

УДК 691.32; 691.57

## ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ БЕТОНУ ВІД СУЛЬФАТНИХ СЕРЕДОВИЩ

Доктори техн. наук П. В. Кривенко, І. І. Руденко,  
канд. техн. наук О. П. Константиновський

## COATING FOR PROTECTION OF CONCRETE FROM SULFATES

D. Sc. (Tech.) P. V. Krivenko, D. Sc. (Tech.) I. I. Rudenko, PhD (Tech.) O. P. Konstantynovskyi

*Анотація.* Запропоновано захисне покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого для обмеження транспорту іонів  $SO_4^{2-}$  з сульфатних середовищ у структуру бетону як засіб забезпечення пасивного стану сталеві арматури. Показано, що захисне покриття товщиною 3 мм забезпечує повний захист бетону від проникнення сульфатів. При цьому виявлено залежність проникності сульфатів від катіону, яка зменшується в ряду  $(NH_4)_2SO_4 > Na_2SO_4 > MgSO_4$ . За допомогою методів фізико-хімічного аналізу показано, що обмеження транспорту сульфат-іонів захисним покриттям обумовлено їх зв'язуванням лужною алюмосилікатною матрицею в цеолітоподібні новоутворення з додатковим підвищенням їх кристалічності в присутності катіонів  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  та  $Mg^{2+}$  сульфатних солей.

**Ключові слова:** захисне покриття, лужне алюмосилікатне зв'язуюче, сульфатне середовище, корозія сталеві арматури, цеолітоподібні гідроалюмосилікати, оклюдування.

*Abstract.* Durability of reinforced concrete is one of the main demands in civil engineering. Operating conditions, particularly in aggressive mediums, determine durability of constructions. Sulfate mediums are among the most aggressive ones which cause steel reinforcement corrosion. The modern requirements for high consistency fresh concretes are governed by practice. This way the disturbance of reinforcement passive state can be caused by changes in hardened concrete especially in aggressive mediums. Thus, the restriction of  $SO_4^{2-}$  ions transport in concretes, which are obtained from high consistency fresh mixes and exploited in sulfate mediums, can be considered as an actual problem.

The paper is devoted to protection of concrete surface by coating based on alkali-activated aluminosilicate binder from  $SO_4^{2-}$  ions transport to prevent steel reinforcement corrosion. It was shown that the coating with thickness of 3 mm ensures total concrete protection. It was revealed that permeability of concrete depending on cation decreases in the row  $(NH_4)_2SO_4 > Na_2SO_4 > MgSO_4$ . The protective function of coating was simulated by application of mentioned salts as admixtures. Less pH values of water extracts of the binder during hydration while using of 2.5 %  $MgSO_4$  is evidence of advanced crystallinity of zeolite-like sulfate-containing hydroaluminosilicates with participation of  $Mg^{2+}$  ions equal to  $Ca^{2+}$  ions. While content of  $(NH_4)_2SO_4$  was increased up to 5.0 % less pH was fixed due to decelerated formation of zeolite-like minerals. Stability of pH values in presence of  $Na_2SO_4$  (0.5...2.5 %) was caused by no influence on structure formation. Thus, the restriction of  $SO_4^{2-}$  ions transport in protective coating is due to their binding by alkaline aluminosilicate binder in zeolite-like minerals with higher crystallinity due to presence of  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  and  $Mg^{2+}$  cations from sulfates.

**Keywords:** protection coating, alkali-activated aluminosilicate binder, sulfate medium, steel reinforcement corrosion, zeolite-like hydroaluminosilicates, occlusion.

**Вступ.** Забезпечення довговічності залізобетонних конструкцій є однією з головних вимог сучасного будівельного виробництва. Одним з факторів, який визначає довговічність таких конструкцій, є умови їх експлуатації, зокрема вплив агресивних середовищ. Найбільшого руйнівного впливу зазнають будівельні конструкції хімічної та енергетичної галузей промисловості, морські порти, фундаменти мостів та тунелі [1–3] тощо. В агресивних умовах експлуатуються системи каналізації та водовідведення мостів та мегаполісів [4]. Наразі 75 % будівельних конструкцій зазнають руйнівного впливу агресивних середовищ [5].

Одними із найпоширеніших та найагресивніших середовищ, які призводять до корозії сталеві арматури в бетоні, є сульфатні. Це обумовлено наявністю сульфатів практично в усіх видах природних і стічних вод [6]. Показано, що глибина проникнення сульфат-іонів з агресивних середовищ у структуру бетону визначається катіоном сульфатної солі [7]. Сульфат-іони хоча і не призводять до прямої депасивації сталі, однак визначають формування сірководню ( $H_2S$ ) і є каталізаторами процесу окиснення (карбонізації) гідратних новоутворень в'язучих речовин. Очевидно, що при цьому спостерігається зниження значень показника рН порового розчину, який розглядається як основний фактор стійкості пасивуючої плівки на поверхні сталі [8].

Сучасна практика будівництва висуває дедалі вищі вимоги щодо технологічності бетонних сумішей. Виконання цих вимог викликає необхідність у високорухомих бетонних сумішах, що обумовлює зміни в структурі бетону, які можуть спричинювати порушення пасивного стану сталеві арматури, особливо в умовах дії агресивних середовищ. Вказане обумовлює необхідність обмеження транспорту  $SO_4^{2-}$ -іонів у структуру бетонів, що отримані з таких сумішей і функціонують в умовах дії сульфатів [9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру залізобетонних конструкцій може здійснюватись за рахунок їх зв'язування продуктами гідратації цементів. Здатністю до зв'язування характеризуються гідратні новоутворення портландцементів – гідросилікатний C–S–H та гідроалюмосилікатний C–A–S–H гель [10]. Хімічне зв'язування сульфат-іонів можливо також за участю трикальційалюмінату ( $C_3A$ ) і чотирікальційалюмофериту ( $C_4AF$ ) в комплексні сполуки, відомі під загальною назвою AFm ( $Al_2O_3-Fe_2O_3$ -mono) фази, які здатні залучати різні аніони [11].

Підвищення довговічності залізобетонних конструкцій можливо при використанні цементів, які містять гранульований доменний шлак (далі – ГДШ) і виробництво яких відповідає сучасним тенденціям розвитку цементної промисловості [12]. Екологічний ефект від використання шлакових цементів обумовлений зниженням емісії  $CO_2$  за рахунок використання побічних продуктів і відходів виробництва [13]. При збільшенні вмісту ГДШ у складі цементу утворення AFm фаз у продуктах гідратації збільшується, зважаючи на підвищення вмісту  $Al_2O_3$  в системі [14]. Це пояснюється більшою зв'язуючою здатністю AFm фаз порівняно з гідросилікатами кальцію [15].

Найбільш перспективними, з огляду на довговічність залізобетонних конструкцій в агресивних сульфатних середовищах, є шлаколужні цементы (далі – ШЛЦ) [16]. Зв'язування  $SO_4^{2-}$ -іонів у ШЛЦ здійснюється як гідросилікатним C–S–H та гідроалюмосилікатним C–A–S–H гелями, так і лужними гідроалюмосилікатами, які за складом є аналогами природних цеолітів [17]. Відомим є також спосіб зниження вмісту агресивних до сталеві арматури іонів у поровому розчині ШЛЦ шляхом їх зв'язування AFm-фазами, направлено синтезованими у фазовому складі гідратів [18].

Ще одним заходом щодо обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру бетону є ущільнення структури при використанні водоредуруючих поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) [9]. Наразі найбільш ефективними для портландцементних систем водоредууючими добавками є ПАР на основі складних поліефірів [19]. Однак збільшення в складі цементу шлакової складової призводить до зменшення [20] або до повної втрати ефективності ПАР вказаної хімічної природи в ШЛЦ [21]. Запропоновані принципи обґрунтованого вибору молекулярної будови ПАР та комплексних добавок на їх основі різного функціонального призначення для ШЛЦ бетонів [22].

Вказані засоби обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру залізобетону мають враховуватися і комплексно застосовуватися при зведенні споруд. Однак для захисту вже збудованих споруд використовуються захисні покриття, які запобігають проникненню (транспорту) агресивних іонів у структуру бетону та забезпечують пасивний стан сталеві арматури. Розрізняють різні види захисних покриттів: для покриття поверхні бетону; герметики пенетруючої дії, які забезпечують ущільнення порової структури; просочувальні [9]. Наприклад, у ШЛЦ бетонах для просочування можуть використовуватися водні розчини хлоридів, нітратів та сульфатів лужноземельних металів ( $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ), які зв'язують вільний луг у нерозчинні з'єднання, що сприяє ущільненню та підвищенню непроникності цементного каменю [23].

Відомим є використання неорганічних захисних покриттів на основі лужних в'язучих речовин для запобігання транспорту агресивних іонів у структуру бетону і забезпечення тим самим пасивного стану сталеві арматури [24]. Науковою школою НДІВМ ім. В. Д. Глуховського запропоновано захисні покриття на основі

лужного алюмосилікатного зв'язуючого, підвищена довговічність яких обумовлена формуванням у складі продуктів гідратації новоутворень, які за складом є аналогами природних мінералів типу цеолітів та фельдшпатоїдів [16]. Використання лужного алюмосилікатного зв'язуючого формули  $(0.8Na_2O+0.2K_2O) \cdot Al_2O_3 \cdot 4.5SiO_2 \cdot nH_2O$  (де R – Na, K) як основи захисного покриття забезпечує формування високих експлуатаційних властивостей, водостійкість та довговічність, які обумовлені утворенням гідратних новоутворень у вигляді гейландит-Na і гейландит-K ( $Na_6Si_{27}Al_{36}O_{72} \cdot 24H_2O$  і  $K_6Si_{27}Al_{36}O_{72} \cdot 24H_2O$  відповідно), філіпсіт ( $3Al_6Si_{10}O_{32} \cdot 12H_2O$ ), шабазит ( $Al_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$ ) і фожазит ( $(Na_2, Ca, Mg)_{3.5}(Al_7Si_{17}O_{48}) \cdot 32(H_2O)$ ) [25]. Необхідний напрямок в структуроутворенні забезпечується при співвідношенні оксидів у системі  $SiO_2/Al_2O_3 = 4.5$  та  $R_2O/Al_2O_3 = 1.0$  [26].

Можна передбачити, що при взаємодії такого покриття з сульфатними середовищами  $SO_4^{2-}$ -іони будуть зв'язуватись цеолітоподібними новоутвореннями, що сприятиме обмеженню їх проникнення в захищений бетон.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження можливості захисту бетону, який експлуатується в сильноагресивних сульфатних середовищах, покриттям на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого.

Для досягнення мети вирішувалися такі задачі:

- дослідити залежність транспортних властивостей бетону від товщини захисного покриття та катіону сульфатного середовища;
- обґрунтувати стійкість захисного покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого в сульфатних середовищах з точки зору зв'язування іонів  $SO_4^{2-}$ .

**Сировинні матеріали.** Основу покриття подано лужним алюмосилікатним зв'язуючим загальної формули  $(0.8\text{Na}_2\text{O}+0.2\text{K}_2\text{O})\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4.5\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Як інгредієнти алюмосилікатної складової зв'язуючого використано:

- метакаолін (Дерманківське родовище, Україна) (вміст оксидів, %: CaO – 0.27, SiO<sub>2</sub> – 53.67, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 43.61, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.77, Na<sub>2</sub>O – 0.25; в.п.п. – 0.50 %), питома поверхня  $S_{\text{пит}} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$  (за Блейном);

- трепел (Коноплянське родовище, Україна) (вміст оксидів, %: CaO – 0.86, SiO<sub>2</sub> – 88.40, TiO<sub>2</sub> – 2.10, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6.40, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3.25, MgO – 0.98, Na<sub>2</sub>O – 0.69, SO<sub>3</sub> – 0.40; в.п.п. – 0.20 %), питома поверхня  $S_{\text{пит}} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$  (за Блейном);

- зола-винесення (Ладжинська ТЕЦ, Україна) (вміст оксидів, %: CaO – 2.86, SiO<sub>2</sub> – 50.94, TiO<sub>2</sub> – 0.94, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 24.56, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13.25, MgO – 1.98, Na<sub>2</sub>O – 0.69, SO<sub>3</sub> – 0.40; в.п.п. – 1.64 %), фракція  $\leq 0,16 \text{ мм}$ .

Лужний компонент зв'язуючого подано натрієвим рідким склом з силікатним модулем  $M_c = 2.8$  і густиною  $1430 \text{ кг/м}^3$ .

Як наповнювачі використано піски кварцові фракцій  $0...0,315 \text{ мм}$  та  $0,315...0,63 \text{ мм}$ .

Як добавки (дозування у відсотках від маси лужного алюмосилікатного зв'язуючого) використано:

- тринатрійфосфат натрію  $\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (2.0 %) згідно з CAS № 7601-54-9;

- глюконат натрію (1.0 %) згідно з CAS № 527-07-1.

Водоутримувальну здатність при необхідній консистенції розчинової суміші забезпечено карбоксиметилцелюлозою («Gabrosa HV» AkzoNobel, Нідерланди), витрата 0,1 % від маси матеріалу покриття.

**Методи досліджень.** Окремо готували рідку та суху частину розчинової суміші лужного алюмосилікатного покриття. Рідка частина (лужний розчин) складається з рідкого натрієвого скла та води; суха частина – усі сухі компоненти

зв'язуючого та наповнювачі. Після приготування рідкої та сухої частини матеріалу їх ретельно сумісно перемішували за допомогою змішувача типу НОВАРТ.

Для визначення ефективності захисне покриття наносили на бокові поверхні зразків дрібнозернистого бетону  $40\times 40\times 160 \text{ мм}$  (портландцемент:пісок – 1:3, В/Ц=0.5).

Ефективність захисного покриття в залежності від його товщини оцінювали за глибиною проникнення сульфат-іонів з агресивного середовища.

Покриття наносили на бокові поверхні затверділих зразків бетону різним шаром (1, 2, 3 мм) та витримували впродовж 28 діб за умов  $t = 20\pm 2^\circ\text{C}$  та  $W = 60\pm 5\%$ . Після цього зразки, як захищені покриттям, так і незахищені (для порівняння), розміщали в вертикальному положенні в воді (контрольні) та в водних розчинах сульфатів натрію, магнію та амонію (концентрація в перерахунку на  $\text{SO}_4^{2-} = 30000 \text{ мг/л}$ ). За концентрацією сульфат-іонів вказані середовища відповідають, згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008, найбільш високому класу хімічної агресії – ХА3.

Для визначення проникнення сульфат-іонів з агресивного середовища зразки бетону після витримання впродовж 360 діб в агресивних розчинах розрізали. Глибину проникнення приймали ту, на якій за допомогою електронно-зондового аналізу виявляли групи  $\text{SO}_3$ .

Для моделювання роботи захисного покриття під впливом сульфатних середовищ досліджено зміни показника рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого з добавками сульфатів впродовж перших 4 год гідратації. Вимірювання здійснювали за допомогою лабораторного приладу «EZODO PL-700AL» для аналізу параметрів води.

Зондовий аналіз здійснювали на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі РЕММА 102-02.

**Основна частина дослідження.** На рис. 1 показано вплив виду агресивного

середовища на бетон за глибиною проникнення сульфат-іонів. Виявлено, що незахищений бетон у залежності від катіону солі характеризується глибиною проникнення сульфат-іонів у межах 5.8...7.6 мм, натомість захищений – 0.1...1.5 мм в залежності від товщини шару покриття. Покриття товщиною 1 мм визначає обмеження глибини проникнення до 1,3...1,5 мм. Збільшення товщини покриття до 3 мм практично унеможлиблює транспорт сульфат-іонів у структуру бетону, що підтверджують результати зондового

аналізу. Так, вміст сульфатів на глибині 0,1 мм зразків незахищеного бетону в перерахунку на SO<sub>3</sub> становив 4.0 % (рис. 2), захищеного покриттям товщиною 3 мм – 0.0 % (рис. 3).

Згідно з результатами дослідження, спостерігається закономірність у зменшенні проникності захищеного бетону щодо сульфат-іонів у ряду (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>MgSO<sub>4</sub>, яка пояснюється хімічною активністю катіону цих солей.

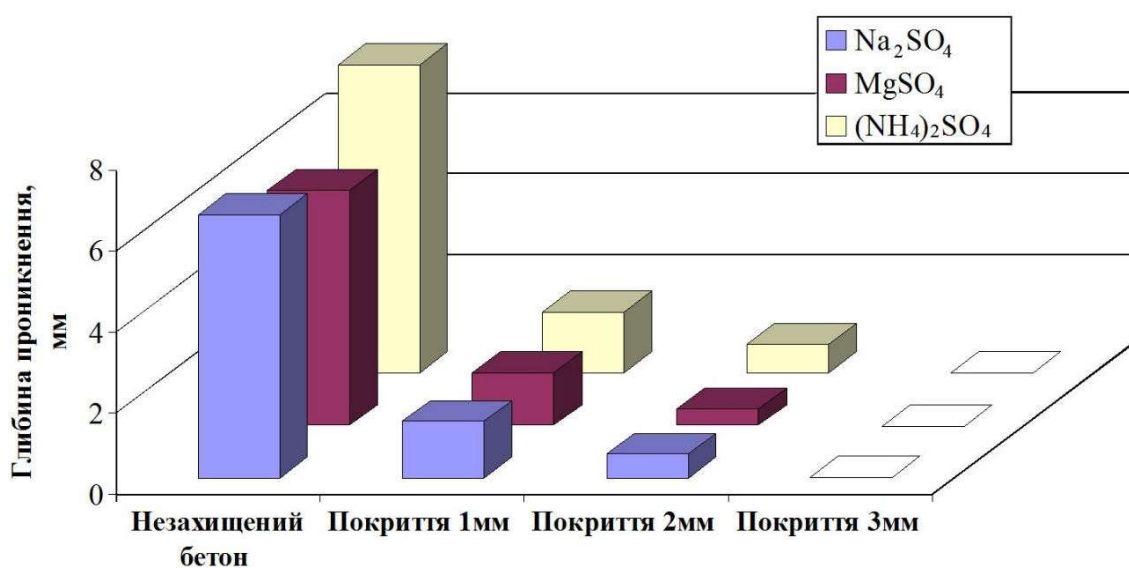


Рис. 1. Глибина проникнення сульфатів у бетон після 360 діб

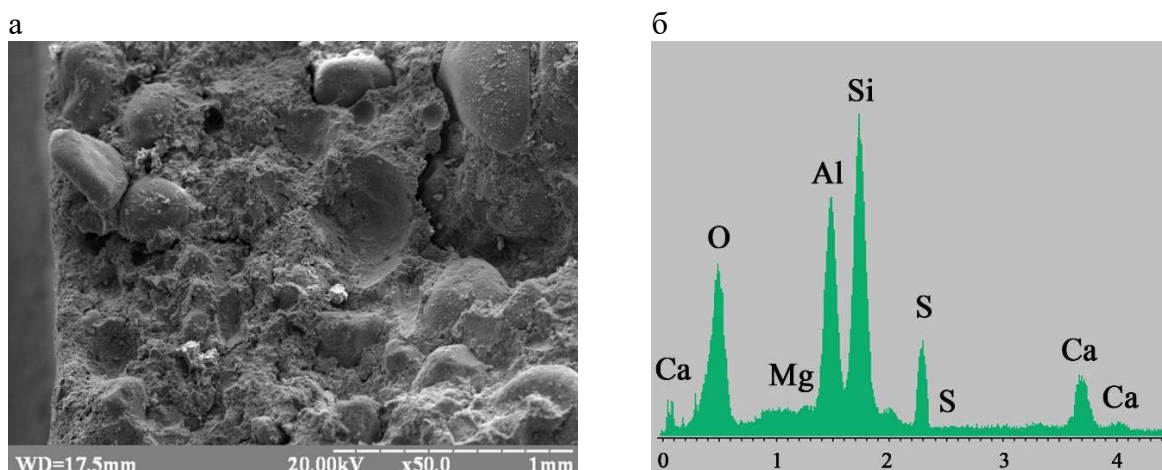


Рис. 2. Електронні мікрофотографії поверхні сколу (а) і зондовий аналіз (б) зразка незахищеного бетону після витримування впродовж 360 діб у розчині сульфату натрію

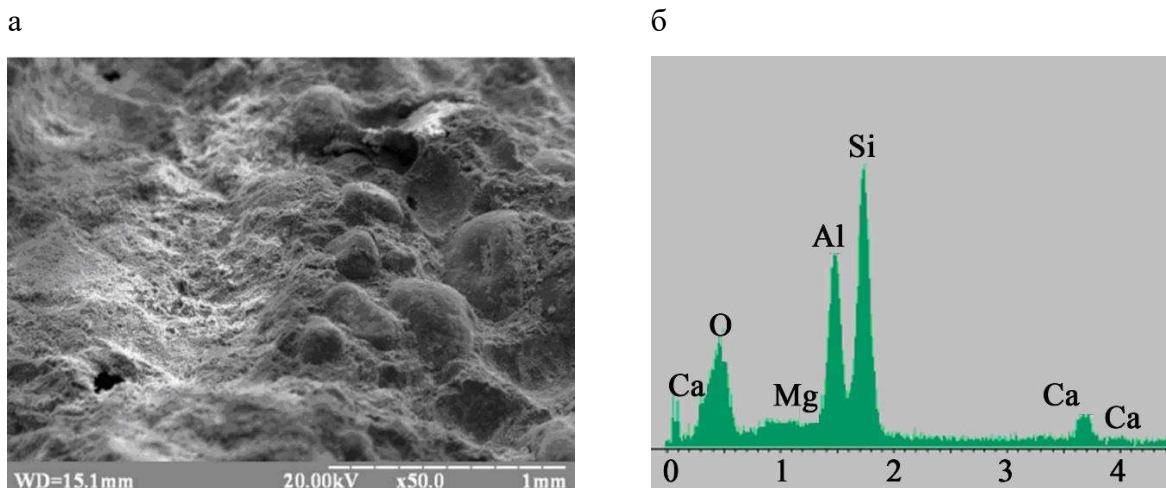


Рис. 3. Електронні мікрофотографії поверхні сколу (а) і зондовий аналіз (б) зразка захищеного бетону (товщина покриття – 3.0 мм) після витримування впродовж 360 діб у розчині сульфату натрію

За зміною показника рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого підтверджено зв'язування іонів  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  в структурі цеолітоподібних новоутворень при взаємодії сульфатного середовища з захисним покриттям на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого (рис. 4).

Так, наприклад, добавка солі  $\text{MgSO}_4$  при витраті на рівні 2.5 % визначає зменшення показника рН у порівнянні з контрольним складом (рис. 4, а). Це свідчить про інтенсифікацію процесів гідратації лужного алюмосилікатного зв'язуючого і кристалізацію цеолітоподібних гідроалюмосилікатів за нормальних температур. Іони  $\text{Mg}^{2+}$  на рівні з іонами  $\text{Ca}^{2+}$  беруть участь у їх формуванні із зв'язуванням сульфат-іонів. Тенденція до зменшення значень рН у випадку добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  простежується вже при витраті на рівні 5 %, що свідчить про перебіг структуроутворення в тому ж напрямку, але з сповільненням з огляду на меншу концентрацію в системі лужно-земельних металів і формуванням інших типів цеолітоподібних структур (рис. 4, б). Добавка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  практично не змінює

інтенсивність структуроутворення з огляду на відсутність катіонного обміну, про що свідчить стабільність значень показника рН (рис. 4, в).

Стійкість запропонованого покриття в сульфатних середовищах може бути обґрунтована формуванням цеолітоподібних новоутворень, які містять іони  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Так, обмін аніонів  $\text{OH}^-$  на аніони  $\text{SO}_4^{2-}$  може призводити до утворення таких мінералів, як канкриніт  $(\text{Na,Ca})_8(\text{Al}_6\text{Si}_6)\text{O}_{24}(\text{CO}_3,\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , б'якелайт  $(\text{Na,Ca,K})_8(\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{0.5} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , францініт  $(\text{Na,K})_6\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  тощо. У свою чергу, обмін катіонів  $\text{Na}^+$  на катіони  $\text{NH}_4^+$  або  $\text{Mg}^{2+}$  може призводити до синтезу таких фаз як гейландит- $\text{NH}_4$   $[(\text{NH}_4)_2\text{Ca}]_2\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , шабазит- $\text{Na}$   $[(\text{NH}_4)_2\text{Ca}]\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , томсоніт- $\text{NH}_4$   $(\text{Na,NH}_4)\text{Ca}_2[\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , фожазит- $\text{Mg}$   $(\text{Mg,Na}_2,\text{Ca})_{3.5}[\text{Al}_7\text{Si}_{17}\text{O}_{48}] \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , шабазит- $\text{Mg}$   $(\text{Mg}_{0.7}\text{K}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.1})[\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , фер'ерит- $\text{Mg}$   $(\text{Mg,Na}_2,\text{K}_2,\text{Ca})_{3-5}\text{Mg}[\text{Al}_{5-7}\text{Si}_{27.5-31}\text{O}_{72}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  [27].

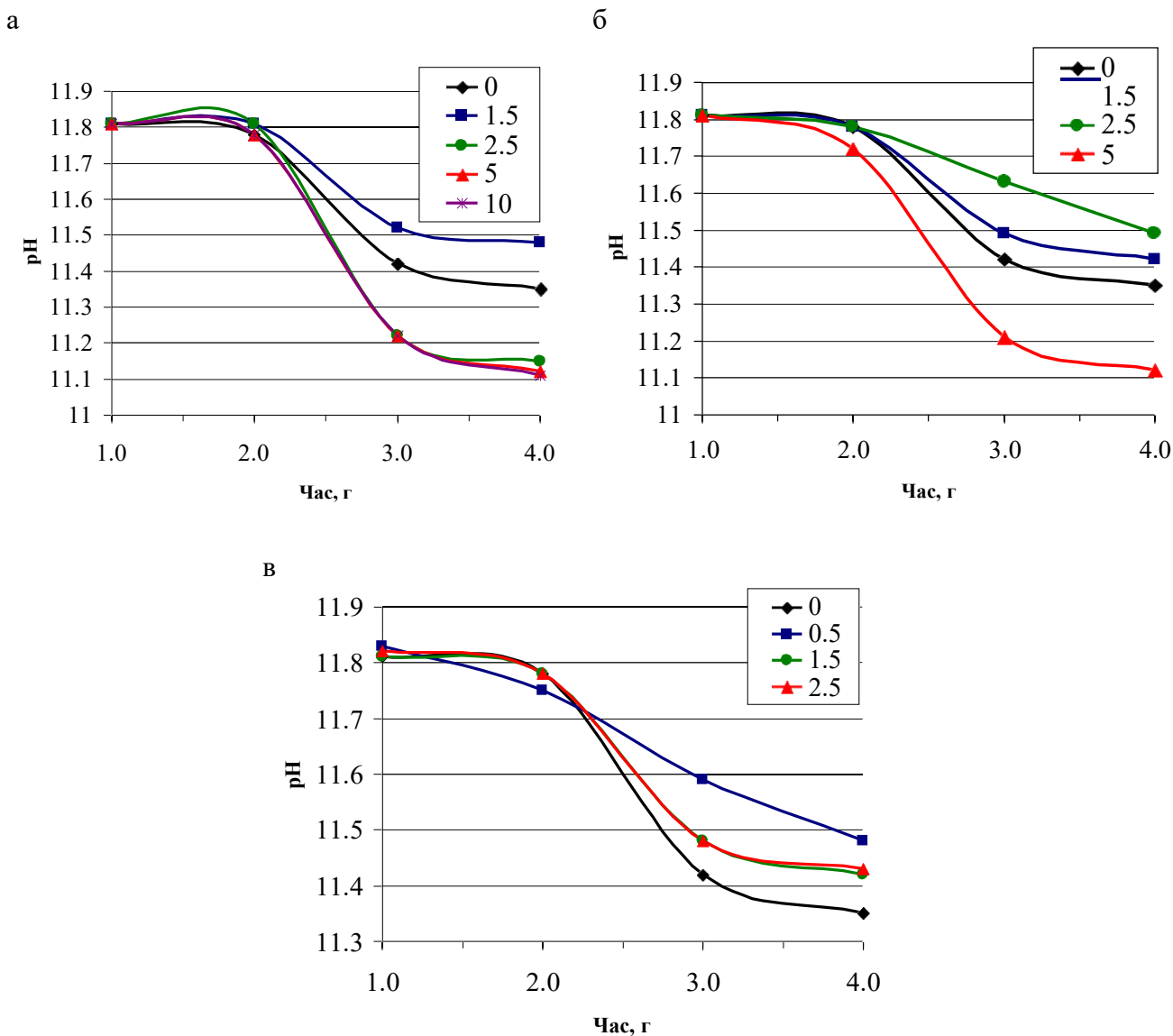


Рис. 4. Вплив вмісту добавок  $MgSO_4$  (а),  $(NH_4)_2SO_4$  (б) і  $Na_2SO_4$  (в) на зміну рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого в часі

Обмеження транспорту іонів  $SO_4^{2-}$  обумовлено не тільки їх зв'язуванням в цеолітоподібні новоутворення, а і з додатковим підвищенням ступеня кристалізації в присутності катіонів  $NH_4^+$ ,  $Mg^{2+}$ , що підтверджується результатами електронної мікроскопії (рис. 5).

Проведено дослідно-промислове впровадження розроблених захисних покриттів при виконанні будівельних робіт з реконструкції корпусу Києво-Печерської

Лаври для захисту від корозії ростверків підсилення, які зазнавали впливу сульфатного середовища класу ХА3 (рис. 6). В результаті обстеження виявлено, що стан покриття (повнота затвердіння, відсутність тріщин, слідів підтікання, сторонніх включень тощо) та його експлуатаційні властивості (міцність зчеплення з бетоном) відповідають вимогам національних стандартів України [28, 29].

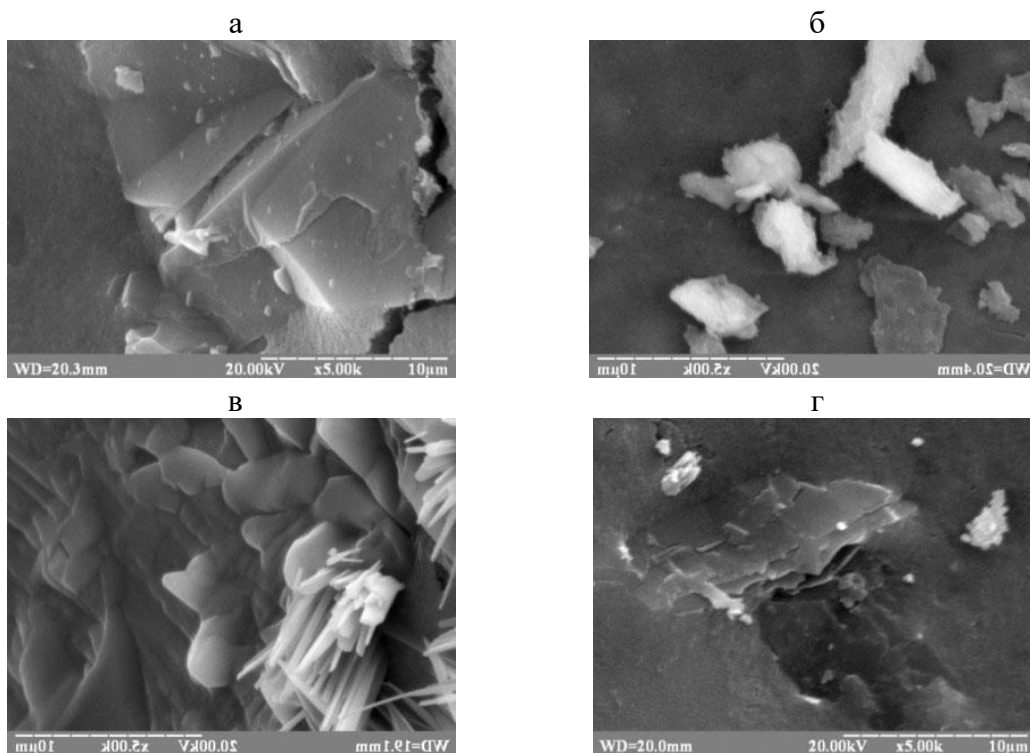


Рис. 5. Електронні мікрофотографії поверхні сколу зразків лужного алюмосилікатного зв'язуючого немодифікованого (а) та модифікованого добавками 2.5 % сульфату магнію (б), амонію (в) та натрію (г) після тверднення впродовж 180 діб у нормальних умовах

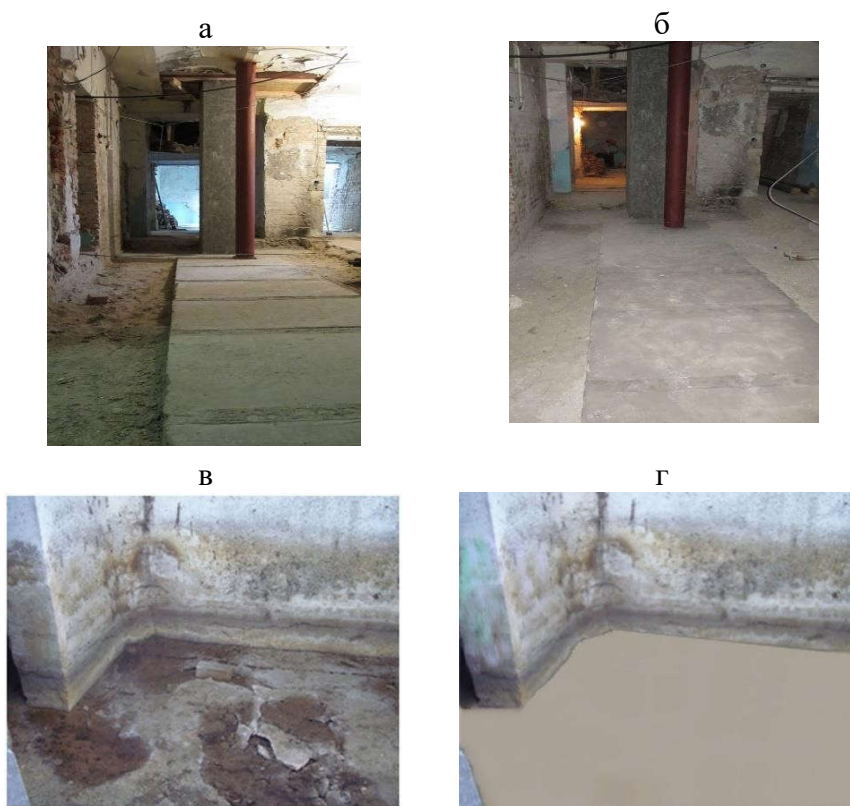


Рис. 6. Фотографії поверхні бетону ростверка: а, в – до нанесення захисного покриття; б, г – захищеного покриттям



### Висновки

1. Захист бетону, який експлуатується в сильноагресивних сульфатних середовищах, від транспорту сульфат-іонів забезпечується нанесенням покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого.

2. Повний захист бетону забезпечується покриттям товщиною 3 мм при зменшенні транспортних властивостей щодо сульфатів у ряду  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgSO}_4$ .

3. Обмеження транспорту іонів  $\text{SO}_4^{2-}$  обумовлено як їх зв'язуванням у цеолітоподібні новоутворення з додатковим

підвищенням ступеня кристалізації в присутності катіонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  та  $\text{Mg}^{2+}$ , так і їх оклюдуванням у вже сформованій структурі захисного покриття.

**Подяка.** Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконується в рамках бюджетного фінансування № 1020U001010, а також за розвиток теми досліджень за програмою наукового співробітництва COST Action CA15202 SARCOS «Self-Healing concrete: the path to sustainable construction», яка діє в рамках проекту європейського рівня HORIZON 2020, [http://www.cost.eu/COST\\_Actions/ca/CA15202](http://www.cost.eu/COST_Actions/ca/CA15202).

### Список використаних джерел

1. Kitsutaka Y., Tsukagoshi M. Method on the aging evaluation in nuclear power plant concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 269. P. 286-290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.08.041>.
2. Yi Y., Zhu D., Guo S., Zhang Z., Shi C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. 103695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>.
3. Liu Q., Huang M., Jin F. Study on durability and service life of concrete structure of coastal tunnel. *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*. 2018. Vol. 42(6). P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291.2018.06.001>.
4. Sulikowski J., Kozubal J. The Durability of a Concrete Sewer Pipeline under Deterioration by Sulphate and Chloride Corrosion. *Procedia Engineering*. Vol. 153. P. 698-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.229>.
5. Quraishi M., Nayak D., Kumar R., Kumar V. Corrosion of Reinforced Steel in Concrete and Its Control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*. 2017. Vol. 03(01). DOI: <https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000124>.
6. Xu P., Jiang L., Guo M.Z., Zha J., Chen L., Chen C., Xu N. Influence of sulfate salt type on passive film of steel in simulated concrete pore solution *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223 (2019). P. 352-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.209>.
7. Киричок В. І. Лужні алюмосилікатні зв'язуючі з підвищеною сульфатостійкістю та покриття на їх основі для захисту бетону: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Київ, 2018. 22 с.
8. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / Oxford, UK: John Wiley & Sons. 2013.
9. Goyal A., Pouya H.S., Ganjian E., Claisse P. A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. P. 5035-5055. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2>.
10. Ke X., Bernal S.A., Provis J.L. Chloride binding capacity of synthetic C-(A)-S-H type gels in alkali-activated slag simulated pore solutions. *1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*. 2017. P. 1-7.

11. Baquerizo L.G., Matschei T., Scrivener K.L., Saeidpour M., Wadsö L. Hydration states of AFm cement phases. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 73. P. 143-157. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.011>.
12. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite, and limestone. *Cement, Wapno, Beton*. 2020. Vol. 2020(5). P. 416-427. DOI: <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.5.7>.
13. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fic S., Ivashchyshyn H. Sustainable low-carbon binders and concretes. *E3S Web Conf*. 2020. Vol. 166. 06007. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606007>.
14. Maes M., Gruyaert E., De Belie N. Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion. *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46. P. 89-103.
15. Khan M.S.H., Kayali O. Chloride binding ability and the onset corrosion threat on alkali-activated GGBFS and binary blend pastes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2018. Vol. 8. P. 1023-1039. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1230522>.
16. Krivenko P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017. Vol. 8. P. 323-334. DOI: <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>.
17. Akimkhan A. Structural and Ion-Exchange Properties of Natural Zeolite. *Ion Exchange Technologies*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/51682>.
18. Krivenko P., Rudenko I., Konstantynovskiy O. Design of slag cement, activated by Na(K) salts of strong acids, for concrete reinforced with steel fittings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (6 - 108). P. 26-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217002>.
19. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Изд. 2-е. Москва: Технопроект, 1998. 768 с.
20. Нікіфоров О. П. Важкі бетони на шлаковміщуючих в'яжучих з комплексними модифікаторами: монографія. Дніпропетровськ: Пороги, 1996. 232 с.
21. Palacios M., Houst Y.F., Bowen P., Puertas F. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39(8). P. 670-677. DOI: <https://10.1016/j.cemconres.2009.05.005>.
22. Руденко І. І. Наукові основи управління процесами структуроутворення пластифікованих розчинів і бетонів на основі лужних цементів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05. Київ, 2021. 44 с.
23. Чернявский В. Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2008. 412 с.
24. Balaguru P., Nazier M., Arafa M. Field implementation of geopolymer coatings. Project report of Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). Civil and Environmental Engineering Piscataway, NJ: Rutgers State University, 2008.
25. Kryvenko P., Guzii S., Kovalchuk O., Kyrychok V. Sulfate Resistance of Alkali Activated Cements. *Materials Science Forum*. 2016. Vol.865. P. 95-106. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.865.95>.
26. Kryvenko P., Kyrychok V., Guzii S. Influence of the ratio of oxides and temperature on the structure formation of alkaline hydro-aluminosilicates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5 (83). P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79605>.
27. Xu R., Pang W., Yu J., Huo Q., Chen J. Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2007. 679 p.

28. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 «Захист бетонних та залізобетонних конструкцій від корозії». Київ, 2010. 77 с.

29. ДСТУ-Н Б В.2.6-186:2013 «Настанова щодо захисту будівельних конструкцій будівель та споруд від корозії». Київ, 2013. 29 с.

---

Кривенко Павло Васильович, докт. техн. наук, професор, директор Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Тел.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Руденко Ігор Ігорович, докт. техн. наук, пров. наук. співроб. Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Тел.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Константиновський Олександр Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Тел.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Kryvenko Pavlo Vasylovych, DSc (Eng), Prof., Director, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Tel.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Rudenko Igor Igorevych, DSc (Eng), leading researcher, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Tel.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Konstantynovskyi Oleksandr Petrovych, PhD (Eng), Associate Professor, technology of building constrictions and products (ТВСР) department, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Tel.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Статтю прийнято 09.06.2021 р.