

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691.3

ВПЛИВ УСАДКОВИХ КОНТАКТНИХ НАПРУГ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНОГО СКЛАДУ І «СТАРОГО» БЕТОНУ

Доктори техн. наук Т. О. Костюк, А. А. Пługін, Д. А. Пługін,
кандидати техн. наук О. В. Макаренко, О. І. Бондаренко, старш. викл. О. Б. Деденюва

THE EFFECT OF SHRINKAGE CONTACT STRESSES ON THE ADHESION STRENGTH OF THE WATERPROOFING COMPOSITION AND THE «OLD» CONCRETE

Dr. Sc. (Tech.) T. Kostyuk, Dr. Sc. (Tech.) A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) D. Plugin,
PhD (Tech) O. Makarenko, PhD (Tech) O. Bondarenko, senior lecturer O. Dedenova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296766>



Анотація. Робота присвячена дослідженням впливу усадкової контактної напруги на міцність зчеплення гідроізоляційного складу дрібнозернистого цементного бетону і «старого» бетону. У результаті проведених у роботі досліджень встановлено, що ущільнення гідроізоляційного складу, яке сприяє зменшенню внутрішніх напруг при твердінні і, отже, збільшує величину зчеплення його зі «старим» бетоном, досягається шляхом введення тонкомолотого наповнювача карбонату кальцію та комплексу хімічних водорозчинних добавок другого класу. Мінеральний наповнювач і хімічні добавки дають змогу додатково синтезувати при гідратації цементу в його порах і капілярах еtringіт, гідрокарбоалюмінат і гідрохлоралюмінат кальцію, низькоосновні гідросилікати кальцію, кальцит.

Розроблений гідроізоляційний склад проникної дії у вигляді будівельної суміші має високі показники адгезійної міцності до «старого» бетону і може призначатися для застосування в ремонтних, відновлювальних роботах і захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд від зовнішніх впливів, пов'язаних з водним середовищем.

Ключові слова: бетон, гідратація, міцність зчеплення, усадка, синтез, кристалогідрати.

Abstract. The paper is devoted to the study of the effect of shrinkage contact stress on the bonding strength of the waterproofing composition of fine-grained cement concrete and «old» concrete. In order to obtain a strong contact when adhering old and new concrete, it is necessary to minimize the amount of internal stress in it.

The cause of concrete shrinkage during the initial curing period is the reduction of the cement stone gel, the amount of free water that is consumed by evaporation and hydration of the cement. The semi-bound water (film water) surrounding the gel particles is then consumed. This causes the gel particles to come closer together and shrink further. In addition, the capillary pressure in the pores is very significant and increases with decreasing pore size. Since the micropores are scattered in the cement stone in different directions, the pressure, balancing each other, acts as a comprehensive compression, which also causes volumetric deformation. With further drying of the concrete, the moisture gradient decreases, the growing crystal growths provide more and more

resistance to internal pressure and the shrinkage deformation gradually subsides. Thus, the more intensive the hydration processes in the waterproofing coating and the more crystalline hydrates are formed at earlier curing times, the earlier the resistance to comprehensive compression in the coating will be, and as a result, the crack resistance of the coating and the strength of its adhesion to the «old» concrete will increase.

As a result of the research carried out in this work, it was found that the compaction of the waterproofing composition, which helps to reduce internal stresses during curing and thus increases the amount of its adhesion to old concrete, is achieved by introducing a finely ground calcium carbonate filler and a complex of chemical water-soluble additives of the second class. The mineral filler and chemical additives allow for the additional synthesis of etringite, calcium hydrocarbonate and calcium hydrochloraluminum, low-base calcium hydrosilicates, and calcite during cement hydration in its pores and capillaries.

The developed permeable waterproofing composition in the form of a mortar has high adhesion strength to old concrete and can be used in repair, restoration and protection of building structures, buildings and structures from external influences related to the water environment.

Keywords: concrete, hydration, bonding strength, shrinkage, synthesis, crystalline hydrates.

Вступ. Дослідження впливу усадкової контактної напруги на міцність зчеплення гідроізоляційного складу дрібнозернистого цементного бетону і «старого» бетону почалися ще на початку минулого століття. Результати досліджень показали, що при стикі «старого» та нового бетону навіть за 45° нахилу до напрямку розтягнення втрати міцності становлять до 40 % після семи-добової перерви та до 80 % після місячної.

Отже, щоб отримати міцний контакт при зчепленні старого і нового бетону, необхідно звести до мінімуму величину внутрішньої напруги в ньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. С. В. Олександровський у своїх роботах зазначав, що при підвищенні вологості в бетоні усадкові деформації виражені слабше і можуть бути зведені до нуля, а в деяких випадках навіть переходять у деформації набухання. Він зазначав також, що після укладання нового бетону на «старий» величина деформацій усадки зменшується внаслідок явища гістерези усадки та набухання, оскільки вони мають однаковий знак заряду для «старого» і нового бетону [1]. У роботах А. Б. Голишева, В. С. Дорофєєва, Н. В. Пушкар, А. В. Мазурака, З. Я. Бліхарського тощо обґрунтовано вплив повзучості на релаксацію напруг у

новому бетоні – що повільніше твердне новий бетон, то повніше релаксації внутрішніх напруг, оскільки частина напруг у результаті усадки релаксує за допомогою повзучості, і міцність зчеплення зростає. Тобто якщо звести до мінімуму різницю між деформаціями усадки нового і «старого» бетону після укладання нового, то контактна міцність у часі збільшується [2–4].

А. М. Плугінім зі співробітниками показано, що усадка та повзучість бетону є близькими за природою колоїдно-хімічними явищами, які на субмікрорівні визначаються міграцією води з гідросилікатного гелю та по капілярах із стиснутих у розтягнуті зони конструкцій, на мезо- та макрорівні – стисканням прошарків між зернами заповнювачів, частинками мінеральних добавок і клінкерних реліктів [5]. Запропоновано залежності граничної повзучості від співвідношення гелю та кристалогідратів, водоцементного відношення, коефіцієнтів розсунення зерен дрібного та крупного заповнювачів, а також кінетичні залежності розвитку деформації повзучості [6]. Обґрунтовані теоретично та підтверджені експериментально залежності добре узгодилися з результатами обстежень споруд [7], що дало змогу використати їх у

розрахунках конструкцій методом скінчених елементів [8], розробити на їхній основі заходи зі зменшення усадки [9].

Типова крива усадки цементного каменю в умовах квазістатичного сушіння зображена на рис. 1.

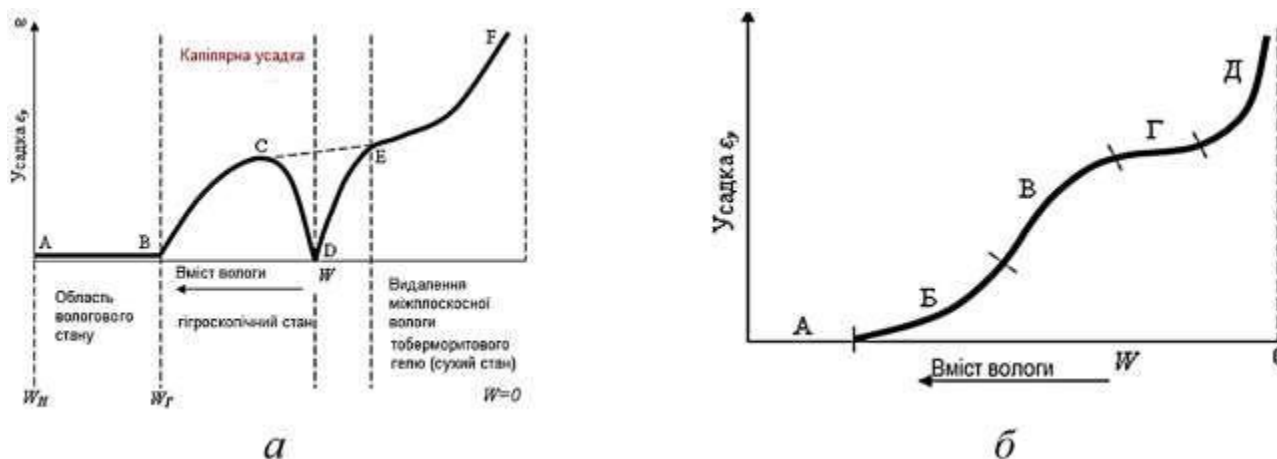


Рис. 1. Криві усадки цементного каменю:
 а – типова усадка цементного каменю;
 б – експериментально отримана З. М. Цілоسانی [10]

Максимальний вміст вологи цементного каменю, що твердів у воді 28 діб, відповідає точці на осі абсцис на початку координат і виражається математичною залежністю

$$W_{\text{макс}} = \frac{\rho_p}{\rho_0} \int_{r_{\text{мін}}}^{r_{\text{макс}}} f_V(r) dr, \quad (1)$$

де ρ_0 – середня густина цементного каменю в сухому стані;
 ρ_p – густина рідини.

Спочатку відбувається видалення вологи з пор і великих капілярів з радіусом більше 0,1 мкм (більше 1000 Å), при цьому не відбувається зменшення об'єму цементного каменю та його усадки. Цей етап сушіння супроводжується постійною швидкістю випаровування вологи з таких капілярів за будь-якої відносної вологості повітря, оскільки тиск насиченої водяної пари в капілярах практично не відрізняється від тиску насиченої водяної пари над плоскою поверхнею. Видалення вологи з капілярів з радіусами менше

0,1 мкм (менше 1000 Å) призводить до усадки цементного каменю (рис. 1, а, ділянка В-С), викликаній зменшенням об'єму вологи цементного каменю. Така усадка викликана дією капілярного тиску, що виникає в капілярах цементного каменю, у яких вода утворює меніски. Капілярний тиск p в одиничному капілярі пов'язаний з поверхневим натягом σ_{12} залежністю

$$p = \frac{2\sigma_{12}}{r}. \quad (2)$$

Чим нижче відносна вологість навколишнього повітря, тим менше радіус капілярів, у яких утворюються меніски, і тим вищий капілярний тиск.

Капілярний тиск, радіус капіляра на рівні меніска рідини та відносна вологість повітря пов'язані між собою таким рівнянням:

$$p = \frac{2\sigma_{12}}{r} = 1300 \ln \left(\frac{1}{\varphi} \right). \quad (3)$$

Оскільки мікрокапіляри розсіяні по об'єму цементного каменю, то капілярний тиск взаємно врівноважується і призводить до усадки. Оскільки капілярні сили є зовнішніми відносно каркаса цементного каменю, це можна описати рівнянням

$$\delta = \frac{\omega_n}{E_v} = 1300 \ln \left(\frac{1}{\varphi} \right), \quad (4)$$

де E_v – модуль пружності цементного каменю при всебічному стисканні;

ω_n – відношення площі змочених пір до всієї площі зразка.

Отже, усадка цементного каменю під дією капілярних сил тим більше, чим менші відносна вологість повітря і модуль пружності цементного каменю і більша площа капілярів, у яких утворюються меніски. Капілярний тиск змінюється зі зменшенням вмісту води цементного каменю монотонно, спочатку зростає, потім, досягнувши максимального значення, починає зменшуватися. Чим менший радіус капілярів, тим вищий капілярний тиск (при одній і тій самій капілярній пористості) і тим при меншій відносній вологості навколишнього повітря він досягає свого максимального значення. Зменшення капілярного тиску призводить до об'ємного розширення цементного каменю внаслідок пружного відновлення твердого каркаса через зменшення всебічного стиснення, викликаного дією капілярних сил. Цей період сушіння відповідає ділянці С–D (рис. 1, а), коли подальше зменшення вмісту води цементного каменю супроводжується не зменшенням, а збільшенням його об'єму. Проте експериментально З. М. Цілюсані показав [10], що в умовах висушування, максимально близьких до квазістатичних, збільшення об'єму не спостерігалось, хоча і фіксувався на ділянці Г (рис. 1, б), де висушування не супроводжується усадкою цементного каменю.

У роботах Калоузека [11] показана роль міжплощинної води тоберморитового

гелю в процесі усадки цементного каменю, тобто чим менша відносна вологість повітря і вище температура, тим більше міжплощинної води видаляється з тоберморитового (на відміну від ксонотлітового) гелю і тим вище усадка цементного каменю.

Отже, причиною усадки бетону в початковий період твердіння є зменшення гелю цементного каменю, кількості вільної води, яка витрачається на випаровування і гідратацію цементу. Потім витрачається напівзв'язана вода (плівкова вода), яка оточує частинки гелю. Це викликає зближення частинок гелю та подальшу усадку. Крім того, капілярний тиск у порах має дуже значну величину і зростає зі зменшенням їхніх розмірів. Оскільки мікропори розсіяні в цементному камені в різних напрямках, то тиск, взаємно врівноважуючись, діє як всебічне стискування, під впливом якого також відбуваються об'ємні деформації. При подальшому висиханні бетону зменшується вологісний градієнт, кристалічні зростки, що ростуть, надають все більший опір внутрішньому тиску, і деформація усадки поступово згасає.

Визначення мети та завдання дослідження. Отже, чим інтенсивніше процеси гідратації цементу і більше кристалогідратів утворюється в більш ранні терміни твердіння, тим раніше буде чинитися опір всебічному стиску в ньому, і, як наслідок, підвищується тріщиностійкість покриття і міцність його зчеплення зі «старим» бетоном.

Усадка гідроізоляційного складу проникної дії аналогічна усадці бетону і, крім перерахованих вище факторів, також істотно залежить від виду та кількості заповнювачів, оскільки в умовах квазістатичного сушіння наявність заповнювача перешкоджає вільній усадці цементного каменю. Усадка бетону (відносна деформація) ε_y^b становить частину усадки цементного каменю ε_y^4 і залежить від кількості введеного заповнювача:

$$\varepsilon_y^{\delta} = \varepsilon_y^{\Pi}(1 - a)^n, \quad (5)$$

де a – об’ємна частка заповнювача;
 n – емпіричний коефіцієнт, що знаходиться в межах від 1,2 до 1,7.

Було отримано залежності впливу усадки бетону від вмісту та виду різних заповнювачів (рис. 2, 3).

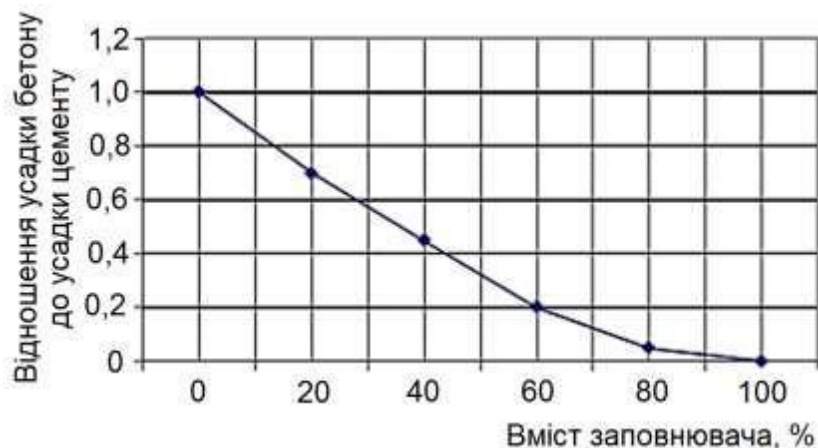


Рис. 2. Вплив вмісту заповнювача за об’ємом на відношення усадки бетону до усадки цементного каменю ($n = 1,7$)

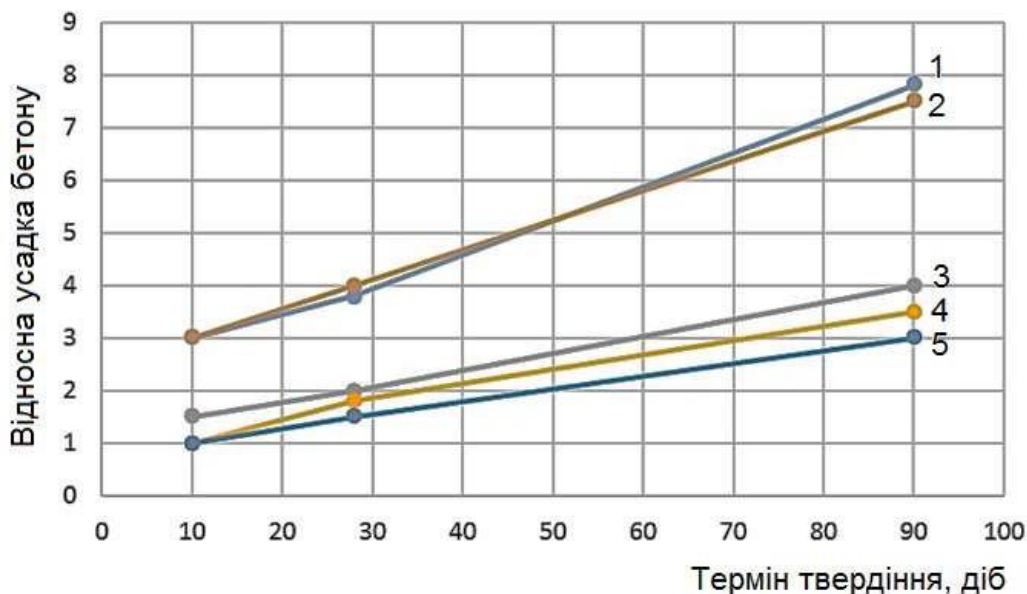


Рис. 3. Усадка бетону на різних заповнювачах:
 1 – пісковик; 2 – гравій; 3 – граніт; 4 – вапняк; 5 – кварц

З рис. 2 видно, що зменшення усадки бетону тим менше, чим менше у складі цементу і більше заповнювача. На рис. 3 показано, що і властивості заповнювача, а

саме величина модуля пружності, також істотно впливають на величину усадки бетону. При цьому величина деформації бетону знаходиться у зворотній залежності

від величини модуля пружності заповнювача. З рис. 3 видно, що найбільш оптимальними для бетонів (найменша величина усадки при твердінні) як заповнювачі є кварц і вапняк, що також підтверджується дослідженнями інших авторів [12–14].

Метою роботи є зниження усадкових напруг у дрібнозернистому бетоні, що сприятиме підвищенню міцності зчеплення нового і «старого» бетонів. Для цього при розробленні гідроізоляційних складів проникної дії слід забезпечити додатковий синтез кристалогідратів у порах і капілярах цементного каменю в початковий період гідратації цементу через додавання певних солей електролітів; крім кварцового заповнювача, ввести до складу тонкодисперсний карбонатний наповнювач.

Основна частина дослідження. Для проведення експериментальних досліджень було отримано суху суміш з урахуванням викладеного вище.

Введені до складу хімічні добавки другого класу (за систематизацією В. Ратінова і Ф. Іванова): хлориди кальцію, натрію і калію, азотнокислий кальцій, карбонат калію тощо, здатні реагувати з трикальцієвим алюмінатом і чотирикальцієвим алюмоферитом з утворенням важкорозчинних подвійних гідратів. Слід урахувати, що першою буде реагувати та добавка, яка з цими складовими цементу утворює найбільш важкорозчинні солі, сприяє найбільшому пересиченню і тому кристалізується з максимальною швидкістю. Подібні властивості в цементі має гідросульфоалюмінат кальцію (можливо, також гідросульфоалюмоферит кальцію), що кристалізується при взаємодії алюмінієвмісних складових цементу з гідроксидом кальцію і сульфатами. Поки протікають ці реакції, інші добавки, введені в бетон з водою замішування, наприклад CaCl_2 і $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, очікують своєї черги, тобто залишаються в рідкій фазі цементного тіста і цементного каменю у

вигляді відповідних іонів і завдяки цьому прискорюють твердіння силікатних складових цементу, оскільки в цей час вони змінюють розчинність силікатів кальцію, тобто діють на них як добавки першого класу (не містять однойменних з в'язучим іонів, але прискорюють твердіння за рахунок зміни іонної сили розчину, наприклад NaCl , NaNO_2). Оскільки в цементі обов'язково міститься гіпс, будь-яка добавка з перерахованих вище не вступає в реакцію з алюмінієвими складовими цементу доти, поки цей гіпс практично повно не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію (етрингіт). Така взаємодія можлива, якщо після утворення еtringіту залишаються непрореаговані з сульфат-іонами трикальцієвий алюмінат і чотирикальцієвий алюмоферит.

Для отримання гідроізоляційного складу проникної дії до цементно-піщаної суміші було додано тонкодисперсний порошок карбонату кальцію з питомою поверхнею $1500 \text{ см}^2/\text{г}$. Шляхом перемішування цементу, кварцового заповнювача, карбонатного наповнювача та комплексу хімічних добавок було виготовлено суху суміш.

Для проведення досліджень було вирізано зразки у вигляді кернів з основи шляхопроводу (рис. 4). Зразки розрізали по висоті кернів на диски товщиною по 30 мм. Зразок № 1 являв собою верхній шар основи шляхопроводу і мав зернисту поверхню, два інші зразки-диски, вирізані з наступних шарів, мали гладку щільну бетонну поверхню (рис. 5).

Отримали зразки-диски товщиною 30 мм, на кожен зразок були нанесені склади сухої гідроізоляційної суміші проникної дії та цементно-піщаного розчину. Зразки тверділи в нормально-вологісних умовах протягом 28 діб, поверхня зразків залишилася гладкою та не мала тріщин, після чого на кожен із складів були наклеєні за допомогою епоксидного клею металеві грибки (рис. 6).



Рис. 4. Зразок керна з зернистою поверхнею



Рис. 5. Зразок керна з гладкою поверхнею, після зрізання верхнього зернистого шару



Рис. 6. Зразки-диски з наклеєними металевими грибками

Після витримання протягом трьох діб зразки були випробувані на міцність зчеплення шару гідроізоляційного складу зі «старим» бетоном. Як прилад для фіксації зусилля відриву грибка застосовувався динамометр з поділкою 0,05 кг і максимальним прикладеним навантаженням 60 кг.

Результати відриву шару гідроізоляційного складу показали:

- міцність відриву від зернистої поверхні 2,6 МПа;
- міцність відриву від гладкої поверхні 2,4 МПа.

Для цементно-піщаного розчину:

- міцність відриву від зернистої поверхні 0,8 МПа;
- міцність відриву від гладкої поверхні 0,5 МПа.

За результатами механічних випробувань можна стверджувати, що теоретичні дослідження про зниження усадкових напруг у твердіючому

дрібнозернистому бетоні призводить до підвищення міцності зчеплення зі «старим» бетоном.

У результаті досліджень методами рентгенофазового та диференційно-термічного аналізу цементного каменю встановлено таке: добавка карбонатного наповнювача підвищує вміст кальциту в цементному камені, викликає утворення шестикальцієвого трикарбонатного гідроалюмінату, близького за структурою еtringіту, але уповільнює утворення самого еtringіту. Крім того, ця добавка сприяє кращій кристалізації гідросилікатів кальцію типу тобермориту і C_2SH_2 . Уведення комплексу хімічних добавок другого класу сприяє загальному підвищенню ступеня гідратації з утворенням більшої кількості портландиту, гідросилікатів кальцію типу тобермориту і ксонотліту і комплексних гідроалюмінатів кальцію – гідронітроалюмінату і гідрохлоралюмінату. Комплекс мінеральної

та хімічних добавок також сприяє підвищенню ступеня гідратації, збільшенню вмісту кальциту, імовірно, за рахунок присутності карбонатного наповнювача та збільшення вмісту еtringіту. З комплексних гідратних новоутворень

зафіксовано гідронітроалюмінат кальцію, гідрооксихлорид кальцію та шестикальцієвий трикарбонатний гідроалюмінат. Наявність новоутворень було підтверджено електронно-мікроскопічними дослідженнями (рис. 7).

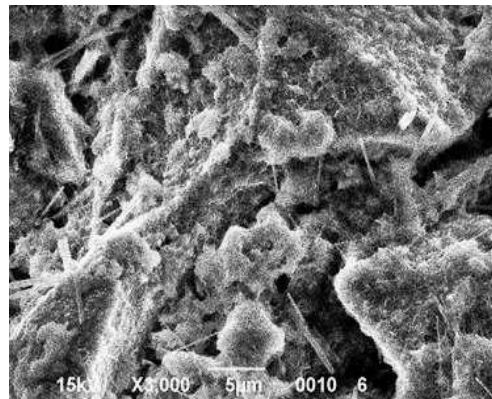
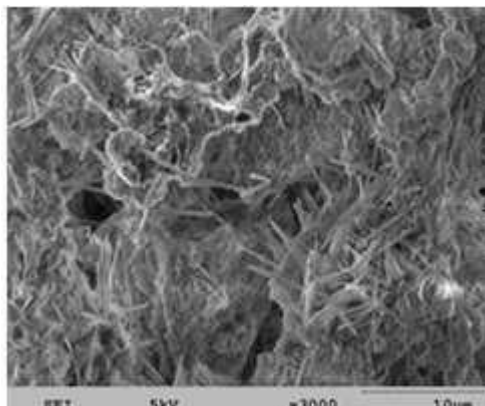


Рис. 7. Електронно-мікроскопічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю гідроізоляційного складу

На рис. 7 видно продукти гідратації, у складі яких є голкоподібні кристали довжиною до 5 мкм, характерні для еtringіту, гідрокарбоалюмінату і гідрохлоралюмінату кальцію, а також повстані новоутворення низькоосновних гідросилікатів кальцію та нарости з кальциту.

Висновки. Встановлено, що ущільнення гідроізоляційного складу, яке сприяє зменшенню внутрішніх напруг при твердінні і, отже, збільшує величину зчеплення його зі «старим» бетоном, досягається шляхом уведення тонкомолотого наповнювача карбонату кальцію та комплексу хімічних

водорозчинних добавок другого класу. Мінеральний наповнювач і хімічні добавки дають змогу додатково синтезувати при гідратації цементу в його порах і капілярах еtringіт, гідрокарбоалюмінат і гідрохлоралюмінат кальцію, низькоосновні гідросилікати кальцію, кальцит.

Розроблений гідроізоляційний склад проникної дії у вигляді будівельної суміші має високі показники адгезійної міцності до «старого» бетону і може призначатися для застосування в ремонтних, відновлювальних роботах і захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд від зовнішніх впливів, пов'язаних з водним середовищем.

Список використаних джерел

1. Александровский С. В. Расчет бетонных железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. Изд. 2-е. Москва: Стройиздат, 1973. 432 с.
2. Дорофеев В. С., Пушкар Н. В. Міцність дотичного зчеплення між старим і новим бетонами у збірно-монолітних конструкціях. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 11. С. 21-30.

3. Мазурак А. В., Калітовський В. М., Юхим М. Я., Мазурак Т. А. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, виготовлених і підсилених торкретуванням / Львівський національний аграрний університет. URL: <http://dorogimosti.org.ua/files/upload/31.pdf> (дата звернення 01.11.2023).

4. Бліхарський З. Я., Хміль Р. Є., Вашкевич Р. В., Васільєв І. В. Дослідження з'єднувальних сумішей для нарощування поперечного перерізу підсилених залізобетонних балок / НУ «Львівська політехніка». URL: https://vlp.com.ua/files/02_44.pdf (дата звернення 01.11.2023).

5. Plugin A. N., Wang X., Plugin A. A., Kalinin O. A., Miroshnichenko S. V. The Long-Time Creep and Durability of the Concrete and Reinforced Concrete. 11-th International Congress of the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 308 (2003) 1761-1772. URL: https://www.researchgate.net/publication/331534209_The_Long-Time_Creep_and_Durability_of_the_Concrete_and_Reinforced_Concrete (дата звернення 01.11.2023).

6. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плугина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/331533663_Fundamentals_of_the_theory_of_hardenig_strength_destruction_and_durability_of_Portland_cement_concrete_and_structures_made_of_them_Vol3_Theory_of_strength_destruction_and_durability_of_concrete_reinf (дата звернення 01.11.2023).

7. Плуґін А. А., Плуґін А. М., Кудренко С. М., Плуґін Д. А. Понаднормативна довгочасна повзучість бетону в залізобетонній конструкції місткісної споруди. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2000. Вип. 37. С. 32-44.

8. Lobiak A., Plugin A., Kravtsiv L., Kovalova O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. *Matec Web of Conferences*, 234 (2018) 04004. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823404004> (дата звернення 01.11.2023).

9. Плуґін А. А., Костюк Т. А., Салия М. Г., Бондаренко Д. А. Применение карбонатных минеральных добавок для снижения усадки цементных растворов. *Науковий вісник будівництва*. 2010. № 59. С. 157-162.

10. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Мецнииреба, 1979. 230 с.

11. Kalousek O. L. Fundamental factors in the drying Shrinkage of concrete block. *JACI*. 1954. Vol. 26, № 3. P. 233-248.

12. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone. *ACI Mater. J.* 1991. Vol. 88, № 8. P. 518-529.

13. Roberts L. R., Grace W. R. Microsilica in concrete.1. *Mater. Sci. Concr.1*. Westerville (Ohio), 1989. P. 197-222.

14. Sarkar Shendeep L. Microstructure of a very low water/cement silica fume concrete. *Microscope*. 1990. Vol. 38, № 2. P. 141-152.

Костюк Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Тел.: +38(050)6528219. E-mail: takostuk@ukr.net.

Плуґін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38(057)7301058. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Плуґін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Макаренко Ольга Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-4125-2365. Тел.: +38(050)6056276. E-mail: olga.fxm@gmail.com.

Бондаренко Олександр Іванович, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд і гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050)6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Деденюва Олена Борисівна, старший викладач кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792. Тел.: +38(097)414-12-24. E-mail: alena.dedenyova@gmail.com.

Kostyuk Tetiana, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Тел.: +38(050)6528219. E-mail: takostuk@ukr.net.

Plugin Andrii, Professor, Head of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38(057)7301058.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63.

E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Makarenko Olha, PhD (Tech), Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-4125-2365.

Тел.: +38(050)6056276. E-mail: olga.fxm@gmail.com.

Bondarenko Oleksandr, PhD (Tech), Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydraulic Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486.

Тел.: +38(050)6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Dedenova Olena, Senior Lecturer, Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792.

Тел.: +38(097)4141224. E-mail: alena.dedenyova@gmail.com.

Статтю прийнято 23.11.2023 р.