

**ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ,
МОДИФІКОВАНИХ ОРГАНО-КРЕМНЕЗЕМИСТОЮ ДОБАВКОЮ**

Пушкарьова К.К., д.т.н., професор,
Каверин К.О., асистент,
Київський національний університет будівництва і архітектури
Pushkarova56@gmail.com

Анотація. У статті наведено результати оптимізації складу та структури легких бетонів і досліджено фізико-механічні властивості легкого керамзитобетону на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою. Встановлено, що введення комплексної добавки забезпечує рівномірний набір міцності керамзитобетонів на всіх етапах твердіння, але й збільшенню рухливості при однаковій водопотребі, дозволяє подовжити тривалість збереження життєздатності, зменшити водовідділення і розшарування, а також підвищити ступінь однорідності бетонної суміші, також збільшує водонепроникність, морозостійкість, підвищує коефіцієнти корозійної стійкості, що позитивно впливає на довговічність керамзитобетонів.

Ключові слова: міцність при стиску, полікарбоксилатний суперпластифікатор, мікрокремнезем, комплексна органо-кремнеземиста добавка, високоміцний легкий керамзитобетон.

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОРГАНО-КРЕМНЕЗЕМИСТОЙ ДОБАВКОЙ**

Пушкарева Е.К., д.т.н., профессор,
Каверин К.О., ассистент,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
Pushkarova56@gmail.com

Аннотация. В статье приведены результаты оптимизации состава и структуры легких бетонов и исследованы физико-механические свойства легкого керамзитобетона на основе портландцемента, модифицированного комплексной органо-кремнеземистой добавкой. Установлено, что введение комплексной добавки обеспечивает равномерное набор прочности керамзитобетонов на всех этапах твердения, но и увеличению подвижности при одинаковой водопотребности, позволяет увеличить продолжительность сохранения жизнеспособности, уменьшить водоотделения и расслоения, а также повысить степень однородности бетонной смеси, также увеличивает водонепроницаемость, морозостойкость, повышает коэффициенты коррозионной стойкости, что положительно влияет на долговечность керамзитобетонов.

Ключевые слова: прочность при сжатии, поликарбоксилатный суперпластификатор, микрокремнезем, комплексная органо-кремнеземистая добавка, высокопрочный легкий керамзитобетон.

**OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF LIGHT CONCRETES
MODIFIED BY ORGANIC-SILICA ADDITIVE**

Pushkarova E.K., Doktor of Engineering, Professor,
Kaveryn K.A., Assistant,

Abstract. One of the options for modern efficient high-rise building is lowering the mass of buildings, which continues to remain relevant, especially in modern conditions, due to widespread usage of the cast-in-situ structures, which lead to the increased mass, and it doesn't give possibility to use all the advantages of this technology. The practical way to solve this problem is to develop and use high-strength lightweight concrete, especially expanded clay concretes.

The article presents the results of optimization of the composition and structure of lightweight concretes and the physical and mechanical properties of expanded clay lightweight concrete, based on Portland cement, modified with a complex organic-silica additive. It was found that the introduction of a complex additive to the mix provides uniform strength rising of expanded clay concretes at all stages of hardening, increases water resistance, frost resistance, the coefficients of corrosion resistance, which positively affects the durability of expanded clay lightweight concretes.

Keywords: compressive strength, polycarboxylate superplasticizer, microsilica, complex organic-silica additive, lightweight high-strength concrete.

Вступ. В умовах виготовлення технологічно складних монолітних конструкцій постає питання застосування ефективних легких, високоміцних та литих сумішей, використання яких є одним із ефективних рішень у сучасній будівельній промисловості [1-2]. Отримання таких сумішей неможливо без комплексних добавок на основі суперпластифікаторів та високодисперсних мінеральних речовин, таких як мікрокремнезем.

Однак, завадою широкому використанню таких комплексів у будівництві є висока вартість мікро- та нанокремнезему. В той же час використання тонкомолотих кремнеземистих добавок природного походження за рахунок підвищення їх реакційної здатності дає можливість заміни більш дорогих видів мікрокремнезему, без погіршення властивостей отриманого штучного каменю [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Модифікування цементних матриць комплексними органо-мінеральними добавками є основою не тільки отримання важких високоміцних бетонів, але й легких, в тому числі теплоізоляційно-конструкційних, що мають підвищенні експлуатаційні характеристики.

Проблемам модифікації цементних матриць присвячені роботи Батракова В.Г., Капрієлова С.С., Шейнфельда А.В. [2-3]. Основою цього напрямку є модифікування структури цементного каменю шляхом введення до складу сировинних сумішей мікрокремнезему, окремі фракції якого можуть бути класифіковані як наночастинки. Використання нано- та мікрокремнезему дозволяє в умовах застосування добавок разом з суперпластифікатором істотно прискорювати процеси гідратації і твердіння цементу, забезпечувати високу швидкість нарощування міцності, яка на 28 добу досягає 115...150 МПа, підвищуючи міцність штучного каменю практично у 2 рази [4-6].

В той же час на будівельному ринку з'являються нові види пластифікуючих добавок та високодисперсних кремнеземистих речовин, ефект від сумісної дії яких не завжди є прогнозованим. Подальше використання таких добавок, як правило, потребує перевірки сумісності їх дії не ігноруючи фактори економічної та технічної доцільності.

Мета та завдання роботи. Метою роботи є розробка складів легких бетонних сумішей на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою, та отримання на їх основі високоміцних легких бетонів, що відрізняються високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз відомих інформаційних джерел щодо впливу органічних та мінеральних добавок на властивості легких бетонних сумішей і процеси структуроутворення при твердінні бетону;
- обґрунтувати вибір та визначити властивості сировинних матеріалів, які потрібні для

виконання поставленої задачі та викласти методи проведення досліджень;

– розробити склади комплексної органо-кремнеземистої добавки і дослідити сумісність дії її компонентів при введенні до складу бетонних сумішей;

– дослідити процеси структуроутворення цементних композиції, модифікованих комплексною добавкою, яка включає в себе полікарбоксилатний суперпластифікатор та кремнеземистий компонент у вигляді відходів виробництва, техногенних продуктів різних торгових марок або тонкомеленої кремнеземистої породи;

– оптимізувати склади бетонних сумішей та дослідити властивості бетонних сумішей і бетонів;

– здійснити виготовлення в промислових умовах високоміцних легких керамзитобетонів на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою, та надати техніко-економічне обґрунтування їх ефективності.

Сировинні матеріали. В якості сировинних матеріалів в дослідженнях використовували портландцемент ПЦ І-500Р, керамзитовий гравій різних марок (М400, М500, М600), фракції 5...10 мм, пісок Дніпровський кварцовий, ($M_k=1,21$), полікарбоксилатні суперпластифікатори торгової марки «SikaPlast 555W» та тонкомелену кремнеземисту добавку на основі трепелу Коноплянського родовища з питомою поверхнею ($S_{\text{пит}}=21997 \text{ см}^2/\text{г}$).

Результати досліджень. Попередніми дослідженнями показано, що найбільш ефективно використовувати комплексні добавки [3-6]. Дослідження проводили з використанням комплексу фізико-механічних методів аналізу згідно діючих нормативних документів [7-13]. Контрольні склади керамзитобетонів передбачали витрату наступних компонентів на 1м^3 : цемент ПЦ І 500(Р) – 19%, пісок кварцовий – 57% та керамзитовий гравій відповідних марок (400, 500, 600) – 24%. Міцність контрольного складу на 28 добу складала при використанні відповідних марок керамзитового гравію: М400 – 21,2 МПа, М500 – 25,2 МПа та М600 – 28,4 МПа.

Виходячи з сучасних тенденцій щодо зменшення кількості портландцементу в складі бетону, було виконано оптимізацію складу легкого керамзитобетону, модифікованого комплексною добавкою, що включає в себе тонкодисперсну добавку на основі меленого трепелу та суперпластифікатора із застосуванням трифакторного трирівневого методу планування експерименту, в якому як змінні фактори вибрані витрата портландцементу (200...400 кг, X_1), вміст тонкомеленого трепелу (5%...15%, X_2) та насипна густина керамзитового гравію (М400...М600, X_3) (табл. 1).

Таблиця 1 – Інтервали варіювання та значення змінних факторів

Фактори, вид		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	верхній	середній	нижній	
Витрата цементу, т	X_1	0,4	0,3	0,2	0,1
Витрата трепелу, %	X_2	15	10	5	5
Марка керамзитового гравію (фр.5-10) за насипною густиною	X_3	600	500	400	100

Результати дослідження кінетики набору міцності у часі для оптимізованих складів керамзитобетонів, модифікованих комплексною добавкою з використанням суперпластифікатора «SikaPlast555W», представлені в рис. 1.

В результаті математичної обробки експериментальних даних отримані рівняння регресії, які відображають вплив досліджених факторів на міцність при стиску зразків у різному віці та на їх основі побудовані ізопараметричні діаграми (рис. 1).

Нижче наведено рівняння регресії для оцінки міцності модифікованих керамзитобетонів після твердіння 28 діб, яке з врахуванням коефіцієнтів регресії має

наступний вигляд:

$$f_{ck}^{SikaPlast555W}(28) = 27,02 + 4,56 \cdot x_1 - 0,88 \cdot x_2 + 8,47 \cdot x_3 - 3,14 \cdot x_1^2 - 0,84 \cdot x_2^2 + 5,01 \cdot x_3^2 - 0,38 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,28 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,3 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (1)$$

Аналізуючи ізопараметричні діаграми (рис. 1) зміни міцності при стиску керамзитобетону можна відмітити, що оптимальні значення витрати трепелу складають 10% від маси в'язучої речовини. При введенні комплексної органо-кремнеземистої добавки оптимального складу існує можливість отримання легких керамзитобетонів міцністю при стиску до 50...60 МПа, в той час як міцність контрольного складу не перевищує 28 МПа.

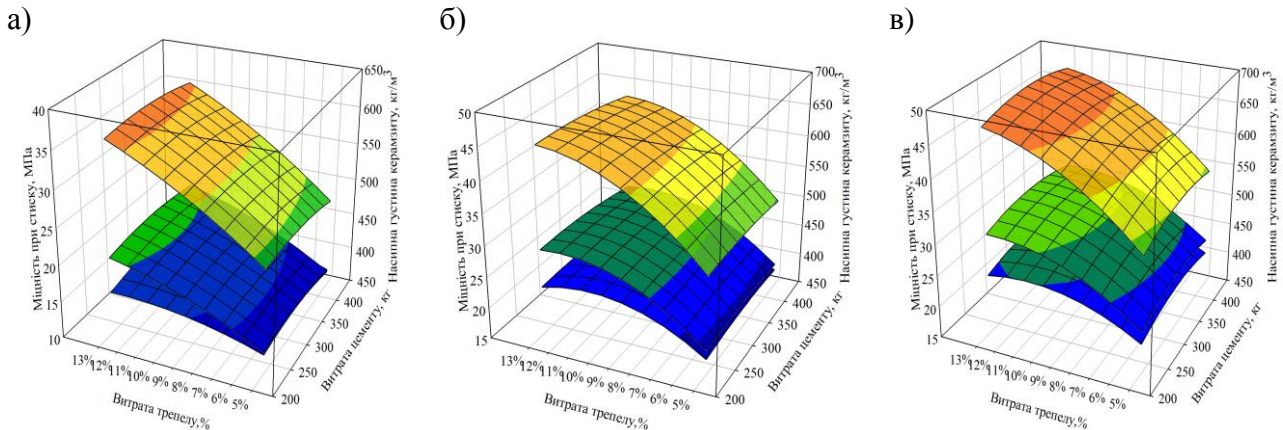


Рис. 1. Ізопараметричні діаграми зміни міцності при стиску зразків на основі портландцементів, модифікованих комплексною органо-кремнеземистою добавкою на основі суперпластифікатора «SikaPlast 555W» в кількості 1,5% та тонкомеленого трепела (5...15%), після твердіння за нормальних умов протягом 3 (а), 28 (б) та 365 (в) діб

Порівняння отриманих результатів дозволяє відмітити, що найбільшими значеннями характеризуються склади керамзитобетону на основі керамзитового гравію (М600), які модифіковані комплексною добавкою, при цьому спостерігається позитивний ефект від її введення, що проявляється у можливості зменшення витрати в'язучої речовини та збільшення міцності при стиску керамзитобетонів порівняно з контрольним складом та складами, що отримані з додаванням тільки полікарбоксилатного суперпластифікатора. Також слід відмітити, що зростання міцності при стиску керамзитобетонів спостерігається протягом усіх термінів випробування.

Як показують попередні дослідження [4-6], ефективність модифікації портландцементних композицій комплексною органо-кремнеземистою добавкою визначається характером зміни мікротвердості контактної зони: “в'язуча речовина – заповнювач”, результати дослідження якої наведено на рис. 2.

Аналіз отриманих даних свідчить, що мікротвердість дослідженого зразка керамзитобетону на основі немодифікованого портландцементу на ділянці шириною 20 мкм від умовної границі зерна заповнювача плавно збільшується від 1300 МПа (заповнювач) до 2100...2300 МПа (цементний камінь), що на 20% більше мікротвердості каменя розчинової частини бетону (рис. 2, склад №1).

Модифікація керамзитобетону добавкою суперпластифікатора “SikaPlast 555W” (рис. 2, склад №2) збільшує мікротвердість на границі із заповнювачем до 2450 МПа, що на 24% більше мікротвердості аналогічної зони контрольного складу.

При введенні комплексної органо-кремнеземистої добавки до складу керамзитобетону (рис. 2, склад № 3) значення мікротвердості на умовній границі зерна заповнювача досягає 2770 МПа, що на 32% більше мікротвердості цементного каменя на умовній границі зерна та на 19% більше мікротвердості цементно-піщаного розчину у міжзерновому просторі

порівняно з контрольним складом. Міцність при стиску такого модифікованого керамзитобетону зростає на 25..30%, порівняно з бездобавочним складом керамзитобетону.

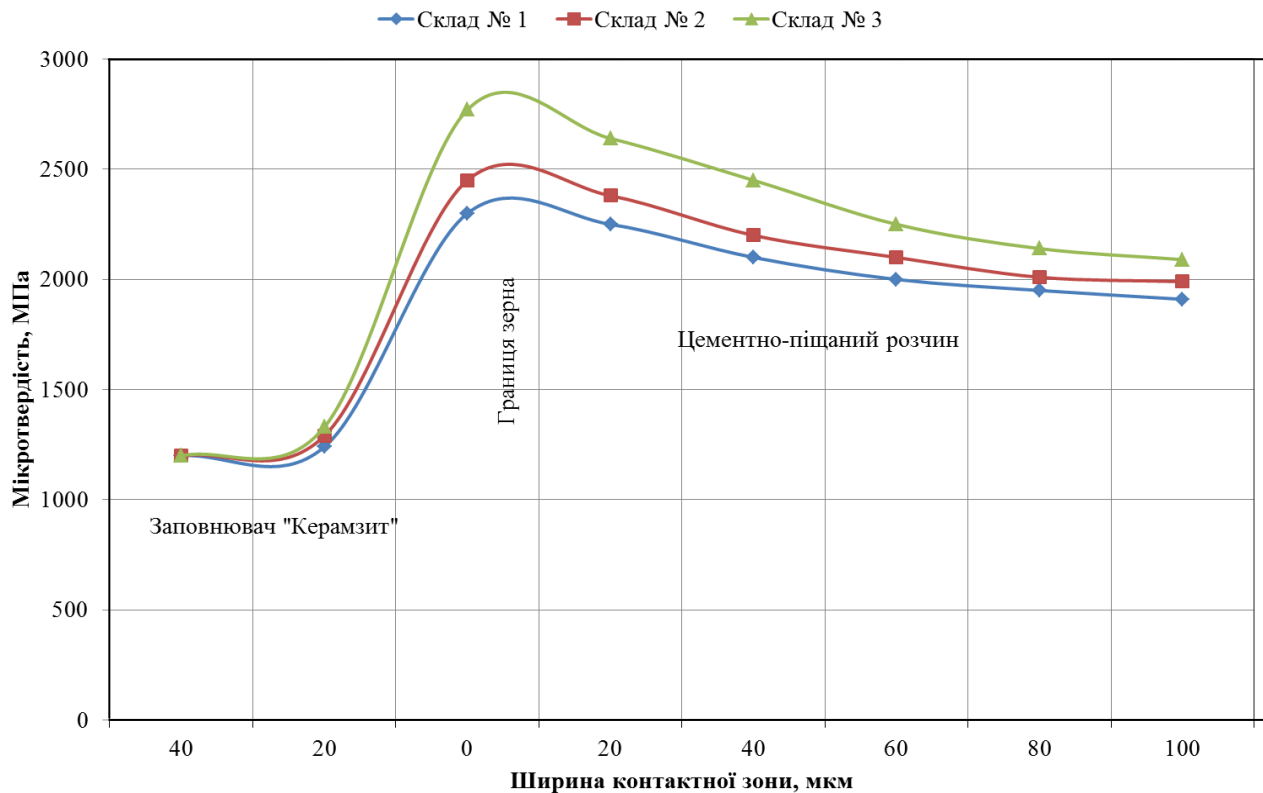


Рис. 2. Зміна мікротвердості контактної зони «в'язуча речовина – заповнювач» для керамзитобетонів: № 1 – контрольний склад; № 2 – модифікований суперпластифікатором “SikaPlast 555W”; № 3 – модифікований комплексною органо-кремнеземистою добавкою на основі цього суперпластифікатора та тонкомеленого трепелу

Міцна структура матеріалу та покращена кінетика нарощування міцності керамзитобетонів на основі портландцементу, модифікованого комплексною добавкою, забезпечується щільним зчепленням та зрощуванням заповнювача з в'язучою речовиною, за рахунок проникнення її в поровий простір зерна заповнювача.

Встановлено, що введення комплексної добавки дозволяє поліпшити технологічні та реологічні властивості керамзитобетонної суміші, що дає можливість використовувати такі бетони для монолітного будівництва. Модифікування керамзитобетону запропонованою добавкою не тільки позитивно впливає на кінетику нарощування міцності у часі, але й забезпечує його довговічність, а саме: водонепроникність збільшується до W8, морозостійкість до F400 та підвищуються коефіцієнти корозійної стійкості K_c в досліджених розчинах сульфатів магнію, натрію та амонію на 10...24%, порівняно з аналогічними показниками для бездобавочних складів.

Оптимізований склад керамзитобетону на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою, в умовах приватного підприємства “Будіндустрія-1” було застосовано для випуску дослідної партії товарного керамзитобетону загальним об'ємом 120 м³, який було використано при будівництві житлового комплексу «Атлант 2».

Висновки та перспективи подальших досліджень. Виконано оптимізацію складів керамзитобетонів за допомогою трифакторного трирівневого методу планування експерименту та встановлено, що найбільшими значеннями міцності при стиску характеризуються склади керамзитобетону на основі керамзитового гравію М600, які модифіковані комплексною добавкою на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора

“SikaPlast 555W” в кількості 1,5% та тонкомеленого трепелу в кількості 10% від маси в'язучої речовини.

Показано, що введення комплексної добавки забезпечує рівномірний набір міцності керамзитобетонів на всіх етапах твердіння, а саме на ранніх етапах включно до 28 діб на 66%, а після 1 року до 60%, збільшує водонепроникність, морозостійкість, підвищує коефіцієнти корозійної стійкості, що позитивно впливає на довговічність керамзитобетонів.

Література

1. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М., Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 380 с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
3. Каприелов С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон, — №6, 1999. – С. 6–10.
4. Ризван С. А. Роль минеральных добавок в высококачественных цементных системах / С.А. Ризван, Т.А. Байер // Бетон и железобетон – пути развития: Науч. тр. II Всероссийской (Международной) конф. по бетону и железобетону. – М.: Дипак, 2005. – Т.3. – С. 727-732.
5. Пушкарьова К.К. Вплив органо-мінеральних добавок на реологічні властивості цементних композицій та їхні фізико-механічні характеристики / К.К. Пушкарьова, О.А. Гончар, К.О. Каверин // Зб. наук. пр. Українського держ. ун-ту залізничного транспорту. – Харків, 2015. – Вип. 155. – С. 124-128.
6. Pushkarova K. K. Research of high-strength cement compositions modified by complex organic-silica additives / K. K. Pushkarova, K. O. Kaverin, D. O. Kalantaevsky // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 5, Iss. 5 (77). – P. 42-51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.51836.
7. Дворкін Л.Й. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів: навчальний посібник / Дворкін Л.Й., Гоц В.І, Дворкін О.Л. — К.: Основа, 2014. – 304 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-96:2000 (ГОСТ 7473-94). Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Технічні умови. – Чинний від 2000-02-23. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2000. – 16 с. – (Державний стандарт України).
9. ДСТУ Б В.2.7-114:2002. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. – Чинний від 2002-07-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2002. – 28 с. – (Державний стандарт України).
10. ДСТУ Б В.2.7-170:2009. Будівельні матеріали. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності [Текст]. – Чинний від 2009-07-01. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 39 с. – (Державний стандарт України).
11. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ). Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови. – Чинний від 2010-04-01. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 109 с. – (Державний стандарт України).
12. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Текст]. – Чинний від 2009-12-22. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 36 с. – (Державний стандарт України).
13. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. – Чинний від 2009-12-22. – Київ: Укрархбудінформ, 2010. – 14 с. – (Державний стандарт України).

Стаття надійшла 11.03.2018