

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

Визначення механічних характеристик лужно-активованого матеріалу на основі попелу виносу/
Investigation of mechanical characteristics of alkali-activated material based on fly ash

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМм – 21
Ваврисевич Богдан Михайлович

_____ (підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Мельничук Микола Дмитрович

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«03» 17 2024р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола Дмитрович

Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

«03» 12 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Вавришук Богдан Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Визначення механічних характеристик
цукро-активованого поліетилену на шові лопату-
вишосу

керівник роботи Мельничук М.Д. д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «30» грудня 2023 року № 449/01-22

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«03» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи полі-вишосу, цукри різні

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

Вступ; 1. Аналіз сучасних досліджень геологічних
матеріалів. 2. Методи та методи досліджень;
3. Аналіз результатів досліджень. Висновки
4. Висновки

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

слайд 1: Мета і завдання дослідження; слайд 2: Хімічна реакція та
схема процесу формування геологічного матеріалу; слайд 3: основні
форми геологічного матеріалу; слайд 4: Хімічний склад; фізичні властивості
полі-вишосу; слайд 5: властивості; слайд 6: вплив температури на властивості
матеріалу; слайд 7: вплив температури на властивості матеріалу; слайд 8: вплив температури на властивості матеріалу;
слайд 9: вплив температури на властивості матеріалу; слайд 10: вплив температури на властивості матеріалу;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3	Мельничук Н.Д.	03.09.2024	03.09.2024
Н. контроль	Мисковець С.В.	03.09.2024	03.09.2024

7. Дата видачі завдання «03» 09 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вступ, опису умовних розмірних геологічних мереж; слої 1; 2; 3	03.10.2024	Виконано
2.	Матеріал та методи розміщення; слої 4; 5;	24.10.2024	Виконано
3.	Аналіз результатів розміщення слої 6, 7, 8;	19.11.2024	Виконано
5.	Висновки, сліди 9, 10	03.12.2024	Виконано

Здобувач вищої освіти

[Redacted Signature] (підпис)

Мисковець С.В. (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

[Redacted Signature] (підпис)

Мельничук Н.Д. (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ваврисевич Б. М. Визначення механічних характеристик лужно-активованого матеріалу на основі попелу виносу

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається з таких розділів аналіз сучасних досліджень геополімерних матеріалів, матеріали та методи дослідження, аналіз результатів дослідження, висновки.

В даній роботі досліджували вплив на геополімербетон на основі золи-виносу таких параметрів, як співвідношення лужного розчину до в'язучого, умови тверднення на міцність на стиск.

Проводилися дослідження геополімерного бетону за різних умов: за співвідношення лужного розчину до в'язучого за масою в межах 0,35, 0,40 та 0,45; при твердненні на відкритому повітрі та в печі (60°C та 100°C); визначалася міцність на стиск геополімербетону на основі золи виносу у різному віці (7 днів, 14 днів і 28 днів) .

Ключові слова: геополімер, геополімерний бетон, зола-виносу, лужно-активований матеріал.

MP 0224.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Визначення механічних характеристик лужно-активованого матеріалу на основі попелу виносу	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Ваврисевич	[Redacted]	03.12				
Перевірів		Мельничук	[Redacted]	03.12			3	49
Н. Контр		Мисковець	[Redacted]	03.12				
Затв.		Мельничук	[Redacted]	03.12				

Луцький НТУ, каф. М,
гр. ПМм-21

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1 Структура та властивості геополімерних матеріалів	7
1.2 Застосування геополімерів.....	11
1.3 Компоненти геополімеру.....	12
1.4 Властивості геополімерного бетону	14
1.5 Мета дослідження	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Характеристика вихідних матеріалів.....	28
2.2 Методика виготовлення геополімеру.....	33
2.3 Методики проведення експериментів	36
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	38
3.1 Результати випробувань на стиск.....	38
3.2 Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на властивості геополімерного бетону.....	41
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ	

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Портландцемент є основним будівельним матеріалом у всьому світі. Цементна промисловість є одним із джерел викидів вуглекислого газу, що негативно впливає на екосистему як і вирубка лісів та спалювання викопного палива. Глобальне потепління спричинене викидами парникових газів, таких як вуглекислий газ, в атмосферу. Серед усіх парникових газів CO₂ має частку близько 65% і зумовлює глобальне потепління.

Світова цементна промисловість спричиняє близько 7% викидів парникових газів в атмосферу. Для того, щоб вирішити проблему впливу на навколишнє середовище, пов'язану з портландцементом, необхідно розробити альтернативні в'язучі речовини для виготовлення бетону.

Одним із способів виробництва більш екологічно чистого бетону є розробка неорганічного алюмосилікатного полімеру, так званого геополімеру, синтезованого з матеріалів геологічного походження або побічних продуктів, таких як зола виносу, які багаті на кремній та алюміній.

У цьому проекті низькокальцієвий геополімер класу F, на основі золи виносу з теплоелектростанції використовувався для виробництва геополімерного бетону. Комбінація розчину силікату натрію та гідроксиду натрію використовували як лужний розчин для активації золи виносу. Співвідношення лужного розчину до лужного розчину до золи виносу варіювалося в межах 0,35, 0,40 і 0,45.

Концентрація розчину гідроксиду натрію підтримувалася на рівні 8M (молярних одиниць) геополімербетону, варіювали як при природному твердненні, так і в печі при температурі 60°C та 100°C. Міцність на стиск геополімербетону була випробувана на різних етапах, наприклад, через 7, 14 і 28 днів.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОПОЛІМЕРНИХ
МАТЕРІАЛІВ

1.1. Структура та властивості геополімерних матеріалів

Бетон є широко використовуваним будівельним матеріалом, з якого виготовляють фундаменти, архітектурні споруди, мости, дороги, стіни, паркани та стовпи. При виробництві однієї тонни портландцементу в атмосферу викидається приблизно одна тонна CO₂. Серед парникових газів CO₂ спричиняє близько 65% глобального потепління. Внесок портландцементу у світі у викиди парникових газів оцінюється приблизно в 1,35 мільярда тонн щорічно або приблизно 7% від загального обсягу викидів парникових газів в атмосферу Землі.

Також цементна промисловість є надзвичайно енергоємною. Після алюмінію та сталі, виробництво портландцементу є найбільш енергоємним процесом, оскільки на його виробництво витрачається 4ГДж енергії на тонну. Після теплових електростанцій та металургійної промисловості, цементна промисловість є третім за величиною споживачем вугілля в світі [1].

Вугільні теплові електростанції займають великий сегмент виробництва електроенергії. Для того, щоб задовольнити зростаючий попит на енергію, теплова генерація на основі вугілля буде відігравати домінуючу роль і в майбутньому.

Вміст золи виносу у вугіллі, що використовується на теплових електростанціях коливається від 25 до 45%. Однак, вугілля з вмістом золи близько 40% переважно використовується для виробництва теплової енергії. Як наслідок, величезна кількість золи виносу (ЗВ) утворюється на теплових електростанціях, що спричиняє низку проблем, пов'язаних з її утилізацією.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Незважаючи на ініціативи, що вживаються, загальний обсяг утилізації золи виносу становить менше 25%.

Проблема утилізації золи є зростаючою проблемою, оскільки лише 15% відходів використовується для виробництва продуктів з високою доданою вартістю, таких як для виробництва бетону та будівельних блоків, а решта використовується для заповнення земель.

Зола виносу (ЗВ) успішно використовується як мінеральна добавка до портландцементу вже майже 60 років. Існує ефективне використання ЗВ у виробництві цементних бетонів, оскільки воно розширює технічні переваги, а також контролює забруднення навколишнього середовища [2].

Мелений гранульований доменний шлак (МГШ) – це побічний продукт доменних печей, що використовуються для виробництва заліза. МГШ – це склоподібний, гранульований, неметалевий матеріал, що складається в основному з силікатів і алюмінатів кальцію. МГШ має майже такий самий розмір частинок, як і цемент та часто змішується з портландцементом як недорогий наповнювач, покращує оброблюваність бетону, його щільність, довговічність і стійкість до лужно-кремнеземної реакції.

Альтернативним варіантом використання ЗВ та МГШ у будівництві, що з'явився в останні роки, є геополімербетон (ГПБ), в якому при відповідній технології виробництва використовуються всі класи і марки ЗВ і МГШ, тому існує великий потенціал для зменшення запасів цих відходів.

Геополімербетони (ГПБ) – це неорганічні полімерні композити, які є перспективними бетонами з потенціалом формування екологічно сталого будівництва шляхом заміни або доповнення традиційних бетонів. ГПБ мають високу міцність, хорошу стійкість до проникнення хлоридів, кислотного впливу тощо. Вони, зазвичай, утворюються шляхом активації лугом промислових алюмосилікатних відходів, таких як ЗВ і МГШ, і мають дуже малий вплив на парниковий ефект у порівнянні з традиційними бетонами [3].

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термін «геополімер» був вперше введений вченим Джезефом Давидовицем у 1978 році для опису сімейства мінеральних в'язучих речовин з хімічним складом, подібним до цеолітів, але з аморфною мікроструктурою. На відміну від звичайних портландцементів геополімери не утворюють кальцій-силікат-гідратів для формування матриці та міцнісних зв'язків, а використовують реакцію поліконденсації похідних кремнезему та глинозему для досягнення структурної міцності.

Дві основні складові геополімерів є вихідні матеріали та лужні рідини. Вихідні матеріали для алюмосилікатів повинні бути багатими на кремній (Si) та алюміній (Al). Це можуть бути можуть бути побічні матеріали, такі як зола виносу, кремнезем, шлак, зола з рисового лушпиння, червоний шлам тощо. Геополімери також унікальні в порівнянні з іншими алюмосилікатними матеріалами (наприклад, алюмосилікатними гелями, склом і цеолітами) [4].

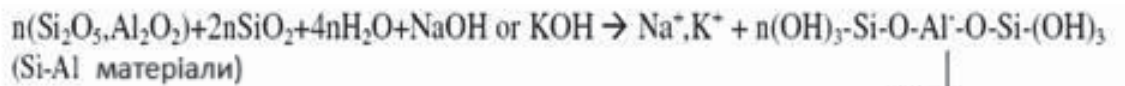
Геополімерна технологія може зменшити загальну потребу в енергії для виробництва бетону, знизити викиди CO₂ в атмосферу, тим самим зменшуючи вплив на процес глобального потепління.

Геополімери мають наступні переваги:

- набування міцності протягом короткотривалого періоду;
- не потрібна вода як середовище для тверднення;
- високі механічні властивості;
- довговічність;

Хімічний склад геополімерного матеріалу схожий з природним цеолітовим матеріалом, але мікроструктура аморфна, а не кристалічна. Процес полімеризації передбачає досить швидку хімічну реакцію у лужному середовищі на мінералах Si-Al, що призводить до утворення трьохвимірних полімерних ланцюгів і кільцевої структури, що складається з Si-O-Al-O, сіж якими утворюються зв'язки. Схематичне формування геополімерного матеріалу може бути описане наступними рівняннями (рисунок 1.1, 1.2) [4].

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Геополімерний прекурсор



Геополімерний каркас

Рисунок 1.1 – Хімічна реакція утворення геополімеру

Рівняння показує, що вода виділяється під час хімічної реакції, що відбувається при утворенні геополімерів. Ця вода, витіснена з геополімерної матриці під час затвердіння та подальшого висихання, залишає позаду розривні нанопори в матриці, які забезпечують переваги геополімерів. Вода в геополімері отже, суміш не відіграє жодної ролі в хімічній реакції, що відбувається

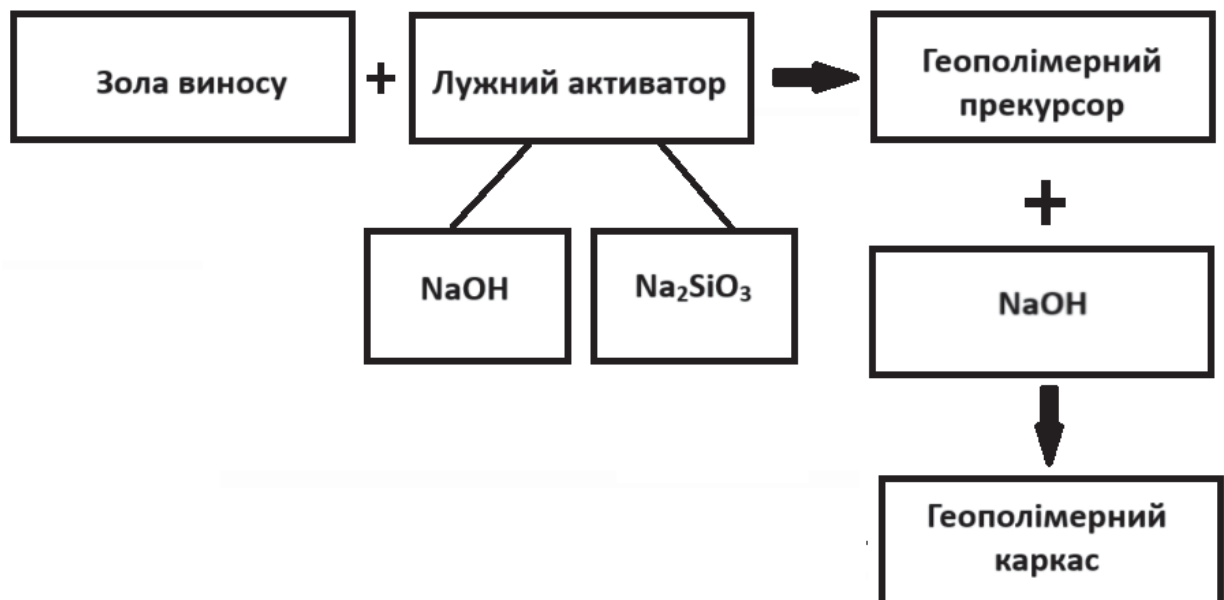


Рисунок 1.2 – Схематичне формування геополімерного матеріалу

Геополімер може мати одну з трьох основних форм, як повторювана одиниця показано на рисунку 1.1.

- полі (сіалат), який має $[-Si-O-Al-O-]$ як повторювану одиницю.
- полі (сіалат-силокс), який має $[-Si-O-Al-O-Si-O-]$ як повторювану одиницю.
- полі (сіалат-дисилокс), який має $[-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]$ як повторювану одиницю.

Сіалат – це абревіатура від silicon-охо-aluminate.

1.2. Застосування геополімерів

Геополімерні матеріали мають широкий спектр застосування в автомобільній та аерокосмічній промисловості, ливарному виробництві кольорових металів, цивільному будівництві та виробництві пластмас. Сфера застосування геополімерних матеріалів визначається хімічною структурою, тобто співвідношенням атомів матеріалу.

Низьке співвідношення Si: Al, а саме 1, 2 або 3 ініціює утворення 3D мережі, яка є дуже жорсткою, в той час як співвідношення Si:Al вище 15 надає матеріалу полімерних властивостей. Для багатьох застосувань у сфері цивільного будівництва підходить низьке співвідношення Si:Al [5]. Залежно від різного атомного співвідношення Si: Al, застосування геополімербетону показано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Застосування геополімерного бетону

Si:Al співвідношення	Застосування
1	2
1	Виробництво цегла, кераміки, вогнетривких матеріалів
2	Виробництво цементів та бетонів з низьким вмістом CO ₂ , ізоляція радіоактивних і токсичних відходів

Продовження таблиці 1.1.

1	2
3	Виробництво вогнезахисного склопластикового композиту, термостійких композитів
>3	Виробництво герметиків для промисловості, 200°C...600°C
20...35	Виробництво вогнетривких та термостійких волокнистих композитів

1.3. Компоненти геополімеру

Будь-який матеріал, який містить переважно кремній (Si) і алюміній (Al) в аморфній формі є можливим вихідним матеріалом для виготовлення геополімеру. Це можуть бути природні мінерали, такі як каолініт, глини або відходи виробництва такі матеріали, як зола виносу, кремнезем, шлак, зола рисового лушпиння, червоний шлам тощо.

Вибір вихідних матеріалів для виготовлення геополімерів залежить від таких факторів, як доступність, вартість і тип застосування та специфічний попит кінцевих користувачів [6].

Зола виносу.

Відповідно до комітету Американського інституту бетону (ACI) 116R, зола виносу визначається як «дрібно подрібнений залишок, який утворюється в результаті спалювання меленого або порошкоподібного вугілля, що транспортується димовими газами від зони горіння до системи видалення частинок». Частинки золи виносу зазвичай сферичні, дрібніші, ніж портландцемент і вапно, діаметром від 1 мкм ...150 мкм. Хімічний склад в основному складається з оксидів кремнію (SiO₂), алюмінію (Al₂O₃), заліза (Fe₂O₃) і кальцію (CaO), а магній, калій, натрій, титан і сірка також присутні але в меншій кількості.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вплив на хімічний склад золи виносу залежить від типу вугілля. Спалювання суббітумінозного вугілля містить більше кальцію і менше заліза ніж зола виносу з бітумінозного вугілля. Фізико-хімічні характеристики залежать від методів спалювання, джерела вугілля та форми частинок.

Зола виносу, що є результатом спалювання суббітумінозного вугілля, відноситься до ASTM класу C – зола виносу з високим вмістом кальцію, оскільки вона зазвичай містить більше 20 відсотків CaO. З іншого боку, зола від бітумінозного та антрацитового вугілля називається летючою золою ASTM класу F або летючою золою з низьким вмістом кальцію. Вона складається з переважно алюмосилікатного скла, яке містить менше 10 відсотків CaO [7].

Як вихідний матеріал краще використовувати золу виносу з низьким вмістом кальцію (ASTM клас F) з високим вмістом кальцію (ASTM клас C). Наявність великої кількості кальцію може перешкоджати процесу полімеризації та змінювати мікроструктуру. Зола з низьким вмістом кальцію успішно використовували для виробництва геополімерного бетону, коли оксиди кремнію та алюмінію становили близько 80% за масою, із співвідношенням Si до Al приблизно 2. Вміст оксиду заліза зазвичай коливався від 10 до 20% за масою, тоді як вміст оксиду кальцію становив менше 3% за масою, а втрата маси при спалюванні становила менше 2%, а 80% частинок золи мали розмір менше 50 мкм.

Лужні рідини.

Лужні рідини складаються з розчинних лужних металів, які зазвичай містять натрій або калій. Найбільш поширеною лужною рідиною, яка використовується в геополімеризації, є комбінація гідроксиду натрію (NaOH) або гідроксиду калію (KOH) і силікату натрію або силікату калію. Тип лужної рідини відіграє важливу роль у процесі полімеризації.

Реакції відбуваються з високою швидкістю, коли лужна рідина містить розчинний силікат, силікат натрію або калію, порівняно з використанням

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лише лужних гідроксидів. Зазвичай розчин NaOH спричиняє більший ступінь розчинення мінералів, ніж розчин KOH.

Розчин гідроксиду натрію (NaOH) готують шляхом розчинення пластивців або гранул у воді. Маса твердих речовин NaOH у розчині змінювалася залежно від концентрації розчину, вираженої в молярних одиницях М. Наприклад, розчин NaOH з концентрацією 8 М складався з 8х40 і дорівнював 320 грамів твердих речовин NaOH (у формі пластивців або гранул) на літр розчину, де 40 — молекулярна маса NaOH. Масу твердих речовин NaOH було виміряно як 262 грами на один кілограм 8М розчину NaOH. Подібним чином маса твердих речовин NaOH на один кілограм розчину для інших концентрацій була виміряна як 10М: 314 грамів, 12М: 361 грам, 14М: 404 грами та 16М: 444 грами [8].

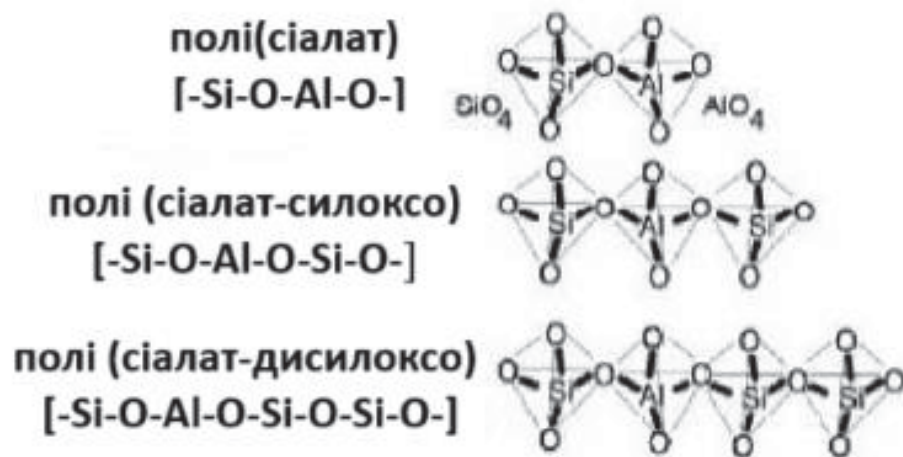


Рисунок 1.3 – Основні форми геополімеру як повторюваної одиниці

1.4 Властивості геополімерного бетону

Ренган [9] провів дослідження геополімерного бетону з низьким вмістом кальцію. Встановив вплив таких важливих факторів, як співвідношення води та твердих речовин геополімеру, час змішування, час тверднення та температура тверднення на властивості геополімербетону у свіжому та затверділому станах. Обговорив короткострокові та довгострокові

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

властивості геополімербетону, повзучість та усадку при висиханні, стійкість геополімербетону до дії сульфатів та сірчаної кислоти. Також коротко описав економічні переваги геополімербетону. Відповідно, зроблено висновок, що геополімерний бетон із низьким вмістом кальцію і золи виносу має чудову стійкість до дії сульфатів, хорошу кислотостійкість, зазнає низької повзучості та усадки при висиханні.

Харджіто та Ранган [9] досліджували використання золи виносу як сполучної речовини для виготовлення бетону без цементу. Експериментальна робота була проведена з використанням золи виносу з низьким вмістом кальцію як сполучної речовини та гідроксиду натрію та розчину силікату натрію як активаторів. В результаті досліджено вплив таких основних параметрів, як концентрація розчину гідроксиду натрію, співвідношення розчину силікату натрію до розчину гідроксиду натрію, температура затвердіння, час затвердіння, час обробки, додавання пластифікатора, вміст води в суміші та час змішування, на властивості бетону.

Виходячи з міцності геополімербетону на стиск, рекомендовані значення для змінних тесту є наступними. Концентрація розчину гідроксиду натрію була в діапазоні від 8 М до 16 М. Співвідношення розчину силікату натрію до гідроксиду натрію по масі знаходилося в межах 0,4...2,5. Співвідношення лужного розчину до золи виносу за масою становило приблизно 0,35...0,45.

Віджай та ін. [10] описали вплив типів тверднення (природне в умовах навколишнього середовища та гаряче тверднення) на міцність на стиск геополімерного бетону на основі золи виносу. Для гарячого тверднення температуру підтримували 60°C протягом 24 годин у печі з гарячим повітрям. Міцність на стиск бетону гарячого тверднення була вищою, ніж бетону затверділого в умовах навколишнього середовища. При витримці в умовах навколишнього середовища міцність на стиск збільшується приблизно в п'ять разів із віком бетону від 7 днів до 28 днів. Міцність на

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стиск геополімерного бетону на основі золи виносу гарячого затвердіння суттєво не збільшилася через 7 днів. Щільність геополімербетону становила близько 2400 кг/м³, що еквівалентно щільності звичайного бетону.

Харджіто та ін. [11] представили вплив складу суміші на міцність на стиск геополімерного бетону на основі золи виносу. Молярне співвідношення води до оксиду натрію та співвідношення води до твердих частинок геополімеру впливають на міцність геополімербетону на стиск. Зі збільшенням цих співвідношень міцність геополімеру на стиск зменшується. Зі збільшенням молярного співвідношення води до оксиду натрію суміш містила більше води і ставала більш технологічною. Загальна маса води – це сума маси води в розчині силікату натрію, маси води в розчині гідроксиду натрію і додаткової води, якщо вона була додана в бетон. Маса твердих частинок геополімеру – це сума маси золи виносу, маси пластифікаторів гідроксиду натрію і маси твердих частинок силікату натрію. Молярне співвідношення оксиду натрію до оксиду кремнію в діапазоні від 0,095 до 0,120 не мало значного впливу на міцність на стиск.

Мороган та ін. [12] досліджували такі властивості, як міцність на стиск, міцність на розрив та міцність на згин геополімербетону на основі золи виносу та порівняли їх зі звичайним бетоном. Проаналізовано вплив таких параметрів, як співвідношення лужної рідини до в'язучого, час тверднення на міцність геополімербетону на стиск.

При збільшенні співвідношення лужної рідини до в'язучого і молярності гідроксиду натрію міцність на стиск також збільшується, тоді як при збільшенні кількості води вона зменшується. У цьому експерименті 10% по масі в'язучого (золи-виносу) було замінено гранульованим доменним шлаком.

Одноденна міцність на стиск термостійкого геополімербетону на основі золи виносу коливається від 60 МПа до 80 МПа, з різним співвідношенням лужної рідини до в'язучого 0,3 та 0,35. Додавання 10%

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гранульованого доменного шлаку збільшує міцність на стиск від 25 до 33%. Міцність на згин геополімербетону і звичайного бетону виявилася аналогічною.

Чжан та ін. [13] дослідили процес гідратації міжфазного переходу в геополімербетоні на основі полісилікату калію. Для експерименту використовували метакаолін як вихідний матеріал, а гідроксид калію – як активатор. Для дослідження процесу гідратації міжфазної перехідної зони між крупним наповнювачем в геополімері і полісилікатом калію при відносній вологості середовища 80% використовували скануючу електронну мікроскопію (ESEM).

Для визначення хімічного складу продуктів гідратації також використовували енергодисперсійний рентгенівський аналіз (EDXA). Мікрофотографії ESEM і відповідні результати EDXA показали, що розвиток мікроструктури перехідної зони значно відрізняється від мікроструктури матриці. На початку експерименту спостерігалось багато великих пустот, заповнених водою, як показано на рисунку 1.4, але ці пустоти не були виявлені в об'ємній матриці. В процесі гідратації гелеподібні структури поступово осідали на краях цих пустот і поширювалися назовні. Врешті-решт ці порожнечі були повністю заповнені продуктом гідратації, як показано на рисунку 1.5. На цій стадії різниця між міжфазною перехідною зоною і матрицею була ледь помітною.

Однак результати EDXA показали, що вміст K/Al і Si/Al в перехідній зоні був вищим, ніж в об'ємній матриці. Це вказує на те, що K і Si накопичуються в міжфазній перехідній зоні, що призводить до різниці в хімічному складі між нею і матрицею. Крім того, в міжфазній перехідній зоні на жодній стадії не було виявлено добре розвинених кристалів, а завжди спостерігався губчастий аморфний гель.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

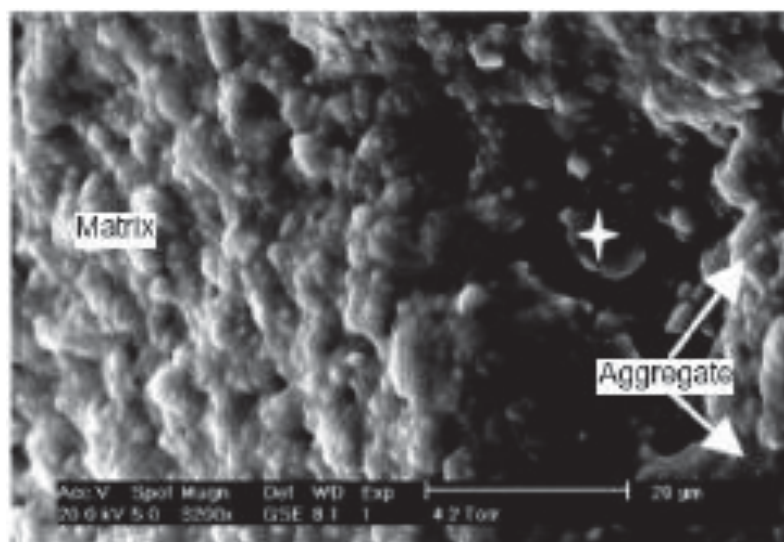


Рисунок 1.4 – СЕМ-аналіз перехідної зони до гідrataції

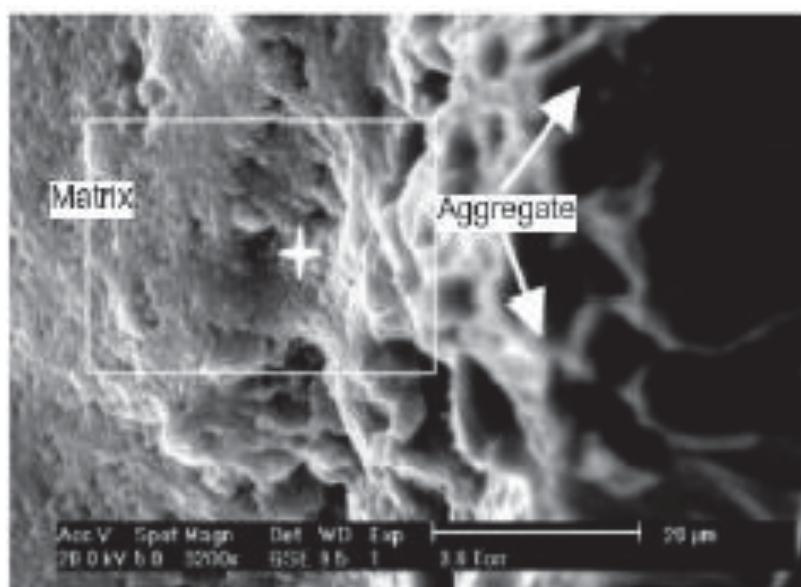


Рисунок 1.5 – СЕМ-аналіз після гідrataції

Харджіто і Цен [14] представили технічні властивості геополімерного розчину, виготовленого з золи виносу класу F (низькокальцієвої) за допомогою лужного реагента на основі калію. Результати показали, що зі збільшенням концентрації КОН міцність геополімерного розчину на стиск також зростає. Співвідношення силікату калію до гідроксиду калію за масою

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

в діапазоні 0,8...1,5 забезпечує найвищу міцність геополімерного розчину на стиск.

Зразки геополімерного бетону були випробувані на термостійкість протягом трьох годин при температурі 400°C, 600°C та 800°C. При тригодинному впливі температури 400°C межа міцності на стиск збільшилася вдвічі порівняно з контрольною сумішшю. Це свідчить про те, що процес геополімеризації продовжується, коли геополімерний розчин піддається впливу високих температур, аж до 400°C. Геополімерний бетон має відмінну вогнестійкість до 800°C протягом трьох годин. Вище 800°C міцність на стиск геополімербетону на основі золи виносу знижується з підвищенням температури.

Токхом та ін. [6] провели експериментальне дослідження для оцінки кислотостійкості зразків геополімерного розчину на основі золи виносу з вмістом Na₂O від 5% до 8% від загальної кількості золи виносу. Зразки були занурені в розчини 10% сірчаної та 10% азотної кислот на період до 24 тижнів. Кислотостійкість оцінювали за показниками поверхневої корозії, залишкової лужності, зміни ваги та міцності на стиск через регулярні проміжки часу. Зразки геополімерного розчину не показали жодних змін кольору і залишилися структурно неушкодженими, хоча поверхня контакту стала дещо м'якшою. За допомогою оптичного мікроскопа можна було побачити корозійну поверхню, яка збільшувалася зі збільшенням тривалості експозиції. Втрата лужності залежала від вмісту лугу в геополімерному розчині. Розчин з меншим вмістом Na₂O втрачав лужність швидше, ніж розчин з більшим вмістом Na₂O як в розчинах сірчаної, так і в розчинах азотної кислоти. Втрата ваги в діапазоні від 0,81% до 1,64% в сірчаній кислоті і від 0,21% до 1,42% в азотній кислоті спостерігалася протягом 12 тижнів експозиції. Наприкінці 24 тижнів експозиції міцність на стиск збільшилася з 44% до 71% і з 40% до 70% в сірчаній і азотній кислотах

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідно. У цій роботі зроблено висновок, що геополімери на основі золи виносу мають високу стійкість як до сірчаної, так і до азотної кислоти.

Воллах та ін., [11] в представили характеристики геополімерного бетону на основі золи виносу та його взаємодії із сульфатами . Зразки були замочені в розчині сульфату натрію та розчині сірчаної кислоти протягом різних періодів витримки. Робочі характеристики геополімербетону досліджували шляхом оцінки міцності на стиск, зміни довжини та зміни маси. Не було виявлено суттєвих змін у зовнішньому вигляді поверхні зразків, просочених сульфатом натрію до 12 тижнів.

Однак поверхня зразків, замочених у розчині сірчаної кислоти, почала руйнуватися після одного тижня експозиції. За результатами випробувань було виявлено, що вплив розчину сульфату натрію до 12 тижнів мав дуже незначний вплив на міцність на стиск. Однак, значна зміна міцності на стиск спостерігається для зразків, що піддавалися впливу розчину сірчаної кислоти. За 12 тижнів замочування зменшення міцності на стиск міцності на стиск склало близько 30 %. Виявляється, що проникнення сірчаної кислоти впливає на мікроструктуру і зменшує зв'язок між геополімерним в'язучим і наповнювачами, що призводить до зниження міцності на стиск. Зміна довжини зразків, замочених у розчині сульфату натрію для різних періодів експозиції дуже мала, менше 0.01%. Маса зразків, замочених у розчині сульфату натрію, не змінилася. У випадку зразків, замочених у сірчаній кислоті, маса зменшилася менш ніж на один відсоток через 12 тижнів.

Воллах і Ренган [11] вивчали довгострокові властивості геополімерного бетону з низьким вмістом кальцію на основі золи виносу. В якості вихідного матеріалу використовували низькокальцієву золу виносу з електростанції Коллі, Західна Австралія, була використана як вихідний матеріал. Лужна рідина, що використовувалася являла собою комбінацію розчину силікату натрію та розчину гідроксиду натрію. Дві різні суміші,

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суміш-1 і Суміш-2, були використані для експериментальної роботи і затверділи при 60°C протягом 24 годин.

У Суміші-1 концентрація розчину гідроксиду натрію становила 8 моль (М), і не було додано жодної додаткової води. У Суміші-2 концентрація розчину гідроксиду натрію становила 14 молярних одиниць (М), і суміш містила додатково додану воду. Середня міцність на стиск Суміші-1 становила близько 60 МПа, а Суміші-2 – близько 40 МПа. Зразки з геополімеру були випробувані на повзучість, усадку при висиханні, стійкість до сульфатів і кислот. Виходячи з результатів випробувань не було виявлено суттєвого збільшення міцності на стиск термічно затверділого геополімеру на основі золи виносу протягом певного часу. Геополімербетон на основі золи виносу, затверділий в атмосферних умовах, з часом набуває міцності на стиск. Термостійкий геополімербетон на основі золи виносу має низьку повзучість. Питома повзучість через один рік становила від 15 до 29 $\times 10^{-6}$ МПа для відповідної міцності на стиск від 67 МПа до 40 МПа.

Термічно затверділий геополімербетон на основі золи виносу піддається дуже незначному висиханню з усадкою близько 100 мікродеформацій через один рік. Це значення значно менше, ніж діапазон значень від 500 до 800 мікродеформацій для портландцементного бетону. Термотвердіючий геополімербетон на основі золи виносу також мав кращу стійкість до дії сульфатів та кислот.

Сквара та ін., [14] досліджували властивості бетонів на основі геополімерів. Структура геополімерів, отриманих на основі золи-виносу була переважно типу AlQ^4 (4Si) та SiQ^4 (4Al), SiQ^4 (2-3Al). Геополімер на основі золи виносу був пористим матеріалом. Пористість геополімерів була дуже схожою в області нанопор незалежно від умов їх приготування. На міцність геополімерів на міцність суттєво впливали макропори (103 нм і більше), що утворилися в результаті проникнення повітря в геополімери, це може бути пов'язано з частковою реакцією частинок золи. Присутність Са-вмісних

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

добавок (шлак, гіпс) значно зменшує пористість через співіснування геополімерної фази з С-S-H фазою. Присутня усадка внаслідок гідратації в геополімербетоні. Відношення міцності на стиск до міцності на розтяг при згинанні змінюється в діапазоні 10,0:5,5. Перехідної фази між в'язучим і наповнювачами в геополімербетоні не виявлено.

Бакарєв, [1] представив дослідження довговічності геополімерних матеріалів, виготовлених з використанням золи-виносу класу F та лужних активаторів в сульфатному середовищі. Випробування для визначення стійкості геополімерних матеріалів проводилися з використанням 5% розчину сульфату натрію та магнію протягом 5 місяців. Зола виносу була активована гідроксидом натрію, сумішшю натрію та сумішшю розчинів гідроксиду натрію і калію та силікату натрію, забезпечуючи 8-9% Na в суміші та співвідношення води до в'язучого 0,3. Суміші піддавалися твердненню протягом 24 годин при кімнатній температурі, після чого їх нагрівали до температури 90°C і витримували при цій температурі протягом 24 годин, а потім витримували при кімнатній температурі протягом 2 днів.

У зразках, які піддавалися випробуванню із сульфатом натрію спостерігалися значні коливання міцності: відбувалися зі зниженням міцності на 18% в зразках, активованих силікатом натрію, і на 65% у зразках, приготованих з гідроксидом натрію та з гідроксидом калію в якості активаторів, тоді як 4% збільшення міцності було виміряно в зразку, активованому гідроксидом натрію. У зразках витриманих у розчині сульфату магнію було виміряно 12% і 35% збільшення міцності при використанні гідроксиду натрію та суміші гідроксиду натрію і калію в якості активаторів, відповідно, і було виміряно 24% зниження міцності у зразках, активованих силікатом натрію.

Найбільш значні коливання міцності та мікроструктурних змін відбулися у 5% розчині сульфату натрію та магнію. Міграція лугів із зразків геополімеру в розчин спостерігалася в розчині сульфату натрію. Дифузія

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

іонів лугу в розчин викликала значні напруження та утворення глибоких вертикальних тріщин у зразках, виготовлених з використанням суміші гідроксидів натрію та калію. У розчині сульфату магнію крім міграції лугів з геополімеру в розчин, відбувалася також дифузія іонів Na, Mg і Ca в поверхневий шар геополімерів, що сприяло підвищенню їх міцності. У матеріалі, приготованому з використанням силікату натрію, також спостерігалася утворення етtringіту (важкорозчинного гідросульфоалюмінату кальцію), який сприяв до втрати міцності. Найкращі показники в різних сульфатних розчинах спостерігалися у геополімерного матеріалу, приготованого з використанням гідроксиду натрію і затверділого при підвищеній температурі. Хороші характеристики пояснюються більш стабільною структурою зшитого алюмосилікатного полімеру.

Бахарев також досліджував довговічність геополімерних матеріалів з використанням золи класу F і силікату натрію, гідроксиду натрію і суміші гідроксиду натрію і гідроксиду калію як активаторів, при впливі 5% розчинів оцтової та сірчаної кислот. Значна деградація спостерігалася в геополімерних матеріалах, приготованих з використанням силікату натрію та суміші гідроксиду натрію і гідроксиду калію в якості активаторів. Погіршення відбувалося внаслідок деполімеризації алюмосилікатних полімерів і вивільнення кремнезему, заміщення катіонів Na і K на водень та деалюмінації структури геополімеру.

У кислому середовищі високоефективні геополімерні матеріали руйнуються з утворенням тріщин в аморфній полімерній матриці, тоді як низькоефективні геополімери руйнуються через кристалізацію цеолітів і утворення крихких зернистих структур. Більш кристалічний геополімерний матеріал, приготований з гідроксидом натрію, виявився більш стабільним в агресивному середовищі розчинів сірчаної та оцтової кислот, ніж аморфні геополімери, приготовані з активатором силікатом натрію. Хімічна

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нестабільність також залежала від наявності активних центрів на поверхні алюмосилікатного гелю, які, як виявилось, зростали в присутності іонів К.

Конг та ін. [16] досліджували вплив підвищених температур на геополімери, виготовлених з метакаоліну та золи виносу в різних співвідношеннях. Обидва типи геополімерів були синтезовані з розчинів силікату натрію та гідроксиду калію. Міцність геополімеру на основі золи виносу зросла після впливу підвищених температур (800°C). Однак міцність відповідного геополімеру на основі метакаоліну зменшилася після аналогічного впливу. В роботі зроблено висновок, що геополімери на основі золи виносу мають велику кількість дрібних пор, які полегшують вихід вологи при нагріванні, таким чином спричиняючи мінімальне пошкодження геополімерної матриці. З іншого боку, метакаолінові геополімери не мають такої структури розподілу пор. Підвищення міцності геополімерів із золи виносу також частково пояснюється реакціями спікання частинок золи, що не прореагували.

Равікумар та ін. [11] описали вплив концентрації активатора (розчин гідроксиду натрію) і співвідношення активатора до в'язучого на міцність на стиск, особливості пористої структури і мікроструктурт бетонів, що містять золу-виносу класу F або мелений гранульований доменний шлак (GGBFS) в якості єдиного в'язучого. Вміст вихідного матеріалу та параметри тверднення (температура і тривалість) були оптимізовані для забезпечення найвищої міцності на стиск. Статистичний аналіз результатів міцності показує, що концентрація активатора впливає на міцність на стиск активованих бетонів, виготовлених з використанням золи-виносу, а співвідношення активатора до в'язучого більшою мірою впливає на міцність на стиск активованих бетонів з GGBFS. Встановлено, що бетони та пасти з активованої золи виносу є більш пористими і містять велику фракцію пор розміром більше 10 мкм порівняно з активованими сумішами GGBFS.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Бахарев, [22] досліджував термічну стабільність властивостей при випалюванні при 800-1200°C геополімерних матеріалів, приготованих з використанням золи-виносу класу F і лужних активаторів Na і K. Матеріали готували при співвідношенні вода/в'язуче в діапазоні 0,09...0,35, використовуючи тиск ущільнення до 10 МПа і температуру твердіння 80°C і 100°C. У зразках, виготовлених з використанням натрійвмісних активаторів, спостерігалось швидке зниження міцності при 800°C, що було пов'язано з різким збільшенням середнього розміру пор. Початкові аморфні структури заміщуються кристалічними Na польовими шпатами. У матеріалах, виготовлених з використанням золи і силікату калію, межа міцності на стиск значно зростала при нагріванні, погіршення міцності починалося з 1000°C. Матеріали, приготовані з використанням золи і силікату калію, мали кращу термостійкість, ніж геополімери, приготовані з використанням Na-вмісних активаторів, матеріали залишалися переважно аморфними до 1200°C. Після відпалювання ці матеріали залишалися аморфними зі зменшеним середнім розміром пор і значно збільшеною міцністю на стиск. Ущільнення до 1-10 МПа зменшило усадку при випалюванні всіх матеріалів. Геополімерні матеріали, приготовані з використанням золи класу F та силікатів натрію і калію, демонструють високу усадку, а також значні зміни міцності на стиск при підвищенні температури випалу в діапазоні 800-1200°C. Таким чином, матеріали були визнані непридатними для вогнетривкої ізоляції.

Можна підсумувати, що геополімербетон був вперше представлений Давідовіцем виготовлений з метакаоліну та лужних активаторів. Він має великий потенціал для використання в якості будівельного матеріалу, альтернативного звичайному портландцементному бетону, завдяки своїй міцності, жорсткості та іншим механічним властивостям, які можна порівняти з бетоном ОРС. Виробництво геополімеру вимагає відносно низької температури і виділяє менше CO₂.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Достатня міцність була досягнута за короткий період при кімнатній температурі, і в більшості випадків 70% від межі міцності на стиск розвивається в перші 4 години після змішування. Міцність на стиск геополімербетону була підвищена за рахунок використання більш високої концентрації активатора, більш високого співвідношення розчину активатора до в'язучого по масі, більш високої температури твердіння і більшої тривалості твердіння. Геополімер також має відмінну стійкість до кислотних середовищ. Це забезпечує технічні переваги в таких сферах застосування, як каналізаційні труби та інші кислотні промислові застосування. Геополімер стає дуже гнучким матеріалом при температурі близько 700°C, що дозволяє йому витримувати великі деформації без руйнування і набирати міцність під впливом вогню.

Що стосується довгострокових властивостей, то геополімербетон на основі золи виносу має низьку повзучість і дуже малу усадку при висиханні. Щодо економічних переваг, то вартість геополімерного бетону на основі золи виносу була приблизно на 10-30% дешевшою, ніж у портландцементного бетону.

Більшість опублікованих досліджень геополімерного бетону вивчали вплив міцності на стиск, змінюючи співвідношення розчину силікату натрію до розчину гідроксиду натрію в діапазоні від 0,4 до 2,5.

1.5. Мета дослідження

Метою проекту є дослідження впливу на геополімербетон на основі золи-виносу таких параметрів, як співвідношення лужного розчину до в'язучого, умови тверднення на міцність на стиск.

Завданнями проекту є дослідження геополімерного бетону за різних умов:

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- за співвідношення лужного розчину до в'язучого за масою в межах 0,35, 0,40 та 0,45.
- твердіння на відкритому повітрі та в печі (60°C та 100°C).
- визначення міцності на стиск геополімербетону на основі золи виносу у різному віці (7 днів, 14 днів і 28 днів) .

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

Матеріали, використані для виготовлення зразків геополімерного бетону були: зола-виносу з низьким вмістом кальцію, наповнювачі, лужні рідини, додаткова вода та суперпластифікатор.

Зола-виносу, використана в цьому дослідженні, була отримана з теплоелектростанції. Вона відноситься до категорії класу F, а її хімічний склад наведено в таблиці 2.1. Фізичні властивості золи-виносу визначено згідно з IS: 1727-1967 і наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад золи-виносу

Компоненти	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Втрати при нагріві
%, мас	56,77	31,88	2,82	2,77	0,78	2,39	0,68	1,96	0,93

Таблиця 2.2 – Фізичні властивості золи-виносу

№	Властивості	Результати тесту
1	Питома вага	2,13 %
2	Фракція, відсоток пропускання через сито 150 мкм	99,6 %
3	Фракція, відсоток пропускання через сито 90 мкм	98,1 %

Як крупнозернистий наповнювач використовувався наявний у місцевості щебінь із гранітного каменю максимальним розміром 20 мм. Для експериментальної роботи використовувався крупнозернистий наповнювач,

що проходив через 20 мм і зберігав 4,75 мм. Наступні властивості грубих наповнювачів були визначені відповідно до IS: 2386-1963 і наведені в таблиці 2.3, а ситовий аналіз представлений у таблиці 2.4. Градаційна крива для крупного наповнювача показана на рисунку 2.1.

Таблиця 2.3 – Властивості крупного наповнювача

№	Властивості	Результати тесту
1	Питома вага	2,68
2	Модуль подрібнення	8,65
3	Насипна щільність	1540 кг/м ³
4	Водопоглинання	0,5 %

Таблиця 2.4 – Ситовий аналіз крупного наповнювача

Розмір сита	Збережена вага, %	Збережена кумулятивна вага, %	Пройходження кумулятивної ваги, %
20 мм	45,0	45,0	55
16 мм	38,0	83,0	17
12,5 мм	15,0	98,0	2
10 мм	1,35	99,35	0,65
4,7 мм	0,05	99,40	0,60

Лужний розчин. В якості лужного розчину використовували комбінацію розчину силікату натрію та розчину гідроксиду натрію. Використовувався розчин силікату натрію із співвідношенням SiO₂ до Na₂O за масою приблизно 2, тобто (Na₂O = 14,7%, SiO₂ = 29,4% і вода 55,9% за масою). Використовувався натрій чистотою 97...98%, у вигляді пластівців або гранул.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

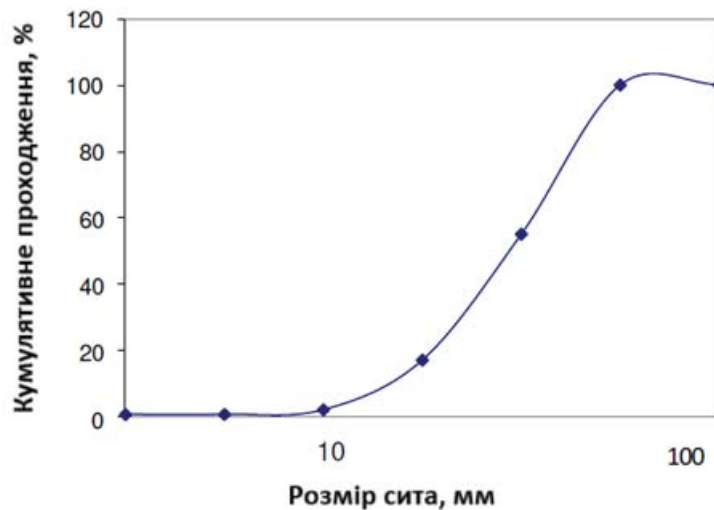


Рисунок 2.2 – Градаційна крива для дрібного наповнювача

Тверді речовини необхідно розчинити у воді для отримання розчину з необхідною концентрацією. Концентрація розчину гідроксиду натрію – 8 молярних одиниць. Співвідношення розчину силікату натрію до розчину гідроксиду натрію за масою було визначено як 2,5, оскільки розчин силікату натрію був дешевшим, ніж розчин гідроксиду натрію.

Суперпластифікатор. Для покращення оброблюваності свіжого бетону в бетонних сумішах використовували сульфонатний суперпластифікатор на основі нафталінформальдегідного конденсату як водовідновлювача. Суперпластифікатор являв собою темно-коричневий розчин, що містив 42% твердих речовин.

У звичайному портландцементному бетоні (ПЦБ) вода в суміші хімічно реагує з цементом, утворюючи пасту, яка зв'язує наповнювач. На відміну від цього, вода в геополімербетонній суміші на основі низькокальцієвої золи не викликає хімічної реакції. Насправді, хімічна реакція, яка відбувається в геополімерах, призводить до утворення води, яка в кінцевому підсумку витісняється з в'язучого. Однак вміст води в геополімербетонній суміші впливає на властивості бетону як у свіжому стані, так і в затверділому. Вміст води в геополімербетонних сумішах виражається

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

єдиним параметром, який називається «відношенням води до геополімеру за масою».

У цьому параметрі загальна маса води є сумою маси води, що міститься в розчині силікату натрію, маси води в розчині гідроксиду натрію та маси додаткової води, доданої до суміші. Маса твердих речовин геополімеру – це сума маси золи-виносу, маси твердих речовин гідроксиду натрію і маси твердих речовин у розчині силікату натрію.

У дослідженнях співвідношення води до геополімерних твердих компонентів було зафіксовано постійне значення 0,26, щоб з'ясувати вплив інших параметрів на міцність геополімербетону на стиск.

Пропорції суміші. Як і у випадку з портландцементним бетоном, великі і дрібні наповнювачі займають від 75 до 80% маси геополімербетону. Експлуатаційні характеристики геополімербетону залежать від сфери застосування. В якості критеріїв експлуатаційних характеристик вибирають міцність на стиск затверділого бетону і оброблюваність свіжого бетону. Для того, щоб відповідати критеріям експлуатаційних характеристик, в якості параметрів вибираються співвідношення лужної рідини до в'язучого за масою, співвідношення води до геополімерних твердих речовин за масою, температура теплового тверднення і час теплового тверднення.

Ранган запропонував рекомендації для проектування геополімерного бетону на основі низькокальцієвої золи з термічним твердненням. На основі результатів, отриманих з численних сумішей, виготовлених в лабораторії протягом чотирьох років, були запропоновані дані, наведені в таблиці 2.7, для проектування низькокальцієвого геополімерного бетону на основі золи-виносу. Запропонований вище метод розрахунку пропорції суміші був прийнятий в даній роботі. Пропорції суміші для різних співвідношень лужних розчинів до золи-виносу, таких як 0,35, 0,40 та 0,45, наведені в таблиці 2.8. Рецептuru суміші для низькокальцієвого геополімербетону на

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі золи-виносу для співвідношення лужного розчину до золи-виносу 0,35 наведена нижче.

Припустимо, що використовуються наповнювачі нормальної щільності в стані SSD, а питома вага бетону становить 2400 кг/м^3

Приймаємо масу комбінованих наповнювачів на рівні 75% від маси бетону.

Маса комбінованих наповнювачів: $0,75 \cdot 2400 = 1800 \text{ кг/м}^3$.

Маса золи-виносу та лужної рідини: $(2400 - 1800) = 600 \text{ кг/м}^3$.

Співвідношення лужної рідини до золи за масою: 0,35.

Маса золи-виносу: $600 / (1 + 0,35) = 444 \text{ кг/м}^3$.

Маса лужної рідини $(600 - 444) = 156 \text{ кг/м}^3$

Співвідношення розчину силікату натрію до розчину гідроксиду натрію за масою приймаємо 2,5.

Маса розчину гідроксиду натрію: $156 / (1 + 2,5) = 45 \text{ кг/м}^3$.

Маса розчину силікату натрію: $(156 - 45) = 111 \text{ кг/м}^3$.

Для пробної суміші співвідношення води та геополімерних твердих компонентів розраховується наступним чином:

У розчині силікату натрію, вода $0,559 \cdot 111 = 62 \text{ кг}$, тверді компоненти $(111 - 62) = 49 \text{ кг}$.

В розчині гідроксиду натрію, тверді компоненти $0,262 \cdot 45 = 12 \text{ кг}$, вода $(45 - 12) = 33 \text{ кг}$.

Таким чином, загальна маса води $62 + 33 = 95 \text{ кг}$, маса твердих компонентів геополімеру $444 + 49 + 12 = 505 \text{ кг}$, звідси співвідношення води до геополімеру за масою $95 / 505 = 0,19$.

Для співвідношення води до геополімеру 0,19 оброблюваність свіжого геополімербетону є помірною. Загалом, оброблюваність свіжого геополімербетону очікується помірною. За необхідності до суміші слід додати суперпластифікатор для полегшення укладання свіжого бетону.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.7 – Дані для проектування низькокальцієвих геополімерних бетонних сумішей на основі золи-виносу за даними Rangan [1]

Співвідношення води до сухих речовин геополімеру, за масою	Технологічність (піддатливість обробці)	Розрахункова міцність на стиск (час мокрого змішування 4 хвилини, твердіння парою при 60°C протягом 24 годин після відливання), МПа
0,16	Висока жорсткість	60
0,18	Жорсткість	50
0,20	Помірна	40
0,22	Висока	35
0,24	Дуже висока	30

Таблиця 2.8 Пропорція суміші на 1 м³ геополімербетону

Матеріали	Маса, кг/м ³		
	0,35	0,40	0,45
Лужний розчин / зола-виносу (за масою)			
Крупний наповнювач	1260	1260	1260
Дрібний наповнювач	540	540	540
Зола-виносу	444	429	414
Розчин гідроксиду натрію	45	49	53
Розчин силікату натрію	111	122	133

2.2 Методика виготовлення геополімеру

Підготовка рідин. Для приготування розчину тверді кристали гідроксиду натрію (NaOH) розчиняли у воді. Маса твердої речовини NaOH в

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

розчині варіюється в залежності від концентрації розчину, вираженої в молях, М. Наприклад, розчин NaOH з концентрацією 8М складається з $8 \times 40 = 320$ грамів твердої речовини NaOH (у вигляді пластівців або гранул) на літр розчину, де 40 – це молекулярна маса NaOH. Маса твердого NaOH була виміряна як 262 грами на кілограм розчину NaOH концентрацією 8М. Зауважте, що маса твердого NaOH становила лише частку маси розчину NaOH, а вода була основним компонентом.

Розчин силікату натрію і розчин гідроксиду натрію змішували разом щонайменше за день до використання для приготування лужної рідини. У день відливання зразків лужну рідину змішували з суперпластифікатором і додатковою водою (за наявності) для приготування рідкого компонента суміші.

Виготовлення свіжого бетону та заливка.

Геополімербетон може бути виготовлений за традиційною технологією, що використовується у виробництві портландцементного бетону. У лабораторії золу-винесу та наповнювачі спочатку змішували в чашковому змішувачі протягом приблизно 3 хвилин. Заповнювачі були підготовлені в насиченому поверхнево сухому стані. Потім до сухих матеріалів додавали розчин лугу і продовжували перемішувати ще близько 4 хвилин для отримання свіжого бетону.

Зі свіжим бетоном можна було працювати до 120 хвилин без будь-яких ознак схоплювання і без погіршення міцності на стиск. Свіжий бетон представлений на рисунку 2.3. Свіжий бетон був залитий у форми відразу після змішування, в три шари для кубічних зразків розміром 100мм x 100мм x 100мм. Для ущільнення зразків по кожному шару було зроблено від 60 до 80 ручних ударів за допомогою качалки.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.3 – Свіжий геополімерний бетон

Затвердіння геополімербетону.

Як правило, рекомендується термічне затвердіння геополімербетону на основі низькокальцієвої золи. Термічне затвердіння суттєво сприяє хімічній реакції, яка відбувається в геополімерній пасті. Час і температура твердіння впливають на міцність геополімербетону на стиск. Час затвердіння варіювався від 4 годин до 96 годин. Довший час затвердіння покращував процес полімеризації, що призводило до підвищення міцності на стиск. Швидкість збільшення міцності була швидкою до 24 годин твердіння, а після 24 годин приріст міцності був лише помірним.

Вища температура твердіння геополімербетону призвела до вищої міцності на стиск. Термічне затвердіння може бути досягнуте як паровим, так і сухим способом. Міцність на стиск геополімербетону сухого твердіння приблизно на 15% більша, ніж у геополімербетону парового твердіння. Температура, необхідна для теплового затвердіння, може становити всього 30°. У тропічному кліматі цей діапазон температур може бути забезпечений умовами навколишнього середовища. Також початок теплового твердіння геополімербетону може бути відкладений на кілька днів. Затримка початку теплового твердіння до п'яти днів не призвела до погіршення міцності на стиск. Навпаки, така затримка початку теплового твердіння суттєво

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищила міцність геополімербетону на стиск. Це може бути пов'язано з геополімеризацією, яка відбувається до початку теплового твердіння.

Затвердіння тестових зразків. Після заливки зразки геополімербетону одразу ж піддавалися твердінню. У цьому дослідженні було використано два типи твердіння, а саме: твердіння в печі та твердіння на відкритому повітрі. При твердінні в печі зразки витримували в печі, а при твердінні при кімнатній температурі – в умовах навколишнього середовища.

Зразки тверділи в печі при температурі 60°C і 100°C протягом 24 годин в печі. Після закінчення періоду затвердіння зразки залишали у формах щонайменше на шість годин, щоб уникнути різкої зміни умов навколишнього середовища. Після виймання зразки залишали сушитися на повітрі в лабораторії до дня проведення випробувань. Зразки, затверділі в печі показані на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Затверділі в печі зразки

2.3. Методики проведення експериментів

Випробування на легкокладальність

Легковкладальність – це властивість свіжозамішаного бетону, яка визначає легкість, з якою він може бути належним чином перемішаний,

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

укладений, ущільнений і оброблений без розшарування. Легкість укладання свіжого бетону вимірювалася за допомогою традиційного випробування на просідання згідно з IS: 1199 (1989). Перед розливанням свіжого бетону у форми, величина осідання свіжого бетону була виміряна за допомогою конуса осідання. У цьому проекті величина осідання свіжого бетону підтримувалася в діапазоні від 30 мм до 40 мм.

Випробування міцності на стиск

Випробування міцності на стиск затверділого геополімерного бетону на основі золи виносу проводилося на стандартній машині для випробування на стиск потужністю 3000 кН, відповідно до IS: 516-1959. Всього було відлито 81 кубічний зразок розміром 100мм x 100мм x 100мм, які були випробувані на міцність на стиск у віці 7 днів, 14 днів і 28 днів. Випробування на міцність на стиск проводили, як показано на рисунку 2.6. Кожне з даних випробувань на міцність на стиск відповідає середньому значенню міцності на стиск трьох тестових бетонних кубиків.



Рисунок 2.6 – Випробування міцності на стиск кубічного зразка

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Результати випробувань на стиск

Було визначено різницю в міцності на стиск зразків геополімербетону для різних співвідношень лужного розчину та золи-виносу, концентрації лужного розчину та умов твердіння через 7, 14 та 28 діб. Результати випробувань наведені в таблицях 3.1-3.4 та наведені на рисунках 3.1-3.7. Результати випробувань показують, що міцність на стиск геополімербетону коливається від мінімального значення 3,2 МПа до максимального 27 МПа. Результати показують, що розвиток міцності пов'язаний з такими змінними, як співвідношення луку та летючої золи, умови твердіння, якими варіювали в дослідженні.

Таблиця 3.1 – Міцність на стиск геополімерного бетону для співвідношення лужного розчину та золи-виносу 0,35

Умови тверднення	Концентрація розчину NaOH (в молях)	Міцність на стиск у різному віці (Н/мм ²)		
		7 днів	14 днів	28 днів
Затвердіння на повітрі	8М	3,2	8,5	14,4
Затвердіння в печі при 60°C	8М	14,6	16,7	20,2
Затвердіння в печі при 100°C	8М	16,9	18,7	22,4

Таблиця 3.2 – Міцність на стиск геополімерного бетону для співвідношення лужного розчину та золи-виносу 0,40

Умови тверднення	Концентрація розчину NaOH (в молях)	Міцність на стиск у різному віці (Н/мм ²)		
		7 днів	14 днів	28 днів
Затвердіння на повітрі	8М	5,8	11,5	16,3
Затвердіння в печі при 60°C	8М	16,2	20,3	21,5
Затвердіння в печі при 100°C	8М	17,7	21,8	24,2

Таблиця 3.3 – Міцність на стиск геополімерного бетону для співвідношення лужного розчину та золи-виносу 0,45

Умови тверднення	Концентрація розчину NaOH (в молях)	Міцність на стиск у різному віці (Н/мм ²)		
		7 днів	14 днів	28 днів
Затвердіння на повітрі	8М	9,4	12,9	18,5
Затвердіння в печі при 60°C	8М	17,4	22,5	24
Затвердіння в печі при 100°C	8М	22,4	24,1	27

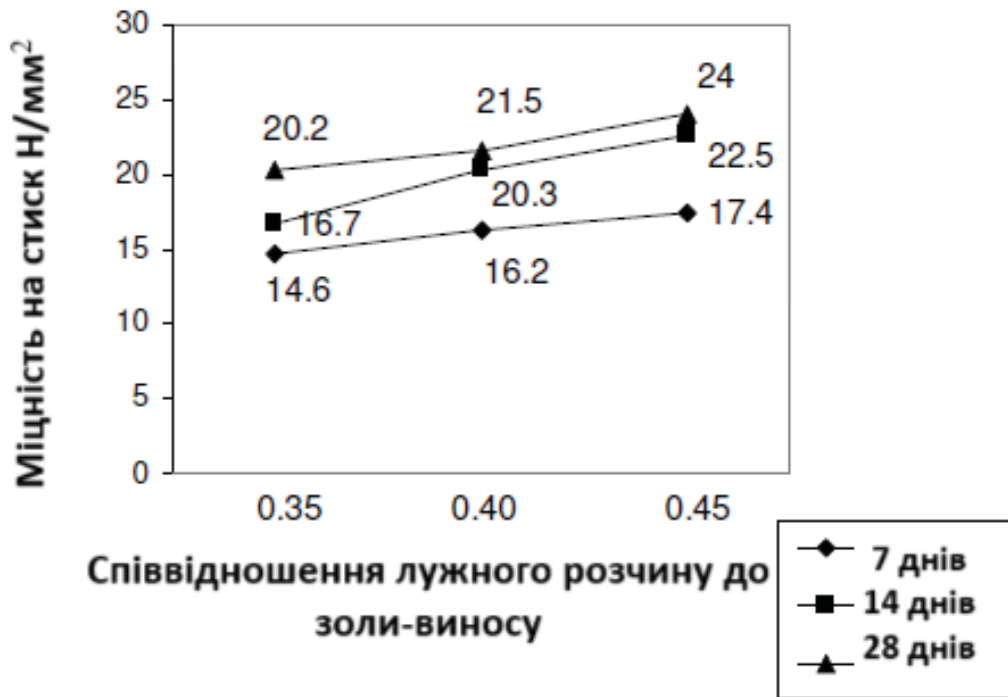


Рисунок 3.1 Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на міцність на стиск бетону витриманого при 60°C

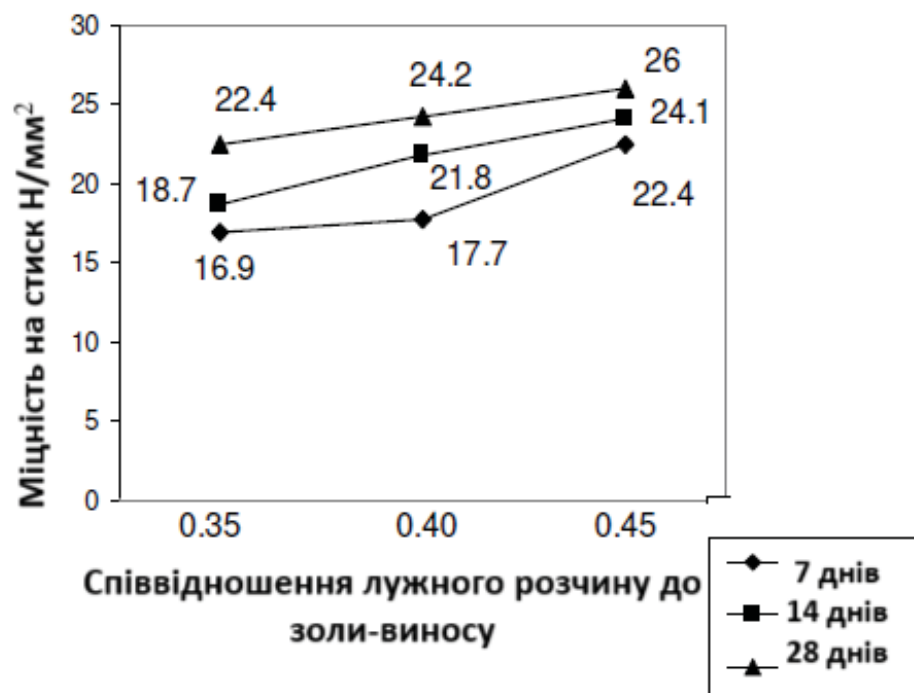


Рисунок 3.2 – Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на міцність на стиск бетону витриманого за 100°C

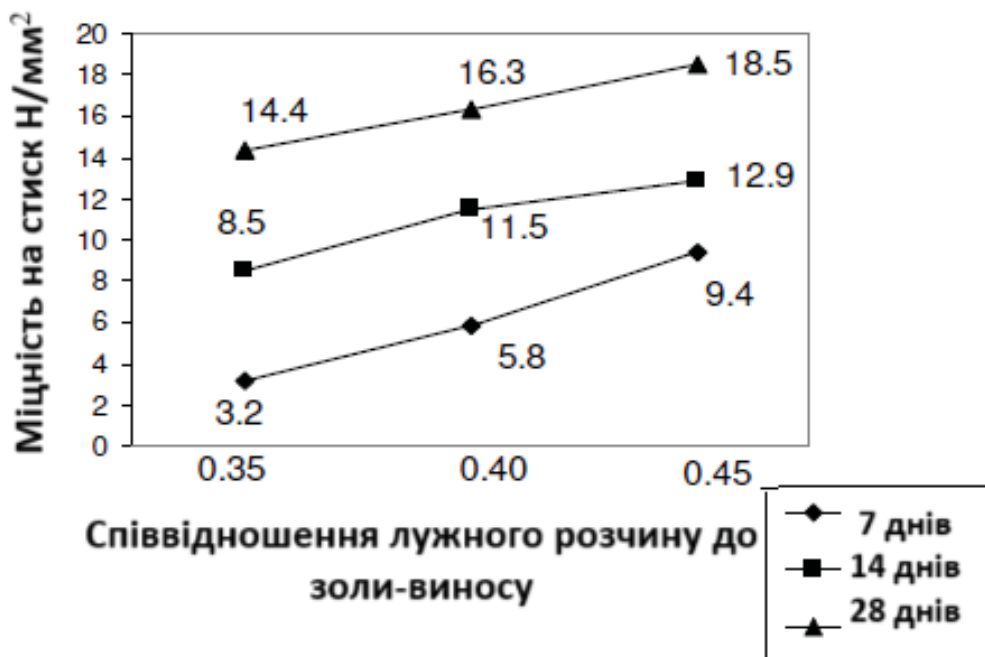


Рисунок 3.3 – Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на міцність на стиск, що твердіє на відкритому повітрі

3.2 Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на властивості геополімерного бетону

Вплив співвідношення лужного розчину та золи-виносу на міцність на стиск зразків геополімербетону наведено в таблиці 3.4 та показано на рисунках 3.1 - 3.3. Масове співвідношення лужного розчину до золи виносу варіювалося в межах 0,35, 0,40 та 0,45. Масове співвідношення лужного розчину до золи має значний вплив на міцність геополімербетону на стиск.

Збільшення міцності на стиск при співвідношенні лужного розчину до золи-виносу 0,40 і 0,45 становило близько 22% і 35% по відношенню до 0,35 відповідно. Збільшення співвідношення лужного розчину до летючої золи підвищувало міцність бетону на стиск незалежно від інших факторів.

Причина збільшення міцності на стиск була виявлена попередніми дослідниками, оскільки при більш низькому співвідношенні лужного розчину

до золи-виносу тільки склоподібні фази в золі-виносі були джерелом Al і Si для утворення алюмосилікатного гелю, а також швидко утворювався продукт реакції, який поглинав частинку золи-виносу і сповільнював подальшу активацію частинок золи-виносу, що призводило до низького і помірного ступенів реакції. Однак, при більш високому співвідношенні лужного розчину до золи кварцова і мулітова фази в золі повністю розчиняються, що збільшує кількість утвореного продукту реакції і, таким чином, підвищує міцність на стиск.

Таблиця 3.4 – Вплив лужних розчинів на міцність на стиск

Концентрація розчину NaOH (в молях)	Співвідношення лужного розчину до летючої золи (за масою)	Міцність на стиск на 28 день (Н/мм ²)		
		Затвердіння на повітрі	Затвердіння в печі при 60°C	Затвердіння в печі при 100°C
8M	0,35	14,4	20,2	22,4
8M	0,40	16,3	21,5	24,2
8M	0,45	18,5	24,0	26,0

Вплив умов тверднення на міцність геополімербетону на стиск для різних співвідношень лужного розчину та золи-виносу зображено на рисунках 3.4-3.6. Міцність на стиск зразків, що тверднули в печі, була вищою, ніж у зразків, що тверднули в природних умовах, незалежно від віку, співвідношення лужного розчину до золи-виносу та концентрації розчину гідроксиду натрію. Результати випробувань показали, що міцність на стиск зразків, затверділих у печі при співвідношенні 0,45, була в 4,5 і 1,25 рази більшою, ніж у зразків, затверділих на відкритому повітрі, через 7 і 28 діб відповідно.

При затвердінні на відкритому повітрі міцність на стиск значно зростає з віком до 28 днів. При твердінні на відкритому повітрі міцність на стиск

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

через 28 діб була приблизно в 3 рази і 1,4 рази вищою, ніж через 7 і 14 діб відповідно. При твердінні в печі міцність на стиск геополімербетону через 7 діб суттєво не збільшилася. При твердінні в печі 28 діб при співвідношенні 0,45 міцність на стиск була приблизно в 1,2 рази і в 1,1 рази вище, ніж через 7 діб і 14 діб відповідно. Оскільки хімічна реакція геополімербетону, що твердіє в печі, обумовлена досить швидким процесом полімеризації, межа міцності на стиск не змінювалася з віком бетону.

Вплив температури тверднення на міцність на стиск показано на рисунку 3.7. Приріст міцності на стиск при твердінні в печі при 100°C становив близько 12% по відношенню до температури твердіння при 60°C. Підвищення температури затвердіння з 60°C до 100°C збільшує межу міцності на стиск, але несуттєво. Виходячи з результатів випробувань, температура твердіння 60°C була рекомендована для бетону, що твердіє в печі, для отримання бажаної міцності на стиск.

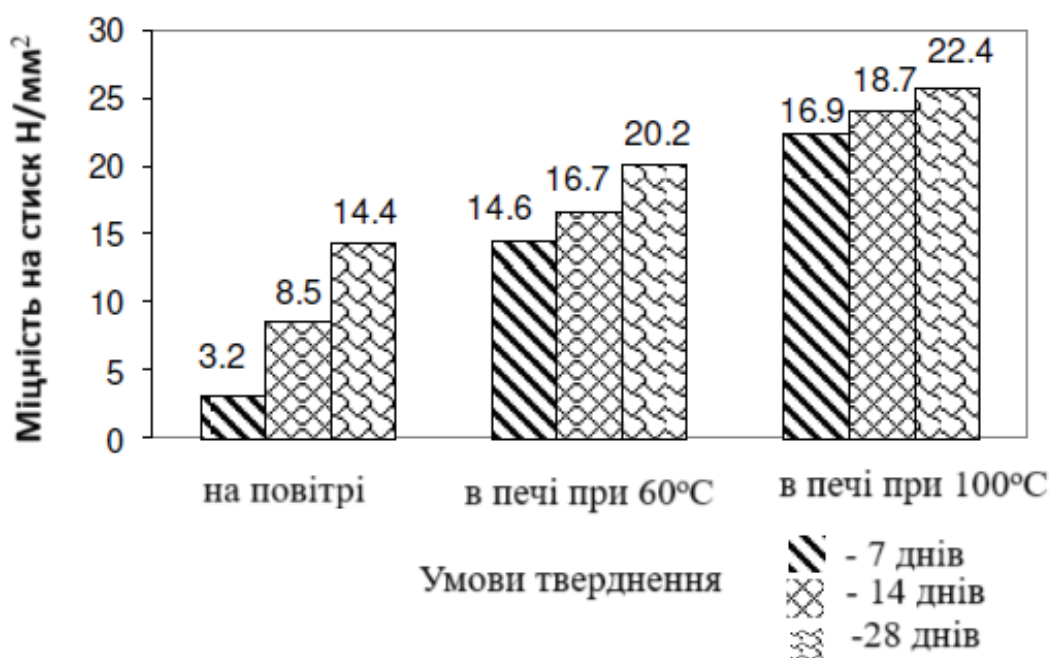


Рисунок 3.4 – Зміна міцності на стиск в залежності від умов твердіння для співвідношення лужного розчину і золи-виносу 0,35

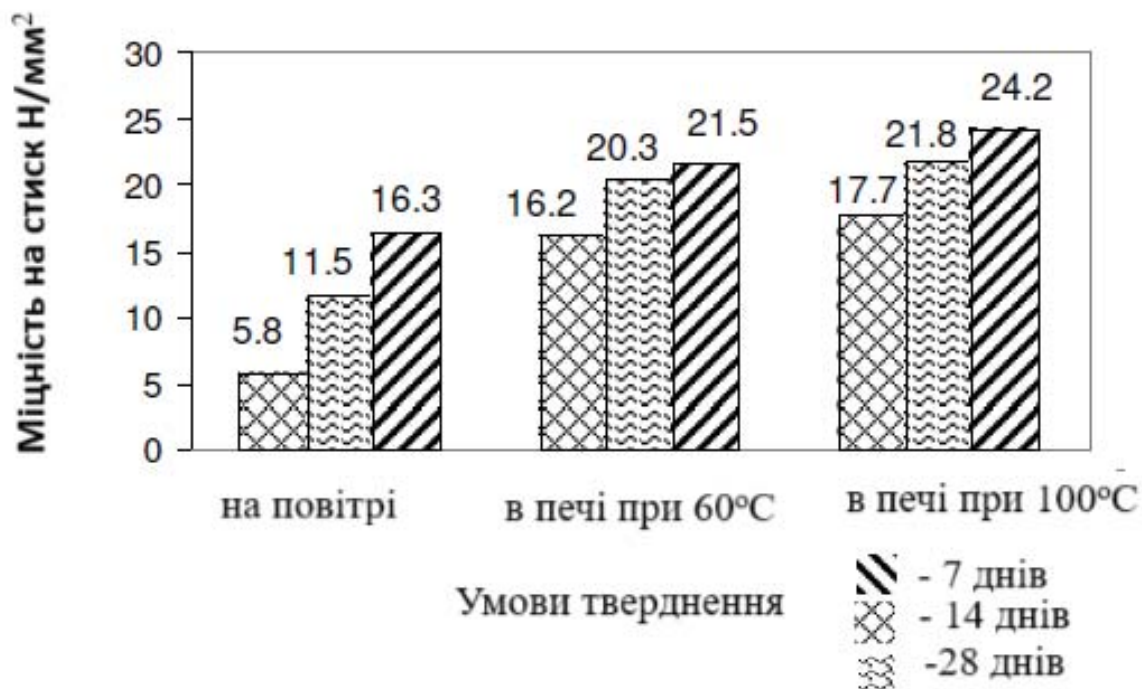


Рисунок 3.5 – Зміна міцності на стиск в залежності від умов твердіння для співвідношення лужного розчину і золи-виносу 0,40

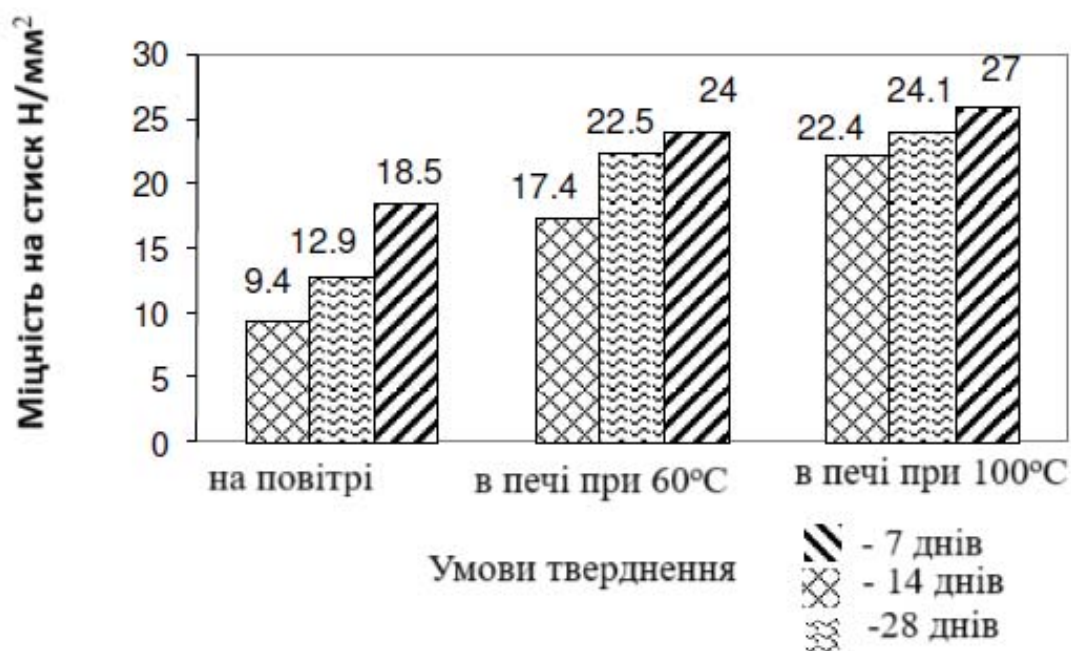


Рисунок 3.6 – Зміна міцності на стиск в залежності від умов твердіння для співвідношення лужного розчину і золи-виносу 0,45

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

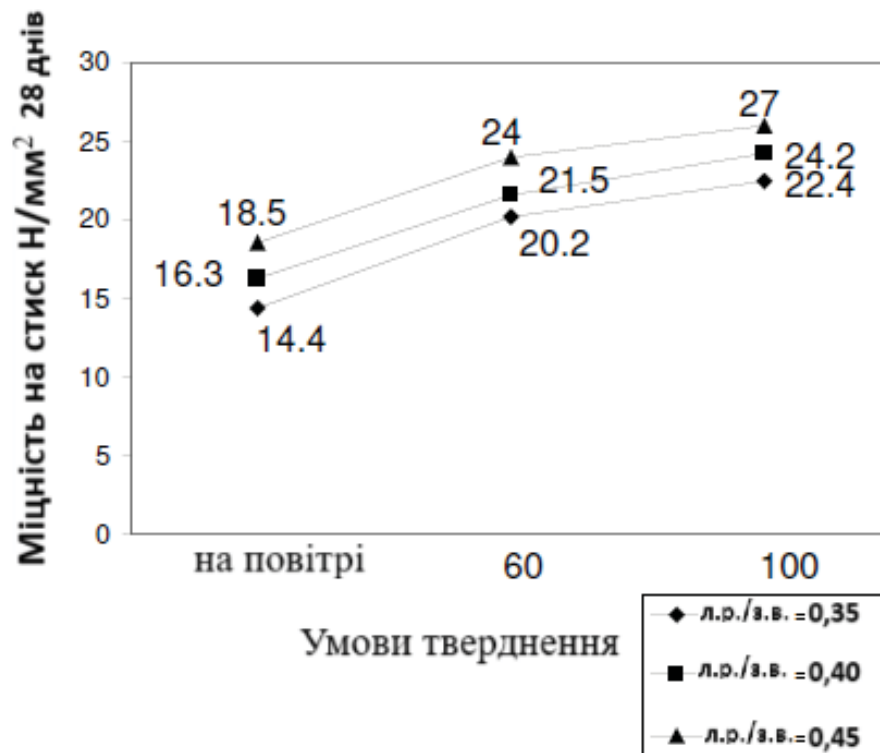


Рисунок 3.7– Зміна міцності на стиск в залежності від співвідношення лужного розчину і золи-виносу

Як видно з рисунків міцність на стиск через 28 діб зразків при 60° та 100° С на 25% та 35% більша, ніж у зразків, що тверднули у природних умовах, при співвідношенні лужного розчину та золи-виносу 0,35.

Міцність на стиск через 28 діб зразків, які тверднули в печі при 60° та 100° С, в 1,3 рази та 1,4 рази більша, ніж у зразків, що тверднули у природному середовищі, при співвідношенні лужного розчину та золи-виносу 0,4.

Міцність на стиск через 28 діб зразків, що тверднули у печі при 60° та 100° С, в 1,3 рази та 1,1 рази більша, ніж у зразків, які тверднули на відкритому повітрі, при співвідношенні лужного розчину та золи-виносу 0,45.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених експериментів можна зробити наступні висновки:

– міцність на стиск геополімерного бетону, який твердів в печі була вищою, ніж у того, що твердів на відкритому повітрі, незалежно від віку, співвідношення лужного розчину та золи-виносу.

– геополімербетон на основі золи-виносу, затверділий в лабораторних умовах, з віком набирає міцності на стиск.

– при затвердінні на відкритому повітрі міцність на стиск через 28 днів приблизно в 3 рази і 1,4 рази вища, ніж через 7 і 14 днів відповідно.

– збільшення співвідношення лужного розчину до золи за масою призводить до збільшення міцності на стиск геополімербетону на основі золи-виносу.

Коли міцність на стиск була побудована в залежності від співвідношення лужного розчину до золи-виносу, співвідношення 0,4 і 0,45 було в 1,8 і 2,9 рази відповідно більше, ніж співвідношення 0,35, а в процентному відношенні воно було на 44% і 66% вище протягом перших 7 днів. Аналогічно, через 14 днів для 0,4 і 0,45 співвідношення було в 1,3 і 1,5 рази більше, ніж 0,35, відповідно, а у відсотковому відношенні - на 26% і 34% більше. Аналогічно, на інтервалі 28 днів для 0,4 та 0,45 співвідношення було в 1,1 та 1,3 рази більше, ніж для 0,35, а у відсотковому відношенні - на 11% та 22% більше відповідно.

– підвищення температури твердіння в діапазоні від 60°C до 100°C призводить до незначного збільшення міцності на стиск геополімербетону на основі золи-виносу.

– геополімерна технологія є найбільш прогресивною у виробництві збірних конструкцій завдяки відносній простоті роботи з чутливими матеріалами (наприклад, високолужними активуючими розчинами). Вона

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також використовується у збірних конструкційних елементах і палубах, та при модернізації конструкцій з використанням геополімерно-волокнистих композитів.

Недоліками геополімербетону є:

- висока вартість лужного розчину;
- ризики пов'язані з лужністю активатора;
- енерговитрати за умови застосування процесу парового/високотемпературного тверднення.

					MP 0224.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47