 25000 м²/кг на протязі першої години. Інші клінкерні фази диспергують вже повільніше. На поверхні часток твердої фази вода має щільність 1200 кг/м³. Диспергування часток цементу обумовлює ріст питомої поверхні твердої фази, зменшує об'єм міжзернової води і як результат утворюється цементний клей. В середині кожного зерна цементу назавжди залишається негідратне ядро - беліт та аліт не здатні гідратувати повністю.

В процесі гідратації цементу в пінобетонній суміші кількість міжчасткової вільної води зменшується. З компонентами бетонної суміші ПАР хімічно не взаємодіють, тому знижується водовміст, що в свою чергу призводить до підвищення концентрації ПАР в міжчастковій воді, отже зменшується пружність плівок. Структурно небезпечне підвищення концентрації ПАР відбувається в результаті зменшення об'єму міжчасткової вологи в твердіючій пінобетонній суміші. Скачкоподібне зниження пружності плівок може визвати розшарування пінобетонних сумішей. Важний вплив на агрегатовану стійкість пінобетонних сумішей надає швидкість адсорбційної та хімічної диспергації зерен цементу.

Описаний процес диспергації відбувається одночасно з ростом кристалічних новоутворень цементного каменю в пінобетонних сумішах, які забезпечують фіксацію структури в просторі. Якщо в суміші вміст С₃А буде

більше 6%, швидкість зневоднення плівок розчину ПАР призведе до значного зниження їх пружності, що, в свою чергу, визове збільшення середнього радіусу пор. Після укладки пінобетону у форми перебудова ніздрюватої структури обов'язково призведе до часткової або повної усадці в перший час. До масштабного розшарування суміші після укладання в форму призводить подальше підвищення вмісту C_3A . Це означає що в'язуче з підвищеним вмістом алюмінатів не дають позитивних результатів в технології пінобетонів, як і використання розширюючих або напружуючих цементів.

Для технологій ніздрюватих бетонів, а саме пінобетонів головною умовою формування якісної структури є зберігання в період фазових переходів агрегативної стійкості суміші, тому вимоги до цементів розподіляються в залежності від потрібного виду пінобетону.

Для традиційних пінобетонів рекомендовано використовувати низькоалюмінатні цемента. Для фібробетонів – любий з видів цементів.

В якості головної в'язучої речовини в силікатних автоклавних виробках використовують будівельне негашене кальцієве вапно повітряного твердіння з вологістю не більше 5%. Для таких виробів рекомендується використовувати негашене вапно – кипілку не менше 2-го сорту з вмістом 80% активних CaO та MgO , непогасившихся частинок не більше 11 % та з дисперсністю менше 0,2 мм. Зміст «перепалу» трохи більше 2 %. В такій суміші виділяється велика кількість теплоти, що сприяє процесам пороутворення, маса зберігається газонасиченою та не осідає, підвищується міцність готових виробів.

Викорисання в'язучого на основі вапняно-беліту має містити вільного CaO 35 – 45 %, двокальцієвого силікату – не менше ніж 30 %, а також питома поверхня в'язучого 400 – 500 m^2/kg , час гідратації 8 – 20 хв.

Використання гранульованого доменного шлаку разом з активізаторами твердіння потрібен бути: в міст закису марганцю не більше 1,5%, сіри сульфідної не більше 0,1%, модуль активності такого шлаку – 0,4. Шлак необхідно перемолоти до тонкодисперсного стану, він не повинен містити

щільних каменеподібних кусків та сторонніх домішок, вологість не повинна перевищувати 15%, питома поверхня – не менше 500 м²/кг.

Використання шлаколужного в'язучого, який містить їдкий луг та молотий гранульований шлак можна використовувати як в'язуче в ніздрюватих бетонах. Також можливе використання лужного плаву в цих складах.

Високоосновне зольне в'язуче від згорання сланцю та кам'яного вуглю має містити СаО не менше 30%, у тому числі вільної СаО 15 – 25%, SiO₂ 20 – 30%, SO₃ – не більше 6% та сумарної кількості K₂O + Na₂O – не більше 3%. Питома поверхня 300 – 350 м²/кг.

Можливе використання сульфатного в'язучого, або так званого звичайного будівельного гіпсу з добавкою кристалічного карбонату кальцію в розмірі 5%.

Також можливе використання вапняно-цементних або золо-цементних в'язучих при виробництві автоклавних ніздрюватих бетонів.

Актуальною проблемою залишається висока вартість портландцементу, технічна складність автоклавної обробки бетонів, тому пошук альтернативних в'язучих, які б дозволили прискорити технологічний процес, покращити поризацію бетону та які не потребують високотехнологічної обробки знайшли відображення в багатьох роботах науковців.

2.2 Наповнювачі, піноутворювачі і добавки для ніздрюватих бетонів

Використання різноманітних добавок у виробництві ніздрюватих бетонів в останній час стало обов'язковим, так як вони можуть змінювати стан та властивості бетонів, параметри технологічних процесів і навіть характеристики готових виробів[13].

Добавки бувають наступні:

- наповнювачі, а саме тонкодисперсні порошки, фібра, волокна;
- пластифікатори;
- прискорювачі твердіння;
- стабілізатори піни;
- хімічні добавки (для впливу на газовиділення);
- та інші.

За допомогою добавок можна досягти зниження водотвердого співвідношення, збільшення рухомості та пластичності ніздрюватих мас на стадії приготування, забезпечити необхідну в'язкість під час поризації та інші необхідні реологічні характеристики.

Використання золи-винесення ТЕС тонкодисперсного помелу зменшує водовміст мас і знижують їх в'язкість. Використання відходів промислового виробництва – шлаків, а також вапняків знижують в'язкість мас, а включення в склад гіпсу підвищує в'язкість і пластичну міцність бетону.

Процеси схвачування та твердіння в'язких в складі ніздрюватих бетонів обумовлюють набір початкової міцності масиву. Так як портландцемент має повільні строки схвачування (не раніше 45 хв.), необхідно додавання добавок які структурують поризований масив. Такою добавкою може бути напівводний гіпс.

Останнім часом набуло актуальності використання комплексних добавок, наприклад, модифікатор бетону М-01 разом з суперпластифікатором С-3.

Структуруючий ефект ніздрюватих мас можна досягти додаванням водорозчинної добавки карбоксиметилцеллюлози (КМЦ), але ця добавка сповільнює процес гідратації та твердіння цементу. Натомість одночасне використання хлориду кальцію, гіпсу і мікрокремнезему при виготовленні ніздрюватої маси стабілізуватиме рухомість і пластичність маси, ефективно газоутворення та стабільність при визріванні і, як наслідок, отримаємо підвищену міцність виробів.

В якості спеціальних добавок при виготовленні ніздрюватих бетонів

використовують: камінь гіпсоангідридний або гіпсовий, технічна сода, рідке натрієве скло, калій вуглекислий, натр технічний, тинатрійфосфат, сульфат натрію та інші.

При твердінні і висиханні ніздрюваті бетони мають значну усадку, яка обумовлена капілярними силами, що виникають в порах матеріалу при зміні вологості. Усадка призводить до утворення наскрізних або поверхневих тріщин, які впливають на довговічність та експлуатаційні властивості в цілому готових будівельних конструкцій з ніздрюватого бетону. Для попередження розшарування суміші та отримання безусадочних ніздрюватих бетонів необхідно дисперсне армування волокнами, такими як синтетична дисперсна арматура (фібра) яка буде витримувати зовнішнє навантаження у складі міжпорових перегородок. Дисперсна арматура, будучи протяжною поверхнею розділу фаз, у ході приготування сумішей здатна за допомогою поверхневих сил фіксувати в просторі зернисті частинки в'язучого та наповнювача.

2.3 Кремнеземисті компоненти для виготовлення ніздрюватих бетонів

Великий вплив на властивості ніздрюватих бетонів надають кремнеземисті компоненти, які можна представити цілим рядом матеріалів техногенного походження або кварцовим піском [13].

Дисперсність та характер поверхні кремнезему, вміст домішок мають великий вплив на хімічний склад ніздрюватих сумішей. Кремнезем вступає в хімічну взаємодію з в'язучим або продуктами гідратації тим самим збільшуючи міцність бетону. Дисперсність кремнезему забезпечує стійкість ніздрюватих сумішей – чим менший розмір частки кремнезему, тим рівномірніший розподіл повітряних пор в структурі, тим менша усадка сумішей. Оптимальним розміром кремнеземистих часток для міцного

міжпорового каркасу бетону вважається 0,35...0,80 мм. Якщо розмір часток буде більшим, вони перетворяться в чужорідні включення та не будуть мати впливу на міцнісні, теплофізичні характеристики утворюваних бетонів. Саме тому гранулометричний склад кремнеземистих добавок назначають враховуючі середню щільність ніздрюватого бетону. Максимально можливі зерна по величині повинні бути не більші $\frac{1}{2}$ товщини перегородки між осередками. Тонкодисперсність кременеземистого компонента забезпечує підвищення міцності бетону, зберігання ніздрюватої структури формовочної маси та виключить її осадку.

Існує пряма залежність дисперсності кременеземистих добавок від міцності ніздрюватого бетону – чим менший розмір часток кремнезему, тим більша міцність бетону.

Ще одним фактором, який впливає на якість ніздрюватих бетонів – вміст домішок глини, слюди та органічних включень в кремнеземі. Наявність глини в кременеземі визиває підвищення водопоглинання та тріщинуватість на поверхні виробів. Вміст органічних включень, оксидів металів порушить нормальне твердіння в'язучих та взаємодії їх з кремнеземистими частками.

Великий вміст домішок, які містяться в слюді та польовому шпаті, а саме сірчастих та органічних включень, оксидів лужних металів, перешкоджає нормальному твердінню в'язучих та їх взаємодії з частками кременеземистого компоненту.

В залежності від середньої щільності бетону зміна дисперсних характеристик кременеземистих характеристик дозволить залучити в виробництво матеріалів різного зернового складу.

В якості кременеземистого компоненту у виробництві ніздрюватих бетоні рекомендується використовувати природні матеріали, вторинні продукти виробництва промисловості та енергетики, а також продукти власного виробництва (обрізки, горбушки). Це можуть бути такі матеріали:

-для автоклавного: кварцовий пісок із вмістом кварцу не менше 90 %, слюди не більше 0,5 %, мулистих та глинистих домішок не більше 3 % та не

більше 1 % глинистих домішок типу монтморилоніту; також допускається застосування польвошпатового піску із вмістом кварцу не менше 60 %; кварцові піски повністю або частково мелені та в окремих випадках – тонкодисперсні мелені. Кварцовий пісок розмелюють у млинах майже до тонкості цементу; вміст лугів (у перерахунку на Na_2O) – не більше 2,7 %, сірчистих та сірчаноокислих сполук (у перерахунку на SO_3) – не більше 0,5 %; граничний розмір зерен піску, що рекомендується, - не більше 3 мм, з вмістом зерен до 1 мм від 60 % до 80 %, слюди не більше 0,5 %, мулистих і глинистих домішок не більше 3 % і не більше 1 % глинистих домішок типу монтморилоніту.

Для неавтоклавного краще використовувати більш активний аморфний кремнезем - вторинні тонкодисперсні продукти збагачення руд, які містять SiO_2 не менше 60%, залізистих мінералів не більше 20%, сірчистих сполук перерахунку на SO_3 не більше 2%, їдкового лугу не більше 2%, пилоподібних, глинистих частинок не більше 3%, слюди не більше 0,5%. Питома поверхня меленого піску ($\text{m}^2/\text{кг}$) та вторинних продуктів збагачення руд у шламів для пористого бетону має бути: 150 – 200 для щільності $800 \text{ кг}/\text{м}^3$; 200 - 230 для $700 \text{ кг}/\text{м}^3$; 230 - 270 для $600 \text{ кг}/\text{м}^3$; 270–300 для $500 \text{ кг}/\text{м}^3$ і нижче. Можливе використання високоосновної кислотої золи-віднесення ТЕС, яка має містити склоподібні та оплавлені частинки не менше 50%; втрати при прожарюванні не більше 3 %, сірчистих та сірчаноокислих сполук у перерахунку на SO_3 не повинно бути більше 2 %, у тому числі сульфідної сірки – не більше 1 % за масою; вміст кварцу (SiO_2) – щонайменше 45 %, CaO – трохи більше 10 %; вміст незгорілих залишків палива: для кам'яного вугілля – не більше 7 %; для бурого вугілля – не більше 5 %; питома поверхня має бути не менше $500 \text{ м}^2/\text{кг}$; вміст лужних оксидів натрію та калію в перерахунку на Na_2O має бути не більше 3 %, вміст оксиду магнію (MgO) у зольній складовій повинен бути не більше 5 %; зола має витримувати випробування на рівномірність зміни обсягу. Також рекомендовано використання керамзитового піску, який має модуль крупності не більше 2,5 для пористого бетону середньої щільності від

1100 до 1200 кг/м³ та 2,0 для пористого бетону середньої щільності нижче 1000 кг/м³; пісок вермикулітовий з модулем крупності трохи більше 2,5 має водопотребою трохи більше 16 %.

Питома поверхня кремнеземистого компонента для забезпечення середньої щільності бетону повинна бути наступною:

- 150 - 200 при середній щільності 800 кг/м³;
- 200 - 230 при середній щільності 700 кг/м³;
- 230 - 270 при середній щільності 600 кг/м³;
- 2700 – 3000 за середньої щільності 500 кг/м³.

Якщо середня щільність бетону менша за 500 кг/м³, ніздрюваті бетони виготовлюють без кремнеземистих добавок.

Додавання кремнезему до суміші знижує витрати в'язучого та зменшує усадку бетону, тому використання відходів продуктів промисловості вигідно як екологічно, так і економічно.

2.4 Використання пороутворювачів в технологіях ніздрюватих бетонів

Компонент який забезпечує формування ніздрюватої структури є пороутворювач. Цей компонент сприяє утворенню повітряних або газоподібних пор, забезпечують потрібну середню щільність бетону та інші фізико-механічні показники [11].

Зведена таблиця добавок, які забезпечують утворення осередків в легких бетонах представлена нижче (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри ефективності пороутворювачів

Вид	Піноутворювач	Газоутворювач	Повітрявтягуючі
Вимоги надійності	Об'єм повітря, яку вводять в бетонну суміш складає 10-25%. Втрата повітря після 30 хвилин витримки бетону не більше 25%.	Об'єм газу що утворюється в бетоні – 15-25 %, період активного газовиділення складає від 5 до 30 хвилин.	Об'єм повітря, яку вводять в бетонну суміш складає 6-15%. Втрата повітря після 30 хвилин витримки бетону не більше 25%.
Додаткові ефекти	Зниження розшарування суміші та підвищення удобоукладання бетонної суміші	Зниження розшарування суміші та підвищення удобоукладання бетонної суміші	Зниження розшарування суміші та підвищення удобоукладання бетонної суміші

При рівномірному розподіленню осередків у вигляді полідисперсних за розміром, замкнутих, деформованих в правильні багатогранників, з гладкою поверхнею, розділених тонкими щільними та однаковими в перерізі поровими перегородками вважається оптимальною структура пор.

Серед сучасного різноманіття будівельних матеріалів пороутворювачі можуть бути представлені у вигляді алюмінієвого порошку або пасти та широким спектром піноутворювачів синтетичного або природного походження.

Газоутворювачі здатні виділяти газ в результаті хімічної взаємодії з продуктами гідратації цементу або іншими складовими суміші.

Поризація ніздрюватих газобетонів основана на утворенні в'язучих газових бульбашок (осередків) в тісті які створюють структуру формувальної маси.

Різновиди газоутворювачів при виробництві бетону:

- пергідроль технічний (використовують досить рідко);
- пудра алюмінієва;
- паста на основі алюмінієвої пудри.

Відмінність алюмінієвої пудри від пасти полягає в тому, що в пудрах

гранули середні та дрібні та мають слабку зв'язаність, в той час як в пасті гранули великі та мають високу ступінь зв'язаності.

Алюмінієва пудра – це алюмінієвий тонкодисперсний порошок срібного кольору, який має вигляд дрібної лузги довжиною 20...50 мкм та товщиною 1...3 мкм. Даний порошок має велику питому поверхню, що забезпечує рівномірне розподілення у воді тривалий час (лузга осідає на дно приблизно через 2...3 години). Криюча здатність порошку складає 700...1000 м²/кг.

Для виготовлення ніздрюватих бетонів доцільно використовувати алюмінієву пудру марок ПАП-1 та ПАП-2 (пудра алюмінієва пігментна), яка містить 91,1...93,9% активного алюмінію.

Активний алюміній - це кількість алюмінію, який здатний вступити в хімічну реакцію при певних умовах, окисляється та виділяє при цьому водень кількість якого залежить від якості сировини.

Витрата алюмінієвої пудри складає в середньому 0,3...0,7 кг/м³ та залежить від заданої щільності газобетону.

Алюмінієва пудра є матеріалом пожежонебезпечним, тому зберігання у великих об'ємах не допустимо. Для попередження загоряння на поверхню лузги наносять жирову оболонку зі стеарину (парафіну), яка використовується при виробництві і забезпечує збереження всіх властивостей пудри. Жирова оболонка лузги надає алюмінієвій пудрі гідрофобні властивості – при змішуванні пудри з водою основна частина порошку буде плавати на поверхні води. Використання пудри в такому вигляді неможливо при виробництві газобетону – алюмінієва суспензія неоднорідна, алюмінієва лузга розподілена нерівномірно. Все це призведе до неоднорідної мілкої пористості формовочної маси.

Для видалення жирової плівки алюмінієву пудру попередньо обробляють, а саме прожарюють в електричних печах 2...4 години при температурі 190...250 °С. Змішування з водою алюмінієвої пудри та підвищення реакційної здатності забезпечує саме прожарювання але технічно це складно. Тому не використовується на виробництві.

Для надання гідрофільності та отримання однорідної суспензії алюмінієвій пудрі використовують добавки – поверхнево активні речовини (ПАР), наприклад сульфанол та інші. Стеаринову оболонку з лузги змиває взаємодія води та парів, як наслідок, очищена лузга взаємодіє з водою. На границі стеарин – вода зменшується поверхневе натягнення за рахунок обробки у водяному розчині ПАР. Алюмінієва пудра має суцільну рівну срібну оболонку на поверхні.

При використанні в якості пороутворювача алюмінієвої пудри, газ утворюється за рахунок вільного кисню, який утворюється в результаті хімічної взаємодії алюмінія з гідроксидом кальцію. Гідроксид кальцію виникає при гідролізі аліту або додатково вводиться разом з вапном. Максимальне газовиділення триває 3...4 хвилини від початку змішування компонентів та температурі суміші 30...40 °С, що обумовлює потребу в підігріві води затворення для газобетонної суміші.

Останнім часом стало актуальним використання спеціалізованої алюмінієвої пудри ПАП-1 та ПАП-2 з гідрофільними властивостями. Під час виробництва додають спеціальні речовини, які забезпечують консервацію та змочування водою пудри. Завдяки цьому значно знижується використання сульфанола, а іноді навіть можливо повністю його виключити зі складу.

Значна частина алюмінієвої пудри агрегована в грудки 100...500 мкм, тому її використання не дозволить отримати однорідну структуру ніздрюватого бетону. До того ж від грудочок утворюються осередки (бульбашки) великих розмірів, які мають неправильну форму, в подальшому вони з'єднуються між собою та виходять з масиву сирцю, тим самим виникає пряма втрата алюмінієвої пудри. Ця проблема може бути вирішена за рахунок використання активатора.

Спеціалізована гідрофільна добавка для алюмінієвої пудри – добавка, яка спеціально розроблена для отримання якісної алюмінієвої суспензії. Зазначена добавка має рідку субстанцію прозорого кольору, яка миттєво розчиняється у воді. Принцип роботи добавки – вплив рідини на стеаринову

оболонку пудри, тим самим надає їй гідрофільності за дуже короткий відрізок часу (1 хвилину). Всі конгломерати руйнуються на протязі перших 5 хвилин, це дозволяє використовувати весь об'єм лузги та знизити витрати алюмінієвої пудри. Використовують суспензію через 10 хвилин перемішування. Суспензію можна зберігати тривалий час – до декількох діб за рахунок відсутності в складі лужних компонентів. Виділення газу починається після перемішування суміші зі всіма компонентами.

Алюмінієві пудри мають ряд недоліків, такі як:

- гідрофобність та високе пилення, що зумовлює необхідність додаткових мір безпеки та використання ПАР під час приготування алюмінієвої суспензії;

- відсутність контролю показників якості пудри виробниками, таких як вміст активного алюмінію та показник кінетики газовиділення;

- під час використання алюмінієвої пудри виникає зв'язь через надмірне пилення, яка є дуже небезпечною для людини;

- потребує спеціальних умов транспортування та зберігання.

Аналіз недоліків використання алюмінієвої пудри зумовив використання алюмінієвої пасти на підприємствах.

Алюмінієва паста представляє собою суміш подрібненого алюмінію та спеціальних добавок, які забезпечують зв'язність часток та не вимагають додаткового використання ПАР. Такі пасти є пожежо- та вогнебезпечними при використанні та зберіганні, безпечні для людини, відповідають сучасним санітарно-гігієнічним нормам умов праці.

Виробництво алюмінієвої пасти здійснюється шляхом вологого або сухого помелу алюмінію або пудри ПАП. Паста добре змочується та перемішується з водою, утворюючи суспензію. Суспензія рівномірно розподіляється в бетонній суміші без агрегування. Розмір пор в виробках газобетону з використанням алюмінієвої пасти у 2...2,5 разів менше ніж у виробках газобетону з використанням алюмінієвої пудри. Але існує істотний недолік використання алюмінієвої пасти, а саме збільшення термінів

досягнення пластичної міцності на 15...30 хвилин. В останній час використання алюмінієвої пасту набирає обертів.

Комплексний газоутворювач представляє собою суміш алюмінієвої пудри та тонкодисперсного феросиліцію. Кожний компонент суміші є газоутворювачем, але має різну швидкість утворення газу та абсолютну масу отриманого газу. Реакція взаємодії іонів силіцію з лужними компонентами суміші протікає повільніше, ніж іонів алюмінію.

Сумарна швидкість утворення маси водню комплексного газоутворювача нижча за швидкість утворення тієї ж маси газу алюмінієвої пудри. Феросиліцій у складі речовини, що спучується, названий газоутворювачем другої дії. Співвідношення алюмінієвої пудри ПАП – 1 та дисперсної феросиліції ФС – 75 в межах від 1:4 до 1:1. Нормативна витрата комплексного газоутворювача 0,25...0,86кг на 1 м³ ніздрюватого бетону щільністю 500 – 800 кг/м³.

Пергідроль (30%-ний водний розчин перекису водню H₂O₂) представляє собою прозору рідину, яка не має кольору і не горить. Вона має здатність самостійно розкладатися на кисень і воду, легко змішується з водою в різних співвідношеннях. Використовується достатньо рідко в порівнянні з алюмінієвими газоутворювачами.

Наступна група пороутворювачів – піноутворювачі, які представляють собою поверхнево-активні речовини (ПАР). Ці добавки забезпечують отримання технічної піни потрібної кратності і стійкості.

Технологія отримання піни наступна. ПАР додають до води, цю рідину збовтують або пропускають через неї повітря. Як результат – утворюється піна. Осередки повітря закладаються у рідкі оболонки, поверхневе натягнення яких менше ніж у води. ПАР складаються з молекул асиметрично-полярної структури, які мають здатність концентруватися у міжфазних шарах та зменшують поверхневий натяг рідини.

Традиційно піноутворювачі розчинні у воді. Під час приготування бетонної суміші пороутворювачі попередньо розчиняють у воді. Дозування

добавки залежить від складу бетонної суміші, виду в'язучої речовини, технології виготовлення низдрюватого бетону і складає 0,1...0,3 % від маси цементу.

Піноутворювачі використовують для отримання технічної піни, речовини колоїдні або напівколоїдні. Водяні розчини цих речовин утворюють міцні та в'язкі плівки – адсорбціони. Якість піни оцінюють пінистістю та стійкістю піни.

Вихід піни, який визначається відношенням об'єму отриманої піни до об'єму водного розчину піноутворювача, використаного для отримання піни, називається пінистість. Вказане співвідношення – кратність піни. Існує пряма залежність – пінистість піни зростає зі збільшенням розмірів пухирців, зменшенням товщини плівок котрі розділяють ці пухирці. В той же час підвищення пінистості може погіршити стійкість піни в результаті зниження міцності плівок при значному зменшенні їх товщини.

Здатність піни зберігати об'єм тривалий час без руйнування називається піностійкістю, або синерезис, для якої характерна величина осідання стовпа піни в одиницю часу. Ще піностійкість іноді називають стійкістю піни.

Обидві характеристики оцінювання якості піни визначаються основним видом та концентрацією піноутворювача. Щоб зберегти стійкість піни та її утворення використовують відповідні добавки:

- активатори піноутворювача для збільшення пінистості;
- стабілізатори піни для збільшення піностійкості.

Активаторами піноутворювача можуть бути використані лужні, нейтральні або кислі електроліти, які здатні підвищувати міцність піни та збільшувати коагуляцію піноутворювача.

Стабілізатори піни збільшують в'язкість розчину піноутворювача, тобто по суті є загусниками. Вони перешкоджають самознищенню піни в часі. Прикладами таких стабілізаторами можуть бути мінеральні солі.

Піноутворювачі поділяються на дві групи: природні та синтетичні.

Природні піноутворювачі отримують на основі виробничих смоляних

кислот або на основі лужних солей жирних кислот тваринного та рослинного походження. Основа для таких піноутворювачів може бути: дубильні екстракти шкіряного виробництва, соапсток, боєнська кров, підмільний луг, сульфітний луг, мильний корінь. Одним з недоліків таких піноутворювачів є нетривалий термін зберігання.

Смолосапонітовий піноутворювач являє собою суміш з мильного кореня та води. Особливістю даного піноутворювача є досить тривалий термін зберігання – 1 місяць при нормальній температурі і вологості повітря.

Клеєканіфольний піноутворювач є продуктом приготування кісного клею, водного розчину їдкового натру та каніфолі. Даний піноутворювач дає великий об'єм стійкої піни при довготривалому збиванні.

Головним недоліком цієї добавки є його несумісність з кислотними прискорювачами твердіння цементу.

Алюмосульфонафтенний піноутворювач отримують з сірнокислого глинозему, їдкового натру та керосинового контакту. Може зберігатися до 6 місяців без втрати головних властивостей.

Піноутворювач з рідкого скла ЖПС виробляється на основі рідкого скла, їдких лугів, каніфолі та води.

Піноутворювач який готують з гідролізованій боєнської крові марки ПО-6 та сірнокислого заліза називається Піноутворювач ГК. При використанні можливо також застосовувати з прискорювачами твердіння. Може зберігатися терміном до 6 місяців.

За останнє десятиліття велике поширення отримали органічні піноутворювачі. Деякі з них представлені нижче:

- Хостапур ОСБ (Hostapur OSB) – представляє собою ПАР-аніонний жовтуватий порошок на основі високомолекулярного сульфонату олефіну. Використовується для виробництва пінобетонів та розчинних сумішей дозуванням 0,005...0,05% від маси компонентів в сухій суміші;

- Неопор (Neopore) – представляє собою рідину темного коричневого кольору на протеїновій основі – піноконцентрат щільністю

1,128 кг/л;

- Аддимент СБ 31 Л (Addiment SB 31 L) - представляє собою рідину темного коричневого кольору на протейновій основі щільністю 1,13 кг/л;

- Целікід ЛП2 (Zeliquid LP2) - представляє собою рідину аніонного типу, використовується для виробництва пінобетонів та розчинних сумішей дозуванням 0,01...0,06% від маси компонентів в сухій суміші.

Наступна група піноутворювачів – синтетичні піноутворювачі, які виготовляють на основі алкілсульфонатів, алкіларилсульфонатів, нафтових та карботових кислот. Цей тип добавок мають значно більший термін зберігання на відміну від інших та постійним набором властивостей:

- Морпен – це рідина щільністю 1,05...1,2 кг/л яка має коричневий колір та не має кристалічного осаду. Значною перевагою є те, що ця добавка стійка до агресивних середовищ;

- Піностром – синтетична рідина темного коричневого кольору щільністю 1,07 кг/л, яка виробляється на основі алкілсульфатів та первинних жирних спиртів;

- ПО – 1 – натрієві солі нафтових сульфокислот, які отримуються з відходів нафтопереробки;

- ПО–БНП–М – це розчин, який складається з натрієвих солей вторинних алкілсульфатів з додаванням стабілізуючих компонентів;

- ТЕАС – представляє собою водний розчин триетаноламінових солей первинних алкілсульфатів, отримують сульфівуванням первинних жирних спиртів хлорсульфонової кислоти та подальшою нейтралізацією продуктів триетаноламіном. Ця добавка рідка та має спектр кольору від світло-жовтого до темно-коричневого. Щільність – 1,0...1,2 кг/л;

- ПЯБ – рідка добавка на основі сульфанола. Склад даної добавки – органічний клей, хлорне залізо, алкіларилсульфонат та вода;

- АОС – альфаолефінсульфонат натрію, представляє собою в'язку рідину, має чорний колір та різну початкову концентрацію складу. У складі наступні речовини – сульфівувані первинні альфаолефіни сірним ангідридом

та каустичною содою для нейтралізації.

Крім вище вказаних піноутворювачів можливо використовувати повітрявтягуючі добавки смоли деревинної омиленої або сульфанолю.

За останні роки поширеним стало використання піноутворювачів на основі «Прогресс», «Астра», тощо з одночасним додаванням стабілізатору на основі тваринного клею, розчинного скла, КМЦ-4.

При приготуванні пінобетонів витрати вищезазначених пороутворювачів дуже різноманітні, наприклад: клеєканіфольні - 8...12%, смолосапонітові – 12...16%, алюмосульфонафтонові – 16...20%, ГК – 4...6% від кількості води. При використанні в одній суміші двох видів піноутворювачів можливо отримати більш стійку піну проте це значно ускладнює технологію виробництва.

Підбір піноутворювачів доцільно здійснювати під потреби кожного окремого виробництва враховуючи склад суміші та способу її отримання.

2.5 Мікроармування ніздрюватих бетонів

Мікроармування ніздрюватих бетонів здійснюється шляхом додавання в масу армуючих компоненті, таких як полімерні, мінеральні, скляні або органічні волокна. Композитну фібру виготовляють з термоактивних полімерів, базальтових та скляних волокон, тощо.

До армуючих волокон висувається ряд вимог, наприклад, за хімічною стійкістю або модулю пружності фібри. Фібра повинна відповідати відповідним вимогам ДСТУ, європейським стандартам, технічним умовам або технологічним регламентам при відповідному техніко-економічному або експериментальному обґрунтуванні в установленому порядку.

Фібра з синтетичних волокон (поліпропіленових, поліефірних, нейлонових, поліамідних, акрилових, арамідних, поліетиленових, капронових,

поліолефинових, триацетатних, поліакрилатних вуглецевих волокон, волокон з поліетилентерефталата). Ця фібра складається з хімічно-синтезуємих волокон (полімерізацією, поліконденсацією, карбонізацією, тощо).

Синтетична фібра в порівнянні з іншими видами краще розподіляється та змішується, не викликає абразивних ушкоджень обладнання на виробництві.

Синтетичні волокна можна розділити за розмірами на дві групи: мікрволокна довжиною 1 мм та макрволокна довжиною 80 мм. Співвідношення довжини та потрібного діаметру волокон знаходиться в діапазоні 100...500 мм. Для мікроармування ніздрюватих бетонів можуть використовуватися синтетичні волокна різного діаметру від 1 мкм до 100 мкм у вигляді відрізків довжиною 1,1...6,6 мм.

Однією з головних вимог які висуваються до армуючих компонентів є модуль пружності, який для синтетичних волокон в 2...3 рази вищий модуля пружності ніздрюватого бетону. Така фібра хімічно стійка та здатна поліпшити реологічні властивості ніздрюватифібробетонних сумішей.

Наступною важливою характеристикою синтетичної фібри є температура плавлення, окислення та розкладання.

Усі вищезазначені різновиди синтетичної фібри хімічно сумісні з ніздрюватими бетонами на основі портландцементу.

Поліамідна фібра (нейлонове волокно) – це синтетичне волокно, яке виготовляють та формують з розчинів або розплавів поліамідів. Головною перевагою таких волокон є висока міцність та еластичність, тобто має низький модуль пружності та високі відносні деформації при розриві. Відомими представниками таких фібр є капрон, нейлон-6 та нейлон-66 та інші.

Нейлонове волокно інертне до хімічних впливів та лужним реакціям в цементній матриці, в якій вміст фібри 0,1...0,2%.

Рекомендовані норми дозування фібри при армуванні ніздрюватих бетонів може значно різнитися в залежності від вимог якості до бетону, від виду фібри, марки цементу і навіть від торгової марки виробника волокон.

Окрім фібри промислового виробництва дозволяється використовувати фібру з промислових відходів, наприклад, з кордного волокна, яке виготовляють з шинного корду.

Кордні волокна відносяться до синтетичних волокон органічного походження. Довжина цих волокон 5...25 мм, діаметр – до 0,67 мм. Кордові волокна легко переміщуються з сухими компонентами або з готовою сумішшю, здатні рівномірно розподілятися по об'єму, не розшаровується під час транспортування або вібротрамбування. На кінцях волокон існує розпушення, яке забезпечує анкерування, крім того, скручення волокон створює профілірування. Оптимальна кількість складової волокна для бетонної суміші складає 0,6%, або 2% від маси цементу.

В таблиці 2.2 представлені показники фізико-механічних характеристик кордних волокон.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні характеристики поліамідних волокон

Тип волокна	Діаметр волокна, 10 ⁻³ мм	Довжина волокна, мм	Щільність, кг·м ³	Межа міцності на розтяг, МПа	Межа деформації	Процент армування
Поліамідна (нейлонна) фібра	22,86		1140	965	20	
Поліамідне волокно ISO/TC/38/SC			1130-1135	340-509	40-70	
Нейлоне волокно			1100	770-840	16-20	
Кордні волокна (капронові) з відходів промисловості	до 670	5...25	1100-1500	720	24±2	2% від маси цементу
Поліамідна фібра «Капрон»	20	20	1140	700	4-7	0,3...2,7% від загальної маси

Арамідна фібра (ароматичний поліамід) – синтетичне волокно яке має високу термічну та механічну міцність, головними представниками якого є Kevlar, Twaron, Nomex, Kermel, Терлон.

Іншим відомим представником арамідного волокна – СВМ, яке має жовто-зелений колір, блискуче, пластичне при розтягу, товщиною 30 мкм.

Арамідне волокно марки «Терлон» має жовтий колір та зеленуватий відтінок, пластичне, має товщину 23...25 мкм.

Головним недоліком арамідного волокна є здатність поглинати вологу, але існує ряд переваг: міцність у 5 разів більше сталевого волокна та у 2,5 рази міцніше скляного; стабільне за міцністю і деформативністю при високих температурах.

Фізико-механічні показники арамідних волокон представлені в таблиці 2.3, значення приведених міцностних характеристик повинні відповідати технічним умовам.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні характеристики арамідних волокон

Тип волокна	Індекс за ISO	Щільність, кг·м ⁻³	Межа міцності на розтяг МПа	Модуль пружності ГПа	Межа деформації, %
Полі(фені-лентерефталамідні), СВМ, тварон, кевлар	p-AR	1420-1450	<3588	65-70	2,5...3,5
Полі(м-феніленізофталамідні), фенілон, номекс	m-AR	1398-1405	841-981	20-30	10...15
Полі(феніленоксадиазольні), Оксалон (арселон)	POD	1360-1370	1365-2048	40-60	2,0...3,7
Арамідне		1450	3500-4000	70...135	2,0...4,0

Поліпропіленова фібра являє собою полімерні волокна на основі поліпропілену з підвищеною деформативністю та хімічною стійкістю. Ця фібра має високий модуль пружності, високу хімічну стійкість та міцність, найбільш затребуваний при виробництві ніздрюватих бетонів.

Формування поліпропіленової фібри відбувається в наслідок полімеризації пропілену. В світовій практиці поліпропіленова фібра виробляється двох видів: моно- та мультволоконна. Мультволоконна фібра має вигляд різану та скручену сітку, яка при перемішуванні бетону розкручується, витягується та виконує наскрізне армування бетону; формується у вигляді моноволокна. Властивості поліпропіленової фібри – хімічно стійка, не вбирає вологу, термостійкий. Завдяки формі хвилі забезпечує міцне зчеплення з бетоном, надає йому міцність та зносостійкість.

Діаметр пропіленових волокон 20...60 мкм, довжина вагається від 3 мм до 18 мм. Оптимальний вміст в неавтоклавному пінобетоні складає 1...3% від маси цементу.

Найбільш активно використовується пропіленове волокно «ВСМ-Бетон», яке представляє собою фібриліровані волокна з термопластичних полімерів круглого перетину $\varnothing 17...25$ мкм. Використовується як структурний компонент розчинів і сумішей, здатний модифікувати структуру в'язучих речовин, запобігає утворення внутрішніх дефектів.

В пінобетонах використовується в основному марка ВСМ-II-20/6. Ця фібра здатна перемішуватися в будь-якому типі змішувачів, волокна добре диспергують. Фібра може вводиться після додавання води або в суху суміш. Рекомендована тривалість перемішування бетонних сумішей необхідно збільшити на 10...20% для надання гомогенного стану суміші. При додаванні волокон в ніздрювату суміш, збільшується її еластичність, пластичність і гомогенність, саме тому не треба додаткового введення води затворювання.

На ринку сучасних будівельних матеріалів представлено ряд закордонних марок пропіленових волокон.

В Англії були розроблені поліпропіленові волокна «Caricrete»

довжиною 10...100 мм, які вводять у бетонну ніздрювату суміш в кількості 0,1...0,4 % від маси всього матеріалу.

Фізико-механічні показники поліпропіленових волокон зведені в таблиці 2.4.

Поліефірна фібра – матеріал, який виготовляється та формується з розплаву полімеру поліетилентерефталат (PET) та його похідних. Для фібробетонів використовують поліефіри-термопласти, які здатні переходити у високоеластичний або в'язкотекучий стан при нагріванні та назад. При збільшенні температури змінюються характеристики матеріалу, а при збільшенні температури більше ніж 260°C відбувається руйнація. Поліефірна фібра має високу хімічну стійкість і не поглинає вологу, механічно зчіплюється у матриці розчину.

Таблиця 2.4 – Фізико-механічні характеристики поліпропіленових волокон

Тип волокна	Діаметр волокна 10^{-3} мм	Щільність, кг/м ³	Межа міцності на розтяг, МПа	Гранична деформація, %
Поліпропіленове волокно		900-910	138-689	15
Поліпропіленове волокно за ISO/TC 38/SC		919-922	276-414	45-90
Поліамідні волокна	20...200	900	500...750	6...9
Поліпропіленове мультіфіламентне волокно	25...35	910		
Волокно будівельне мікроармуюче ВСМ-II-20/6	17...25	910	650	15
Фіброволокно (СЗН6) N Cemmix Fibra	20...25	910	560	

Поширеними представниками поліетилентерефталата є торговельні марки «Лавсан» або «Лавсанове волокно».

Фізико-механічні показники поліефірних волокон та ниток представлені в таблиці 2.5 та 2.6.

Поліетиленова фібра (волокно) представляє собою синтетичне волокно, яке отримують шляхом полімеризації етилену при низькому або високому тиску у вигляді нитки (моноволонна) $\varnothing 0,2...0,8$ мм. Волокна мають низьку термопластичність та температуру плавлення, головна перевага – висока хімічна стійкість.

Поліетиленова фібра може мати низку конфігурацій для поліпшення зчеплення з бетоном. Фібра не вбирає вологу і добре розподіляється по матриці суміші.

Таблиця 2.5 – Фізико-механічні показники поліефірних волокон

Тип волокна	Діаметр волокна 10^{-3} мм	Щільність, кг/м ³	Межа міцності на розтяг, МПа	Гранична деформація, %
Поліефірні (поліестерні) волокна	19,8	1340...1390	227...1103	12...150
Пліетилентерефталатні волокна			491...614	30...50
Поліефірні волокна		1400	730...780	11...13
Кордні волокна з промислових відходів	670	1100...1500	710...720	

Таблиця 2.6 – Фізико-механічні показники поліефірних ниток

Тип нитки	Індекс ISO	Відносна міцність, сН·текс ⁻¹	Межа міцності МПа	Подовження при розриві, %
Поліетилен-терефталтні нитки	PET			
Технічна нитка		57...80	778...1092	8...11
Полігліколідна нитка	PGF	40...45	546...614	15...20
Полілактидна нитка	PLF	35...40	478...546	20...25
Полі пропілентерефталатна нитка	PPT	30...35	410...478	35...45
Полі бутилентерефталатна	PBT	32...37	437...505	33...38

Фізико-механічні показники поліефірних волокон приведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Фізико-механічні показники поліефірних волокон

Тип волокна	Діаметр волокна 10 ⁻³ мм	Щільність, кг*м ³	Межа міцності при розтягу, МПа	Модуль пружності, ГПа	Гранична деформація, %	Температура плавлення, °С	Водопоглинання, %
Поліетиленове 1 тип	25,4... 1016	920... 960	76... 586	4,999	3...8	134	відсутнє
Поліетиленове 2 тип		950	600... 720	1,400... 4,200	10...12		

Полівінілспиртове волокно (ПВС-волокно, «вінол») виготовлюють з полівінілового спирту у вигляді нитки або джгута. Дані волокна мають високі показники зносо- та атмосферостійкістю, хімічною та помірною кислотною та лужною стійкістю. Характеристики тепло- та термостійкості ПВС ниток та волокон наступні:

- температура плавлення 225...230 °С;
- температура склювання 85...90 °С;
- температура розкладення 170...230 °С.

Волокно має високу гігроскопічність, тому його використання в умовах довготривалої вологи обмежена. До того ж волокно високомодульне, його модуль пружності у 2...5 разів більша за показник поліамідного волокна.

Акрилова фібра, або поліакрилонітрильні синтетичні волокна, які отримують з розчинів поліакрилонітрила або його похідних. Найбільш розповсюджені наступні назви: акрил, акрилан, нітрон, панакрил, дралон. Найбільш поширено використання даної фібри у виготовленні текстильбетонах. Акрилове волокно є похідним для виготовлення вуглеволокна. Фізико-механічні показники поліакрилонітрильних волокон та ниток зведено в таблиці 2.8 та 2.9.

Таблиця 2.8 – Фізико-механічні показники акрилових ниток

Тип нитки	Індекс за ISO	Щільність, кг*м ³	Питоме розривне навантаження	Межа міцності при розтягу, МПа	Подовження при розриві, %	Модуль пружності, ГПа
Поліакрилонітрильні нитки ISO/TC/ 38/SC	PAN	1170... 1190	40...52	472...614	15...25	4...6

Таблиця 2.9 – Фізико-механічні показники акрилових волокон

Тип волокна	Діаметр волокна 10^{-3}	Щільність, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Межа міцності при розтягу, МПа	Модуль пружності, ГПа	Гранична деформація, %
Акрилові	12,7... 104,14	1160... 1180	269... 1000	13,79... 19,306	7,5...50
Поліакрилонітрильні за ISO/TC 38/SC		1170... 1190	236... 389	3,0...3,5	20...45
Поліакрилонітрильні FibARM Fiber WB	14... 31	1170 \pm 30	До 500	Не більше 11 ГПа	26

Вуглецеве волокно (ВВ) – високоміцний матеріал, який отримують в результаті ступінчатої термічної обробки при температурі від 240 до 3000°C синтетичних або природних органічних (поліакрилонітрильних та віскозних) волокон, а також спеціальних волокон з лігніну, фенольних смол, нафтових та кам'яновугільних пеков. Крім того, вуглецеве волокно можна виготовляти з целюлози.

Вуглецеве волокно в своїй більшості інертне до багатьох хімічних впливах та має високу теплостійкість, міцність та пружність; має здатність підвищувати морозостійкість ніздрюватого бетону та його усадку.

Фібру на основі ВВ виготовляють з джгутів, кожен джгут може мати до 12000 окремих ниток Ø 3...15 мкм. Стандартні довжини джгутів 3, 6, 12, 18, 24 мм (найбільш вживана довжина 12 мм для ніздрюватих бетонів).

Фізико-механічні характеристики вуглецевого волокна зведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Фізико-механічні характеристики вуглецевого волокна

Тип волокна	Діаметр волокна, 10^{-3}	Щільність, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Межа міцності на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Межа деформації, %	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	Водопоглинання, %
Вуглецеве		1750	2500... 3500	200... 250			
Високоміцне вуглецеве		1950	2000... 2500	350... 380			
Вуглецеве на основі поліакрилонітрилу, типу НМ (high-module)	7,62	1600... 1700	2482... 3034	380	0,6	400	нема
Вуглецеве на основі поліакрилонітрилу, типу НТ (high-tensile)	8,89	1600... 1700	3447... 3999	230	1	400	нема
Вуглецеве на основі нафтових пеків типу GP (General purpose)	9,91... 12,95	1600... 1700	483... 793	275... 345	2	400	3
Вуглецеве на основі нафтових пеків типу НР (high performance)	8,89... 17,78	1800... 2150	1517... 3103	150... 480	0,5	400	нема

Склопластикову фібру отримують шляхом використання методом пултрузії, тобто протяжки через філь'єру скляних ниток, які нагріті до потрібної температури. Форма даної фібри пряма, нерегулярна довжиною 40 мм і діаметром о 1 мм.

Скляна фібра або скловолокно представляє собою волокно або комплексну нитку зі формованого скла. Дана фібра не має гнучкості, тому здатне руйнувати міжпорові перегородки, взаємодіє з лугами цементу та не зберігає розміри і форму після твердіння бетону.

Скляне волокно може використовуватися для армування різних видів бетонів, в тому числі й лужних. Для таких бетонів використовується ровинга з лугостійкого скловолокна довжиною 10...60 мм або лугостійкого скловолокна з високим вмістом цирконію (наприклад СЕМ-FIL – Великобританія або NEG-Японія). Алюмоборосилікатні скловолокна можна використовувати для армування ніздрюватих бетонів на основі портландцементів та добавкою гіпсу. Однак скловолокно підвержено кородуванню, тому необхідно забезпечувати додаткові заходи для попередження цього процесу.

Рекомендовано використання скловати в якості мікроармування ніздрюватого бетону – безавтоклавного газошлакосилікату, жаростійкого фібропінобетону, тощо.

Фізико-механічні показники властивостей наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Фізико-механічні показники скляної фібри

Тип волокна	Діаметр волокна, 10^{-3}	Довжина волокна, мм	Щільність, $\text{кг}\cdot\text{м}^3$	Межа міцності на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Гранична деформація, %
Алюмо-боро-силікатні типу Е			2540...2580		65...75	3,5
Кварцеві					50...70	3,0
Лугостійке скловолокно марки СЦ-6	10... 15	10... 40		1050...3850		
Скло лугостійке			2700	1400...3500	63...90	0,3...0,4

Мінеральна фібра буває базальтова, азбестова, хризотитасбестова – волокна, які отримують при розплаві гірських порід і шлаків або при мехнічній

обробці мінералів (азбест). Ці волокна можуть вилугуватися, тому їх рекомендовано використовувати для ніздрюватих бетонів незначних щільностей.

Базальтове волокно є одним з найефективніших різновидів мінеральних волокон для армування ніздрюватих бетонів, хімічно стійке, інертно, має добру адгезію.

Базальтова фібра має світлокоричневий колір, блискуче, товщиною 23 мкм. Найбільш широке розповсюдження мають два матеріали – мікрофібра, рублене волокно, базальтова модифікована мікрофібра (МБМ).

МБМ виготовляють шляхом пропитування змільченої мінеральної вати з розплаву мінеральних порід методом рублення на волокна заданої довжини.

Оптимальною кількістю при якій ніздрюватий бетон має найбільшу міцність складає 5%. Якщо цю кількість збільшити до 7...10%, міцність зразків стане меншою за рахунок збільшення водотвердого співвідношення.

Базальтові волокна додаються в суху суміш пере додаванням рідкий при виготовленні ніздрюватих бетонів. Фізико-механічні властивості базальтових волокон представлені в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Фізико-механічні показники базальтових волокон

Тип волокна	Діаметр волокна, 10^{-3}	Довжина волокна, мм	Межа міцності на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Процент армування, дозування
Мікрофібра базальтова модифікована (МБМ)	8-10	0,1...0,5		18	1,5...20% від маси цементу
Мікрофібра базальтова, модифікована астраленами (0,0001...0,01%) «Астрофлекс-МБМ»	8-10	0,1...0,5			
Мікрофібра базальтова «MAGMA MICROFIBER»	Не більше 2	0,025...0,12			0,1; 0,2; 0,3 % від маси сухих компонентів
Тонке базальтоне волокно за ТУ 5952-036-05328981 виробництва «Івотскло» у вигляді відрізків базальтового ровингу	11...13 мкм	10, 15, 20	1500...2000	93,2...116,0	6% від маси в'язучого для волокна довжиною 15 мкм
Базальтоне рублене волокно (чопси)	13, 17	6; 12; 18; 24			0,5...1,0 кг/м ³
Рублене базальтоне волокно з базальту Берестовецького родовища Ровенської області	16	10...12	2000		5% від маси в'язучого
Базальтоне грубе волокно марки БГВ-150 за технічним умовам	80...150	75±25	200		
Мінеральна вата	0,5...12	10...15	400...800	80...210	10% від маси цементу

Азбестове волокно рекомендовано для використання пінобетонів неавтоклавного твердіння. Азбестові волокна називаються хризотиліві або хризотил-азбестові. Ці волокна мають незначну довжину, їх важко розпушувати, але це допомагає рівномірному розподіленню в суміші.

До переваг азбестових волокон відносять висока міцність, довговічність, вогнестійкість, стійкість до агресивних впливів та лугів, має виске зчеплення з цементним комнем. Цю добавку необхідно додавати до змішувача одразу після цементу.

На даний час використання азбесту обмежено санітарно-гігієнічними вимогами.

Фізико-механічні властивості азбестових волокон зведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 - Фізико-механічні властивості азбестових волокон

Тип волокна	Довжина волокна, мм	Щільність, кг*м ³	Межа міцності на розтяг, МПа	Гранична деформація, %
Хризотилазбестові волокна за ГОСТ 12871-2013	7,5; 8,0; 8,5; 10,5; 12,5; 13,0; 13,7	2900	1000...3100	0,5
Хризотил-азбестові волокна звичайні	1,35	2600	910...3100	0,5...0,7
Азбестові волокна [1]	2	2900	560...980	0,6
Азбестові волокна [2]	5,5	2600	910...3100	0,6...0,7

Натуральну органічну фібру отримують з рослинних волокон, яке на первинній стадії має вигляд целюлозних волокон довжиною 0,2...1 мм. У натуральній необробленій фібрі є багато значних недоліків – зволоження,

загнивання, ураження грибками. До того ж деякі волокна (поліамідні, поліефірні, триацетатні) не в змозі зберігати свої властивості при автоклавній обробці, так як розпадаються вже при температурі 800°C. Але використання, наприклад целюлозних волокон знижує усадку майже у 2 рази.

В закордонному виробництві використовують бавовняні та віскозні волокна та нитки для виготовлення текстильбетонів.

Фібра целюлозно-полімерна випускається закордоном, а саме в США, яка попереджує утворення тріщин та підвищує ряд інших характеристик.

Фізико-механічні характеристики представлені в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Фізико-механічні властивості натуральних органічних волокон

Тип волокна	Щільність, кг*м ³	Межа міцності на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа	Гранична деформація, %
Волокна звичайні віскозні	1509...1534	243...304	2...2,4	19...26
Волокна полінозні	1517...1559	554...615	3...4,4	7...11
Целюлозні	1200	300...500	10	10...15
Сизалеві	1500	800	-	3
Деревні	1500	900	71	13...15
Віскозне надміцне	1200	660...700	5,6...5,8	14...16
Бавовняні	1500	420...700	4,9...5,1	3...10
Целюлозні волокна, виготовлені з вторинної сировини природнього походження		> 500	≥35	26...50

3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕАВТОКЛАВНИХ БЕТОНІВ

3.1 Модифікування неавтоклавних бетонів фізико-хімічними методами

Використання піноутворювачів великої кратності збільшує якість утворюваного пінобетону. Проте використання декількох компонентних модифікаторів здатні означити параметри піноутворювача. При виборі компонентів суміші, комплексний модифікатор обирати треба так, щоб він забезпечував пролонговану дію та підвищені міцність, деформативність, морозостійкість, корозійну міцність, тощо. Такий ефект забезпечується при утворенні тонкодисперсної ніздрюватої структури пінобетону з осередками 0,1...0,5 мм. Утворення щільної та надміцної матриці відбувається за рахунок використання тонкодисперсного доменного шлаку, мікрокремнезему, метакаоліну та інших.

Високоякісний бетон можна отримати також за рахунок особливостей технології стабілізації піни. Для того, щоб піна була стабільною, плівка в піні має бути пружною та мати високу в'язкість поверхні. Саме стабілізатори забезпечують вищезазначені властивості. Одним з таких стабілізаторів є тонкодисперсний кремнезем. Більш того, він здатен взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що зменшить карбонізацію утворюваного матеріалу.

Зниження міцності ніздрюватого бетону може відбуватися в наслідок стікання рідкої фази плівки та утворення мікрооб'ємів зі збільшенням водоцементного співвідношення. Саме такі ділянки відрізняються небезпечними осередками руйнації.

На властивості утворюваного ніздрюватого пінобетону впливають кратність піни та коефіцієнт використання [9]. Існує зворотня взаємозалежність – чим більша кратність піни, тим менше потрібно

піноутворювача в суміші. Тому найбільш ефективним є використання двостадійної технології приготування пінобетону. Це знизить кількість використаної води в приготуванні суміші, піноутворювача та покращить її характеристики. Рекомендоване значення коефіцієнту використання слід приймати рівною 0,8, в той час як фактичне значення його складає 0,55...0,78. Низьке значення даного коефіцієнту викликає зменшення міцності, твердіння, тужавлення. Тому вибір ефективних піноутворювачів, їх стабілізаторів та інших структуроутворюючих компонентів значно підвищить якість ніздрюватого неавтоклавного пінобетону.

Знизити усадку пінобетону можна за рахунок використання метакаоліну і гіпсу в поєднанні з мікрокремнеземом, суперпластифікатором і гіпсом. Ефект звичайних модифікаторів групи Ембеліт полягає в компенсації хімічної усадки при гідратації клінкерних мінералів.

Наступним варіантом оптимізації дисперсного складу ніздрюватого пінобетону забезпечується використанням мікрокремнезему високої ступені дисперсності[13]. Його вміст, що рекомендується для розчинів складає 5...6 %, про те збільшиться і водопотреба. При такій кількості мікрокремнезему його частинки обгортають частки портландцементу, розподіляються в міжчасточкових пустотах метакаоліну тим самим утворюють ультращільну мікроструктуру (наноstrukturу) матриці суміші та стабілізують суміш пінобетону.

Компенсувати підвищену водопотребу в суміші можна досягти використанням пластифікаторів.

Крім пластифікаторів також використовуються прискорювачі тужавлення та твердіння ніздрюватої суміші пінобетону, наприклад хлористий кальцій, хлористий натрій, сульфат натрію та інші. Але всі вони мають значні недоліки: корозія арматури, висоли, затримання тужавлення, тощо. Все це стримує використання пластифікаторів.

Комплексне використання пластифікаторів та прискорювачі тужавлення дають високу ефективність – відбувається підвищення зв'язності суміші, а

кількість пластифікатора можна збільшити до 40 %. Це дозволить знизити вміст води до 8 % і підвищить міцність цементної матриці.

3.2 Модифікування неавтоклавних бетонів прискорювачем твердіння

Модифікування неавтоклавних пінобетонів прискорювачем твердіння відбувалося в лабораторії кафедри промислового та цивільного будівництва ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ. Проводили підбір складу прискорювача твердіння, який вводили в портландцемент в кількості 0,05...3%. Досліджували вплив добавки на нормальну густину цементного розчину та терміни тужавлення.

В результаті проведення лабораторних досліджень було виявлено, що прискорювач твердіння в кількості 0,05...0,08 % від маси цементу не впливає на нормальну густину. При вмісті прискорювача 0,08...0,5 % нормальна густина збільшується майже в 1,5 рази, а при додаванні прискорювача 1...3 % нормальна густина збільшується до 3,5 разів. Результати випробовувань зведені в таблиці 3.1.

Таким чином раціональний вміст прискорювача твердіння згідно його впливу на показники цементного тіста знаходяться в межах 0,05...0,1 % від маси портландцементу.

Визначення оптимального складу з додаванням прискорювача твердіння для дрібнозернистого бетону також було проведено лабораторним методом. За основу був прийнятий дрібнозернистий цементно-піщаний бетон Ц:П = 1:4, з щільністю 2200 кг/м³, та розпливом конусу 28 см [6].

Таблиця 3.1 – Вплив кількості прискорювача твердіння на властивості цементного тіста

№ з/п	Вміст добавки прискорювача твердіння, %	Терміни тужавлення, г, хв.		Показник нормальної густини, %
		початок	закінчення	
1	0	4,00	8,30	24,75
2	0,05	3,50	8,10	24,75
3	0,08	3,40	8,0	24,75
4	0,1	3,20	6,30	25,25
5	0,3	1,50	5,10	25,75
6	0,5	1,10	4,30	26,0
7	1	0,50	2,10	27,0
8	2	0,20	0,45	28,0
9	3	0,15	0,25	28,25

Випробування показали, що оптимальною кількістю прискорювача твердіння є 0,07...0,09 % маси цементу, при цьому відбувається зниження водоцементного співвідношення на 15...20 % та збільшується міцність до 20 %. Усі отримані значення зведені в таблиці 3.2.

Додавання в суміш бетону раціональної кількості прискорювачів твердіння та пластифікатора дозволяє підвищити міцність бетону в значній мірі та прискорити приріст міцності та твердіння.

Висока міцність зазначених бетонів залежить з пониженим значенням В/Ц, а також зі зменшенням розшарувань, водовідділення та інших деструктивних процесів, які виникають під час укладення та ущільнення бетонної суміші.

Таблиця 3.2 – Залежність впливу прискорювача твердіння на міцність бетону

№ з/п	Показники бетонної суміші						Міцність бетону, МПа	
	Склад, $\frac{\text{кг/м}^3}{\%}$				В/Ц	РК, см	В 7 діб	В 28 діб
	Ц	В	Пласт. 1	Приск. 1				
1	385	225	-	-	0,58	27	24	32,5
2	385	176	$\frac{2,31}{0,6}$	-	0,46	28	35,1	43,1
3	385	181	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{1,155}{0,03}$	0,47	27	44,1	51,7
4	385	188	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{7,7}{2,0}$	0,49	27	38,1	45,9
5	385	192	$\frac{2,31}{0,6}$	$\frac{11,55}{3,0}$	0,5	28	37,3	43,3

3.3 Модифікування неавтоклавних бетонів тонкодисперсним шлаком

Модифікування неавтоклавних пінобетонів тонкодисперсним шлаком відбувалося в лабораторії кафедри промислового та цивільного будівництва ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ. Проводили підбір складу згідно таблиці 3.3. За еталонний зразок був прийнятий склад №1 з розпливом конусу 28 см. Витрати тонкодисперсного шлаку становили 0...60%.

Перед випробуваннями стояло дві задачі – визначення його кількості та дисперсності, адже саме від дисперсності залежить рівномірність розподілення часток в пустотах портландцементів.

Таблиця 3.3 – Залежність складу бетону на міцність бетону

№ з/п	Характеристика бетонної суміші			Міцність бетону, МПа		
	Склад, $\frac{\text{кг/м}^3}{\%}$			В/Ц	В 7 діб	В 28 діб
	Ц	В	Шлак			
1	385/100	225/100	-	0,580	23,4	32,5
2	308/80	218/97	77/20	0,570	24,1	36,6
3	270/70	214/95	115/30	0,560	25,6	40,8
4	231/60	212/94	154/40	0,550	28,8	44,3
5	154/40	212/94	231/60	0,550	22,4	32,8

З таблиці видно, що наявність шлаку в суміші в кількості від 0 до 60% знизило водоцементне співвідношення та одночасно збільшило міцність.

В той же час, міцність бетону зі вмістом модифікатора тонкодисперсним шлаком, який твердіє в нормальних умовах, перевищила міцність контрольного зразка.

В таблиці 3.4 представлено результати досліджень ніздроватих бетонів, в склад яких входили модифікатори тонкадисперсного шлаку, суперпластифікатора та прискорювача твердіння одночасно.

Таблиця 3.4 – Міцність бетону з добавками шлаку, прискорювача твердіння та суперпластифікатора

№ з/п	Характеристика бетонної суміші					Межа міцності, МПа/%		
	Вміст компонентів, $\frac{\text{кг/м}^3}{\%}$					В/Ц	Після твердіння, діб	
	Ц	В	Шлак	Пластиф.	Приск. тв.		7	28
1	385/100	225/100	-	-	-	0,58	24/72	33/100
2	385/100	176/78	-	2/0,5	-	0,46	30/94	44/133
3	385/100	176/78	-	2/0,5	0,3/0,07	0,46	48/148	63/184
4	308/80	165/73	77/20	2/0,5	0,3/0,07	0,43	52/158	68/210
5	270/70	162/72	115/30	2/0,5	0,3/0,07	0,42	58/177	74/227
6	231/60	162/72	155/40	2/0,5	0,3/0,07	0,42	55/170	73/225
7	154/40	162/72	231/60	2/0,5	0,3/0,07	0,42	54/168	72/224

В таких сумішах водоцементне співвідношення не змінилося, а при

додаванні тонкодисперсного шлаку –знизилося на декілька відсотків.

Таким чином, можна зробити висновок, що сумісне використання тонкодисперсного шлаку, суперпластифікатора та прискорювача твердіння підвищує міцність бетону незалежно від умов твердіння.

Підсумовуючи зазначене вище, вміст тонкодисперсного шлаку складає 30-60%, яке дає змогу використовувати його замість цементу в бетоні без втрати його міцності. Першочерговим в оптимізації раціональних параметрів дисперсного складу є використання тонкодисперсного шлаку в складі багатокомпонентного в'язучого. Розподілення часток тонкодисперсного доменного шлаку гранульованого в пустотах між частинками більш грубодисперсної фракції забезпечить ущільнення будови цементного каменю. З цієї причини можна створити стиснуті умови гідратації цементу: міцність збільшиться за рахунок зменшення товщини прошарок цементного каменю. В цьому випадку можна знизити витрату портландцементу на 10...20% на 1 м³ бетону, а раціональне використання суперпластифікатора та прискорювача твердіння складе 0,6...0,07% маси портландцементу відповідно.

3.4 Модифікування неавтоклавних бетонів мікрокремнеземом та модифікатором

Випробування з комплексним модифікатором (КМ) у вигляді мікрокремнезему додавались до ніздрюватої суміші в кількості 10...30% від маси портландцементу. Лабораторні випробування проводились аналогічно попередньому параграфу. Результати випробувань представлені в таблиці 3.5.

Результати досліджень показали [7], що при використанні 10, 20 та 30% КМ, водоцементне співвідношення знизилось на 58, 52 та 41% відповідно. В той же час аналіз міцностних показників показав: на початковому етапі (у віці 1 доби) міцність бетону збільшується на 70...120%; у віці 28 діб міцність

бетону з модифікуючою добавкою збільшилась у 2,3...2,8 рази. Найоптимальнішим вмістом добавки КМ виходячи з досліджень можна вважати 20% та водоцементним співвідношенням 0,38.

Таблиця 3.5 – Міцність бетону з добавкою мікрокремнезему

№ з/п	Характеристика бетонної суміші				Межа міцності, МПа/%	
	Вміст компонентів, $\frac{\text{кг/м}^3}{\%}$			В/Ц	Після твердіння, діб	
	Ц	В	КМ		7	28
1	385/100	225/100	-	0,58	24/72	30/100
2	345/90	145/64	39/10	0,37	65/200	80/250
3	308/80	146/65	80/20	0,38	70/215	90/275
4	265/70	157/70	110/30	0,40	50/160	75/230

Таким чином, було встановлено, що в суміші раціонально використовувати 20% мікрокремнезему, яке спроможне збільшити міцність ніздрюватого бетону майже у 3 рази. Ще однією з переваг було визначено, що економії цементу може складати до 75 кг/м³.

3.5 Оцінка раціональних параметрів компонентів неавтоклавних бетонів

Оцінку властивостей неавтоклавних бетонів та оцінку властивостей проводили згідно результатів випробувань, які були описані в попередніх розділах, результатами яких було визначення оптимальний вміст компонентів та їх вплив на міцнісні характеристики бетону. Наступні випробування провели для визначення та підбору складу оптимального вмісту компонентів.

Суміш готували з портландцементу, мікрокремнезему, тонкодисперсного доменного шлаку, метакаоліну, суперпластифікатора,

прискорювача твердіння та піноутворювача.

Приготування ніздрюватого пінобетону включало наступні технологічні операції: приготування піни, введення компонентів, перемішування протягом 2 хвилин, наповнення форм та наступне твердіння протягом 28 діб [9].

Властивості отриманого пінобетону (табл. 3.6) оцінювали після 28 діб твердіння в нормальних умовах. Перший склад було прийнято за контрольний. Другий зразок ввели тонкодисперсний шлак в кількості 40% кількості портландцементу, що знизило водотвердне співвідношення на 5% та збільшило міцність зразків пінобетону на 25...30%, а також відбулось зниження деформації усадки та коефіцієнту теплопровідності.

Таблиця 3.6 – Властивості модифікованих пінобетонів

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

	тонкодисперсн. шлаку(30 мас.%), приск. тверд. (0,07 мас.%), комплексн. модифікатор (8 мас.%)			
--	--	--	--	--

Аналіз результатів проведених дослідів показав, що оптимальним складом для ніздрюватого пінобетону є зразок 8.

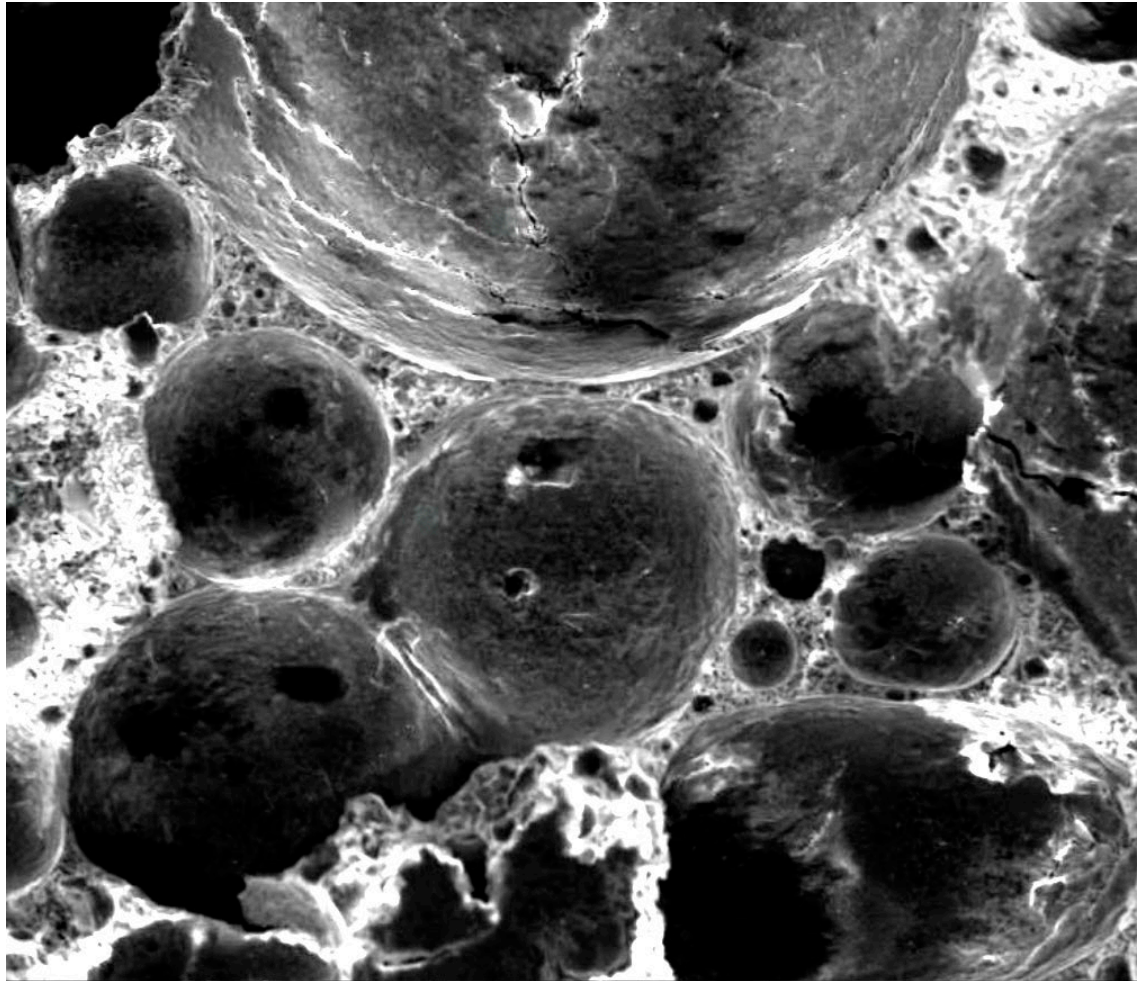


Рисунок 3.1 – Макроструктура модифікованого пінобетону

Зразок зі складу 8 містить тонкодисперсний шлак 30 мас.%, портландцемент, комплексний модифікатор 8 мас.%, прискорювач твердіння 0,07 мас.%, вода. Цей склад має найліпші показники властивостей відносно контрольного складу першого зразка. Наприклад, міцність 8 зразка збільшилась у 2 рази у віці 28 діб.

Відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б В.2.7-216:2009 Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості, визначали відповідні показники за зразках 10x10x10 см. Отримані зразки у віці 28 діб опускали у

воду на три доби. Потім проводили оцінку лінійних деформацій, результати представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Показники теплопровідності та усадки пінобетону

№ з/п	Склад бетонної суміші, мас.%	Щільн. бетон. суміші, кг/м ³	Коеф. теплопровідності в сухому стані $\frac{\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{С})}{\%}$	Усадка, $\frac{\text{мм}/\text{м}}{\%}$
1	Контрольний склад	395	0,1/100	
2	Склад з вмістом тонкодисперсного шлаку 40 мас.%	385	0,077/77	2,95/100
3	Склад з вмістом суперпластифікатора (0,6 мас.%), прискорювач твердіння (0,07 мас.%)	405	0,103/103	2,65/90
4	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%)	380	0,075/75	0,95/31,9
5	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(30 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%)	390	0,0757/75,7	1,5/50
6	Склад з вмістом мікрокремнезему (8 мас.%), тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), суперпластиф.(0,6 мас.%), приск. тверд. (0,07 мас.%)	385	0,0745/74,5	0,72/24,8
7	Склад з вмістом тонкодисперсн. шлаку(40 мас.%), метакаоліну (20 мас.%)	385	0,78/78	0,74/25
8	Склад з вмістом тонкодисперсн. шлаку(30 мас.%), приск. тверд. (0,07 мас.%), комплексн. модифікатор (8 мас.%)	380	0,0735/73,5	0,69/23,5

Як видно з таблиці, у зразка під номером 8 теплопровідність знижується у сухому стані, також усадка зменшується майже в 4 рази відносно контрольного зразка після твердіння в нормальних безавтоклавних умовах.

Для покращення структури та властивостей пінобетону раціонально використовувати доменного гранульованого шлаку, мікрокремнезему,

метакаоліну, суперпластифікатора. В даному випадку використання зазначених компонентів значимо покращують його структуру та властивості.

Використання в складі модифікатора попереджують розшарування, прискорювач твердіння забезпечує потрібну товщу дифузного шару, більшу зв'язність цементної системи, знижений вміст води. Крім того, дія комплексного модифікатора підвищує міцність цементного каменю. Цьому сприяє і утворення еtringіту та системи розширюючого ефекту. Цей ефект утворюється взаємодією гіпсу, метакаоліну та води. Всі ці фактори забезпечують високі будівельно-технічні властивості та низькі деформаційні усадки.

Вищезазначені результати забезпечують можливість масового використання модифікованого пінобетону для будівництва огорожуючих конструкцій [10].

В ході випробувань було визначено, що додавання мікрокремнезему до піни дозволило підвищити її стабільність та реологічні властивості. Після додавання та перемішування всіх компонентів отримуємо однорідну гомогенну суміш з мілкими пухирцями повітря, яка здатна швидко тужавіти та набирати міцність з більш тонкими, щільними та міцними перетинками осередків бетону.

4 ПОКРАЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕАВТОКЛАВНИХ БЕТОНІВ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ

4.1 Структура модифікованого неавтоклавного бетону раціонального складу

Було проведено аналіз мікроструктури зразків пінобетону контрольного складу, а також модифікованих зразків зі складом №2 та №8. Результати показано на рисунках 4.1 – 4.3.

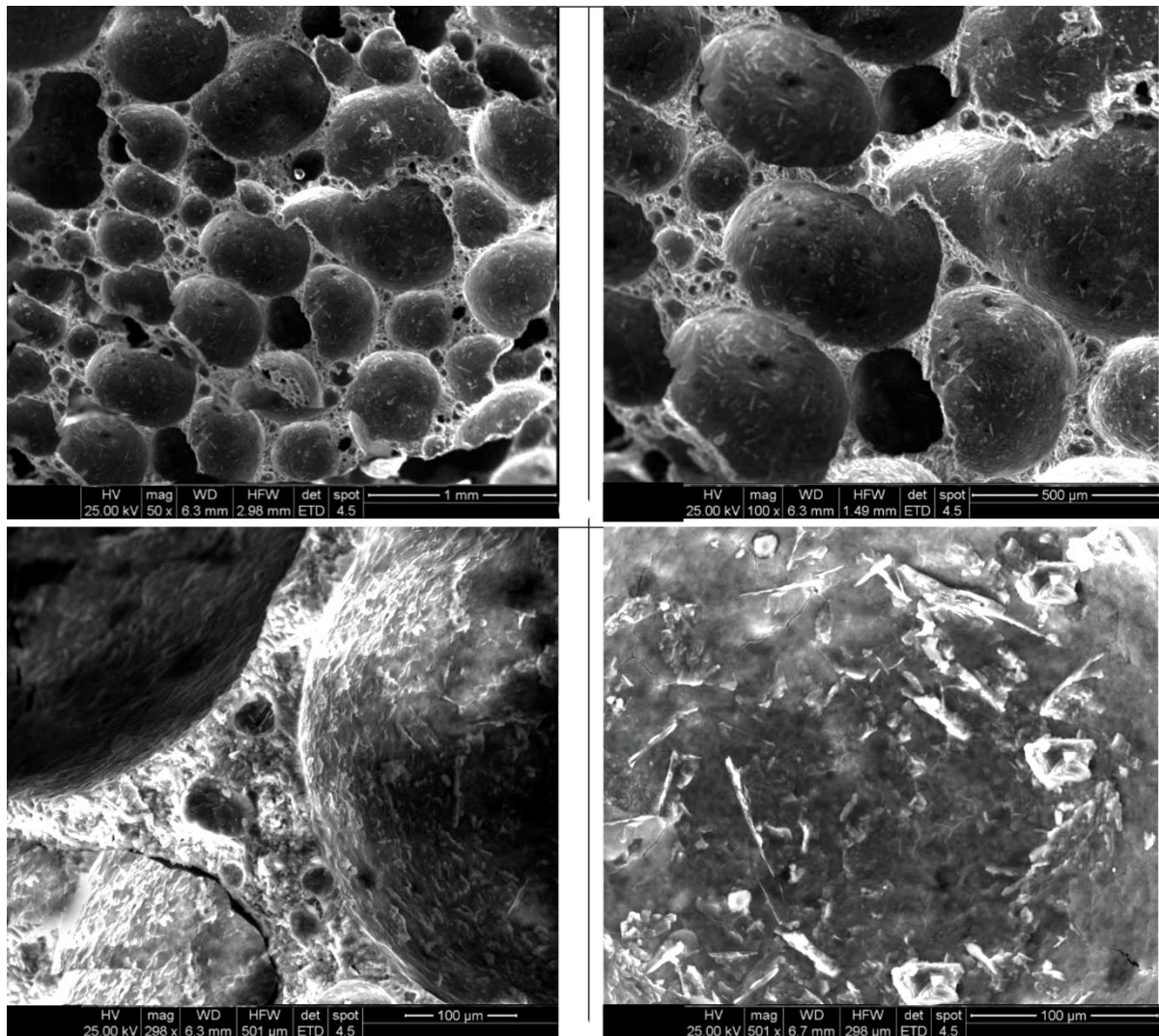


Рисунок 4.1 – Структура пінобетону контрольного зразка складу №1 нормального твердіння у віці 28 діб

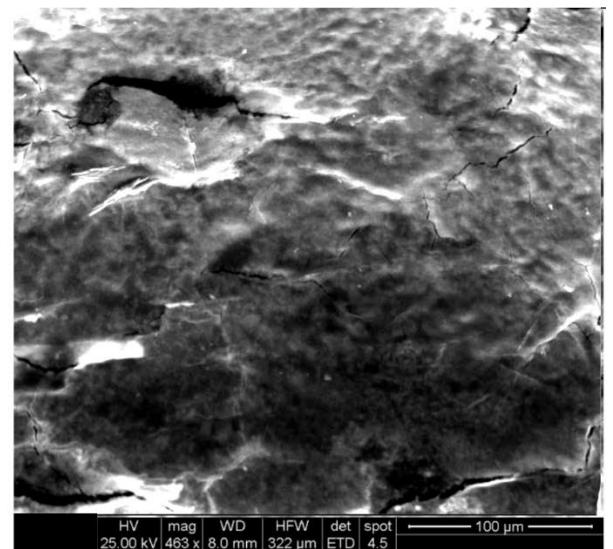
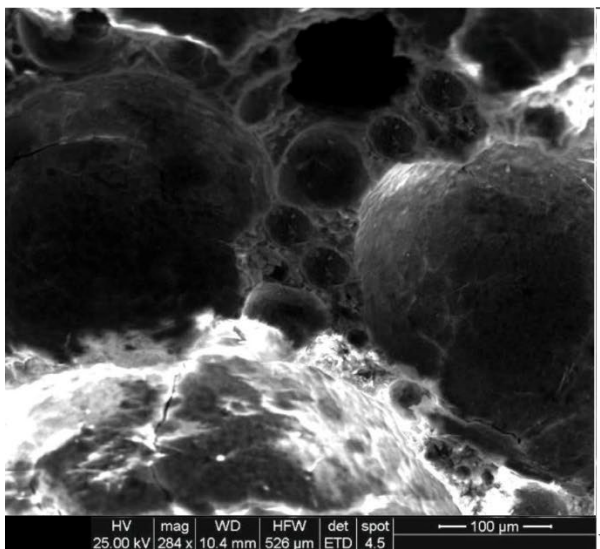
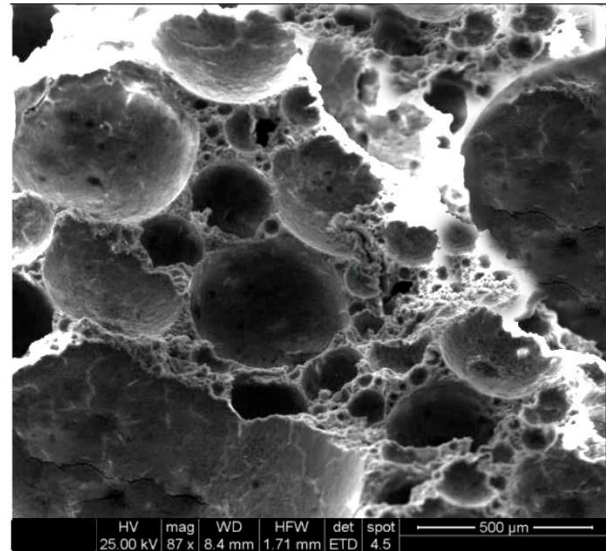
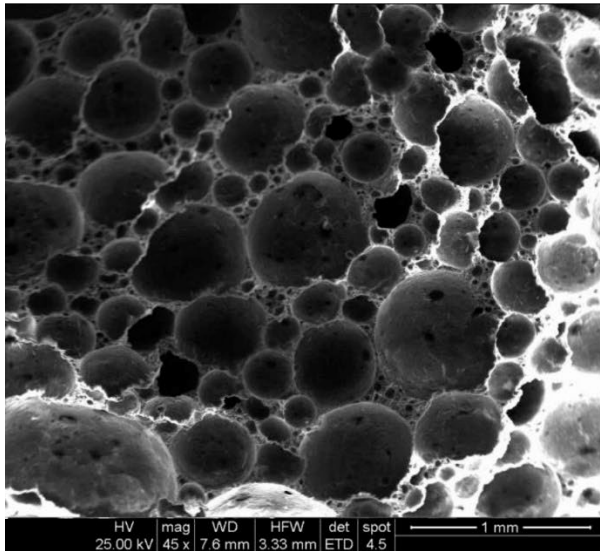
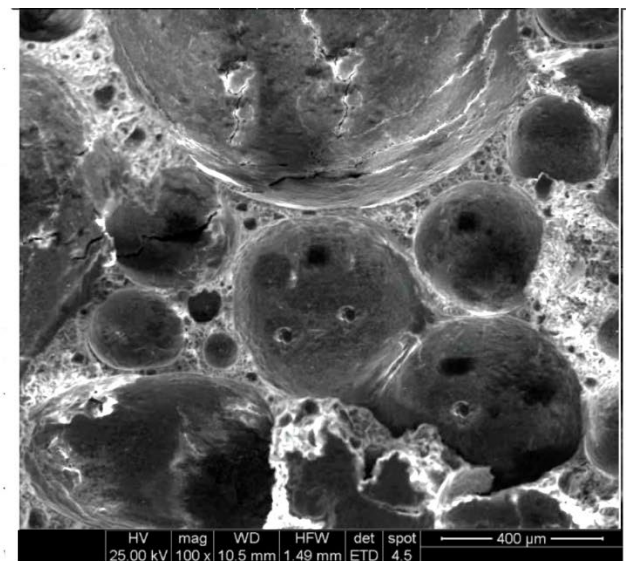
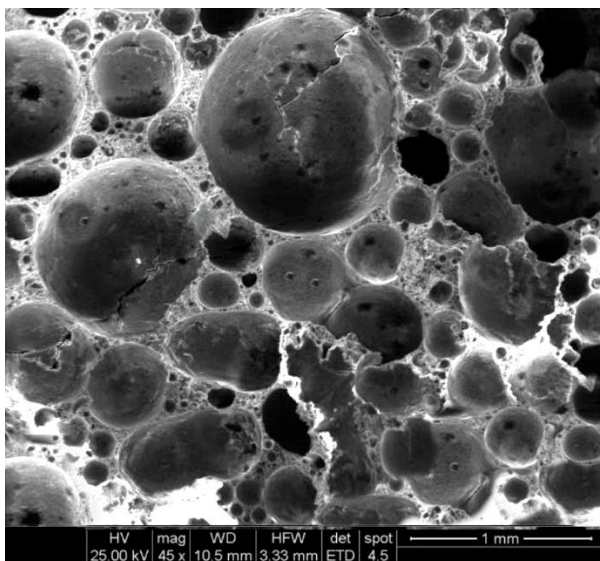


Рисунок 4.2 – Структура пінобетону контрольного зразка складу №2 з вмістом тонкодисперсного шлаку у віці 28 діб



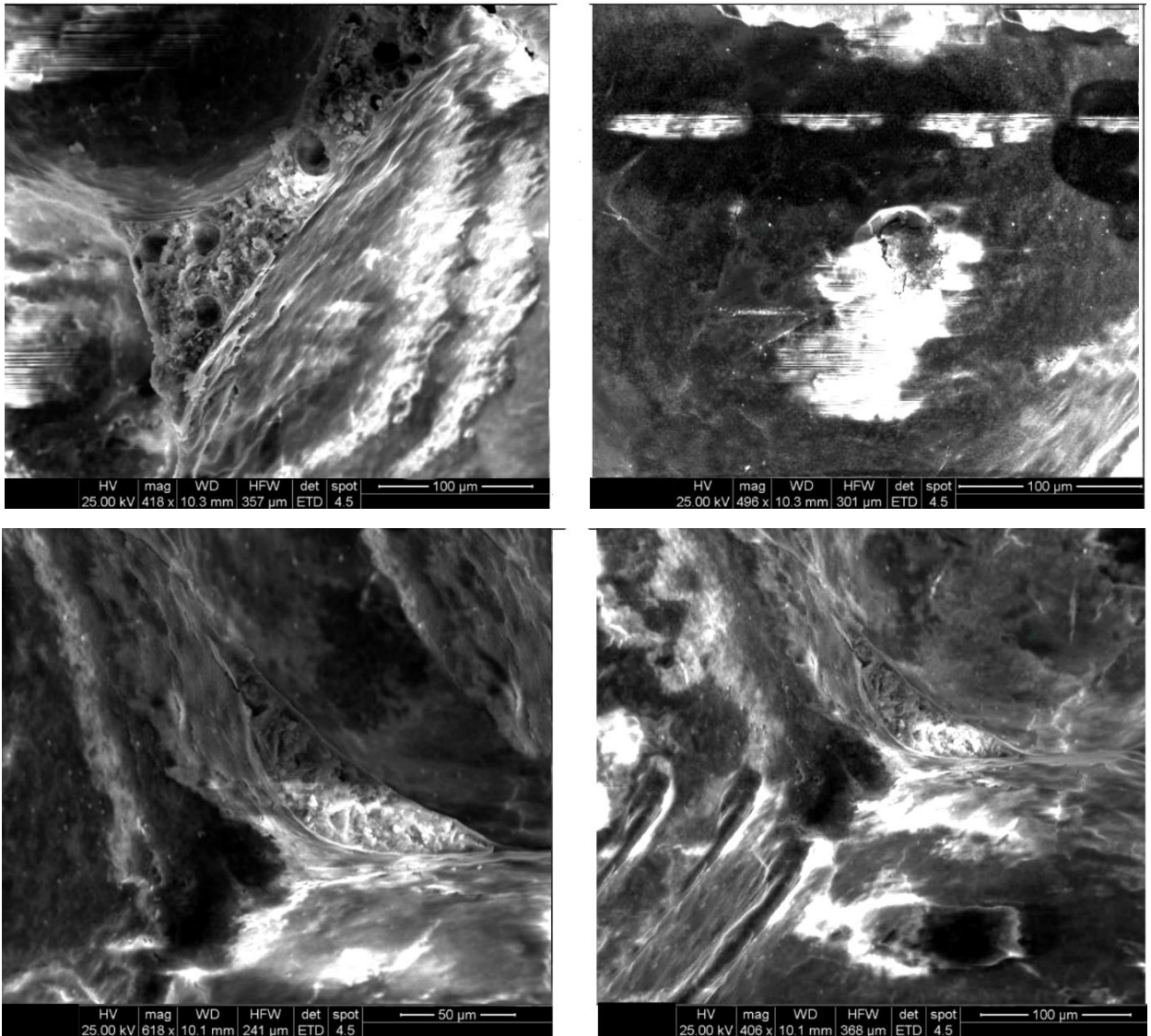


Рисунок 4.3 - Структура пінобетону контрольного зразка складу №8 з вмістом тонкодисперсного шлаку, комплексного модифікатора та прискорювачем твердіння у віці 28 діб

Після аналізу мікро- та макроструктури зразків пінобетонів контрольного зразка складу №1, зразка зі складом №2 та вмістом тонкодисперсного шлаку, зразка зі складом №8 зі вмістом тонкодисперсного шлаку, комплексного модифікатора та прискорювачем твердіння дозволив зробити наступні висновки:

- структура міжпорової перегородки стає щільнішою при введенні в склад тонкодисперсного шлаку на відміну від контрольного зразка;
- структура міжпорової перегородки стає ще щільнішою при

введенні в склад тонкодисперсного шлаку, комплексного модифікатору на відміну від контрольного зразка;

- структура зразка стає однорідною з введенням усіх добавок зразка складу №8;

- отримали однорідну пористу структуру з рівномірно розподіленими повітряними осередками (порами) різних діаметрів 20...200 мкм. Розміри таких осередків контрольного зразка №1 30...625 мкм, що доказало зниження теплопровідності у зразка №8;

- структура міжпорових перегородок стає більш щільною та міцнішою за рахунок додавання до складу мікрокремнезему, метакаоліну та тонкодисперсного шлаку та утворення гідратних фаз цементного каменю. Ці дисперсні компоненти рівномірно розподіляються по об'єму суміші пінобетону та роблять її оптимальною завдяки трьохрівневою модифікації структури.

4.2 Технічні властивості неавтоклавного бетону раціонального складу

Модифікування сумішей пінобетону було здійснено за рахунок додавання мінеральних та хімічних добавок. В якості хімічного модифікатора використали суперпластифікатор С-4 в кількості 0,6%. Одночасно додавали хімічний модифікатор, а саме прискорювач твердіння в кількості 0,07% від маси портландцементу.

В якості мінеральних модифікаторів використали тонкодисперсний шлак з питомою поверхнею часток на 140...150 м²/кг більшою за відповідний показник портландцементу.

В якості модифікатору використовувався моифікатор МБ-Б-III-2 з питомою поверхнею 1500 м²/кг, що майже в п'ять разів перевищувала

дисперсність портландцементу. Завдяки цьому пустотність суміші зменшилась на 3...4%.

Добавка мікрокремнезему дисперсністю 20000...30000 м²/кг огортають більш грубі часточки портландцементу, тонкодисперсного шлаку та модифікатора, тим самим утворюючи самоорганізовану наноструктуру цементного каменю. Це дозволило знизити міжчасточкову пустотність на 11%.

Визначали комплексні показники пінобетону різноманітного складу з умовою однаковою щільністю. Результати порівнянь цих характеристик представлені в таблиці 4.1. Було приготовано 8 зразків з різними складами та визначали міцність у віці 28 діб нормального твердіння. Також визначили теплопровідність та усадка матеріалу [12]. Зразок зі складом №1 прийняли за контрольний.

Таблиця 4.1 – Технічні властивості неавтоклавного пінобетону

№ з/п	Склад суміші, мас.%	Межа міцності при стиску у віці 28 діб, МПа/%	Тепло-провідність $\frac{Вт}{(м \cdot С)}$ %	Усадка у віці 210 діб, мм/м/%
1	Контрольний склад	1,61/100	0,1/100	2,9/100
2	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 40 мас.%	2,1/129	0,079/79	2,68/89,5
8	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 30 мас.%, комплексного модифікатора 8 мас.%, прискорювача твердіння 0,07%	3,35/208	0,074/74,5	0,67/23

Дослідження показали, що при використанні шлаку та високодисперсних аморфних метаксаолінів та мікрокремнеземів

теплопровідність знизилась. Також вплив на зниження теплопровідності оказало формування однорідної пористої структури а рівномірно розподіленими зменшеними порами розміром 20...200 мкм.

Вміст модифікуючих компонентів (тонкоисперсний шлак, комплексний модифікатор, прискорювач твердіння) забезпечить набір міцності у 2 рази за рахунок створення міцних міжпорових перегородок, які складаються з гідросилікатів кальцію, еtringіту та інших. Це забезпечується раціональним дисперсним складом часток цементу, мікрокремнезему, метакаоліну, суперпластифікатору та прискорювача твердіння. В такому випадку товщина міжпорової перегородки склала 23,2...24,9 мкм.

Для зразків складу №2 товщина міжпорової перегородки склала 30,1...32,7 мкм, в той час як товщина перегородки зразка контрольного складу склала 40,1...43,8 мкм.

Додавання модифікаторів складу 8 в період формування структури та набору міцності пінобетону дозволило знизити усадку суміші у 5 разів в порівнянні з контрольним зразком.

Використання модифікаторів дозволило отримати низькі усадку та теплопровідність, підвищити міцність.

4.3 Гідрофізичні властивості неавтоклавного бетону раціонального складу

Гідрофізичні властивості такі як водопоглинання, водостійкість та вологість пінобетону мають велике значення для експлуатації будівель та споруд.

Для визначення даних показників були проведені відповідні дослідження [6] та результати занесені в таблицю 4.2.

На гідрофізичні властивості та міцності бетону в більшій мірі впливає

значне ущільнення та зміцнення перегородок осередків (пузирків) повітря.

Таблиця 4.2 – Гідрофізичні властивості неавтоклавного пінобетону

№ з. п.	Склад суміші, мас.%	Водопоглинання у віці 28 діб, %	Коефіцієнт розм'якшення у віці 28 діб	Вологість за масою, % у віці діб				
				28	56	90	150	180
1	Контрольний склад	53/ 100	0,75/ 100	20,5/ 100	14,5/ 100	10,5/ 100	8/ 100	7,5/ 100
2	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 40 мас.%	38/ 71	0,8/ 108	15,5/ 75	10/ 70	9,5/ 90	7,5/ 90	6,5/ 85
8	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 30 мас.%, комплексного модифікатора 8 мас.%, прискорювача твердіння 0,07%	25,5/ 49	0,85/ 112	15/ 70	9/ 63	7,5/ 71	6/ 75	5,5/ 70

Виходячи з проведених досліджень, встановлено, що у зразка зі складом №8 водопоглинання знизилось у 2 рази, коефіцієнт розм'якшення теж змінився – з 0,75 на 0,84. Для зразків складу №2 та №8 коефіцієнт розм'якшення перевищують значення, встановлені нормативами для стінових несучих конструкцій, в той же час, цей коефіцієнт для зразка складу №1 не відповідає вимогам.

Як відомо, для неавтоклавного пінобетону з маркою за середньою щільністю D400 деформація усадки не нормується. Однак, для підвищення надійності огорожуючих конструкцій була визначена усадка такого бетону на протязі 180 діб.

Вивчення деформацій усадки вивчалася за ДСТУ Б В.2.7-216:2009 Методи визначення деформацій усадки та повзучості на зразках 10x10x10 см. Перед випробуванням, зразки зберігались у воді 3 доби. Зберігання та випробування зразків відбувалося при температурі $20 \pm 2^\circ$ та вологістю повітря $60 \pm 5\%$. Результати випробувань представлені в таблиці 4.3 для зразків,

твердіння яких було в нормальних умовах для зразків складу №1, 2, 8.

Таблиця 4.3 – Показники деформації усадки в часі зразків пінобетону

№ з. п.	Склад суміші, мас.%	Деформація усадки, мм/м / діб								
		3	14	28	56	84	120	140	156	180
1	Контрольний склад	0,12	0,5	0,8/100	1,45	1,95	2,5/100	2,85	2,95	2,98/100
2	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 40 мас.%	0,11	0,4	0,7/86	1,25	1,65	2,4/95	2,65	2,64	2,64/89,5
8	Склад суміші з вмістом тонкодисперсного шлаку 30 мас.%, комплексного модифікатора 8 мас.%, прискорювача твердіння 0,07%	0,065	0,17	0,35/45	0,5	0,625	0,66/26	0,65	0,68	0,68/23

Аналізуючи результати таблиці 4.3 виявлено, що стабілізація складів зразків пінобетонів стабілізувалась за 140 діб та не змінюється після 156 діб. Як видно в таблиці, у модифікованого зразка складу №8 усадка зменшилась в порівнянні з контрольним зразком складу №1.

Зниження водопоглинання, коефіцієнту розм'якшення дозволить значно підвищити надійність огорожуючих конструкцій та стабілізацію теплотехнічних показників на протязі всієї експлуатації.

Підводячи підсумки, після проведених теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено, що додавання до складу тонкодисперсного доменного шлаку в аморфному та кристалічному стані, а також метакаоліну з мікрокремнеземом значно знижують теплопровідність пінобетону. Це відбувається також за рахунок формування тонкодисперсної ніздрюватої структури та рівномірно розподіленими пазирьками повітря Ø20...200 мкм. Вийшло отримати розмір осередків (пор) контрольного складу

– 30...625 мкм.

Структурні дослідження показали, що пінобетон, який модифікований тонкодисперсним шлаком, комплексним модифікатором, суперпластифікатором та прискорювачем твердіння забезпечує формування щільної структури міжпорових перегородок, які складаються з тоберморитоподібних гідросилікатних фаз кальцію, еtringіту, які знижують деструктивні процеси на початковій стадії набору міцності цементного каменю. Товщина перегородок зразків контрольного складу – 40...43 мкм, а модифікованого ніздрюватого пінобетону – 23...25 мкм, тобто параметри структури осередків зменшилась у 1,5...3 рази, товщина перегородок зменшилась у 2 рази та спостерігалось ущільнення структури, що в цілому забезпечило підвищення міцності більше у 2 рази в порівнянні з параметрами контрольного зразка.

Висока міцність модифікованого ніздрюватого пінобетону з раціонально підібраним дисперсним складом та вмістом прискорювача твердіння забезпечує розширюючий ефект при твердінні на початковій стадії тужавлення та значно знижує усадку в 4...5 разів в порівнянні з контрольним зразком. Деформація усадки пінобетону з модифікаторами стабілізується на 140 добу, а на 156 – стає незмінною.

Ніздрюватий бетон автоклавного твердіння має нижчу морозостійкість та тріщиностійкість, малу усадку та швидко набирає міцність. Про те суттєві недоліки такі, як складність та дороговизна автоклавного обладнання здатні зробити перспективним напрямком використання неавтоклавних технологій [14].

Аналізуючі деякі виробництва на території України, можна зробити висновок, що виробництво неавтоклавного ніздрюватого бетону значно дешевше при тих самих показниках якості матеріалу [8].

ВИСНОВКИ

Вході проведення дослідження було проаналізовано наукові та практичні рішення створення раціонального рецептурного складу неавтоклавного модифікованого пінобетону. Охарактеризовано наявність різноманітних добавок в складі бетону та їх вплив на властивості.

Проаналізовано використання хімічних і мінеральних модифікаторів різноманітної дисперсності. Це дозволило отримати більш низькі значення усадки ніздрюватої суміші, зменшило пустотність між твердими часточками та отримати більш однорідну структуру.

Виявлено позитивний вплив використання мікрокремнезему в піні з подальшим додаванням прискорювача твердіння та перемішуванням до гомогенного стану маси. Це дозволило отримати пінобетон з тонкими, щільними та міцними перегородками між осередками повітря.

Встановлено, що додавання в дисперсний склад пінобетону тонкодисперсного доменного шлаку змішаного стану значно зменшить коефіцієнт теплопровідності. Крім того доменний шлак дозволив отримати більш рівномірно розподілені осередки повітря в масі.

Теоретичними дослідженнями показано, що висока міцність модифікованого пінобетону, а також раціональний дисперсний склад та наявність прискорювача твердіння у початковий період формування структури пінобетонної маси забезпечує значне зниження усадки (у 4...5 разів) щодо контрольного складу. Абсолютні значення усадки модифікованого пінобетону знаходяться на рівні 0,64...0,65 мм/м або на рівні вимог до автоклавного газобетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковальчук О.Ю., Бойко О.В, Зозулинець В.В. Технологія виготовлення і застосування ніздрюватих бетонів : Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт. Київ : КНУБА, 2021. 13 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-29]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 41 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-164:2008. Будівельні матеріали. Вироби з ніздрюватих бетонів теплоізоляційні. Технічні умови. [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 11 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-195:2013. Конструкції стін із блоків з ніздрюватого бетону автоклавного тверднення. Загальні технічні умови. [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 64 с.
5. ДСТУ Б А.1.1-49-94. Система стандартизації та нормування в будівництві. Матеріали будівельні. Методи фізико-хімічних досліджень. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 1994. 27 с.
6. ДСТУ Б EN ISO 12572:2011 Гігротермічні характеристики будівельних матеріалів та виробів. Визначення паропроникності (EN ISO 12572: 2001, IDT). [Чинний від 2013-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 42 с.
7. Ніздрюватий бетон - можливості та перспективи ефективного стінового матеріалу. URL: <http://www.osobnyak.com.ua/spip.php?article362> (дата звернення: 26.09.2023).
8. Пашинський В.А., Настоящий В.А., Дарієнко В.В., Товмаченко Є.О. Практичний досвід використання збірного і монолітного неавтоклавного пінобетону при зведенні енергоефективних будівель ТОВ "Будспектр". *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2016.

Випуск 65. С. 132–136.

9. Пашинський В.А., Карпушин С.О. Методика вибору оптимальної марки ніздрюватого бетону для стін. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. 66. С. 93–98.

10. Сердюк В.Р., Христин О.В., Постовий П.В. Ніздрюватий бетон полі функціонального призначення. *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник*. Вінниця, 2013. №2(15). С. 18-22.

11. Сердюк В.Р., Христин О.В. Ефективні заповнювачі для ніздрюватих бетонів. *Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник*. Вінниця, 2013. №1(13). С. 28-32.

12. Луцюк, І.В., Якимечко, Я.Б., Чеканський, Б.Б. Дослідження впливу виду вапна на властивості композиційного в'язучого за різних умов тверднення. *Збірник наукових праць ПАТ "УкрНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного"*. Львів, 2017. №17. С. 116-124.

13. Чеканський Б.Б., Луцюк І.В. Оптимізація складу багатокомпонентного композиційного в'язучого. *Вісник НУ ЛП. Збірник наукових праць*. Львів, 2018. №18, С. 73-78.

14. Demchyna, B., L. Vozniuk, and M. Surmai. "Scientific foundations of solving engineering tasks and problems." 2021. Vol.19, No 1. P. 98-108.

15. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. Boston, 2021. 616 p.

16. Sokolovskaya, O. "Scientific foundations of modern engineering/Sokolovskaya O., Ovsiannykova L. Stetsiuk V., etc–International Science Group." Boston, 2020. 528 p.

17. Hnes, L., S. Kynytskyi, and S. Medvid. "Theoretical aspects of modern engineering." International Science Group. Boston, 2020. 356 p.

18. Іванов, О. А. Композиційний жаростійкий бетон з використанням відходів виробництва : Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. 328 с.