

УДК 691

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.47.983

## СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЕТРИНГІТОВОЇ ФАЗИ

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,КОНДРАТЬЄВА Н. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,ГРИШКО Г. М.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: [viktorderevianko2017@gmail.com](mailto:viktorderevianko2017@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

<sup>2</sup> Кафедра хімічної технології в'язучих матеріалів, Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-05-66, e-mail: [nataliyavk@yahoo.com](mailto:nataliyavk@yahoo.com), ORCID ID: 0000-0002-2537-4389

<sup>3\*</sup> Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [hryshko.h.m@dsau.dp.ua](mailto:hryshko.h.m@dsau.dp.ua), ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

**Анотація. Постановка проблеми.** В Україні алюмінатні та сульфоалюмінатні цементи не виробляються, незважаючи на досить значну потребу у в'язучих речовинах цього класу. Використання імпортової сировини обмежене високою вартістю і недоліками, що виникають у процесі експлуатації – це швидке тужавлення, значне тепловиділення, пов'язане з нестабільною стійкістю деяких сульфоалюмінатів. При цьому можливе виділення наступних проблем у напрямку розширення можливостей використання спеціальних цементів даного типу: стабілізація в часі й умовах експлуатації гідросульфатної фази на основі глиноземистого цементу, а також для модифікації складів мінеральних в'язучих речовин на основі двоводного сульфату кальцію ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) та розроблення в'язучих речовин цього класу на основі вторинних продуктів виробництва. Основним фактором є те, що під час гідратації сульфоалюмінатів і алюмінатів за присутності гіпсу ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) утворюється гідросульфоалюмінатна фаза, що дає змогу отримати структуру цементного каменю зі спеціальними властивостями. Потім однокальцієвий гідросульфоалюмінат переходить у гідросульфоалюмінат низькосульфатної форми  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  з виділенням гібситу  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Також утворюється еtringіт  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  і  $2(\text{C}_2\text{S}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , може утворитися гідросилікат кальцію CSH(V). При додаванні до цементу гіпсу утворюється еtringіт у цій системі. Еtringіт – один із компонентів. Він утворюється не спочатку, а через проміжні структури. Під час реакцій гідратації еtringіт перебудовується, виникають новоутворення, які можуть викликати гіпсову корозію. Еtringіт втрачає стабільність. При цьому виникає проблема первинного та вторинного еtringіту. Первинний еtringіт – створює умови для міцності. Вторинний утворюється уже в затверділій системі і спричинює виникнення внутрішніх напружень. Утворення вторинного еtringіту може мати як позитивні, так і негативні наслідки. **Мета статті** – дослідити структуру і властивості еtringіткової фази. **Висновки.** Процес гідратації залежить від поверхневої енергії Гіббса. Установлено, що поверхнева енергія збільшується при збільшенні співвідношення  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Вивчено систему впливу еtringіткової фази на основні характеристики глиноземистого цементу та гіпсу в модифікованому гіпсовому в'язучому. Проведено дослідження щодо утворення максимальної кількості еtringіткової фази. Виконано розрахунок максимальної кількості співвідношення глиноземистого цементу і гіпсу для отримання максимальної кількості мінералу 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу. Найвищий ефект досягається в разі одночасного використання  $\text{C}_6\text{A}_3\text{S}_3\text{H}_{32}$  і  $\text{AlH}_3$ , що має місце за гідратації  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}_3$ . З урахуванням вищесказаного бачиться доцільним отримання клінкеру, що містить сульфоалюмінат кальцію, і цементів на його основі.

**Ключові слова:** композиційне в'язуче; модифікація; еtringіт; стабілізація еtringіту; алюмінатні цементи; сульфоалюмінатні цементи

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE ETRINGITE PHASE

DEREVIANKO V.M.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,KONDRATIEVA N.V.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,HRYSHKO H.M.<sup>3\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

<sup>1</sup> Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: [viktorderevianko2017@gmail.com](mailto:viktorderevianko2017@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering and Binding Materials, Ukrainian State University of Chemistry and Chemical Technology, 8, Haharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-05-66, e-mail: [nataliyavk@yahoo.com](mailto:nataliyavk@yahoo.com), ORCID ID: 0000-0002-2537-4389

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: [hryshko.h.m@dsau.dp.ua](mailto:hryshko.h.m@dsau.dp.ua), ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

**Abstract. Problem statement.** Aluminate and sulfoaluminate cements are not produced in Ukraine, despite a rather significant need for binders of this class. The use of imported raw materials is limited by the high cost and certain disadvantages occurring during exploitation including rapid hardening, significant heat generation, which is associated with instability of some sulfoaluminates. At the same time, it is possible to highlight the following problems in the direction of expanding possibilities of using special cements of this type: stabilization over time and operating conditions of the hydrosulfate phase based on alumina cement, as well as modification of the compositions of mineral binders based on calcium sulfate dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and development of binders of this class based on secondary production products. The main factor is that during hydration of sulfoaluminates and aluminates in the presence of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), a hydrosulfoaluminate phase is formed, which makes it possible to obtain a hardened cement paste structure with special properties. Then monocalcium hydrosulfoaluminate turns into hydrosulfoaluminate of the low-sulfate form  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  with the release of gibbsite  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Also, ettringite  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  and  $2(\text{C}_2\text{S}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  is formed and hydrated calcium silicate CSH(B) can be formed. When gypsum is added to cement, ettringite is formed in this system. Ettringite is one of the components. It is not formed initially, but through intermediate structures. During hydration reactions, ettringite is rearranged, neoplasms are formed, which can lead to gypsum corrosion. Ettringite loses its stability. Herewith, the problem of primary and secondary ettringite arises. Primary ettringite creates conditions for strength. Secondary ettringite is formed already in the hardened system and leads to internal stresses. Formation of secondary ettringite can have both positive and negative consequences. **The purpose of the article** is to investigate structure and properties of the ettringite phase. **Conclusions.** The hydration process depends on the Gibbs surface energy. Change in surface energy depends on the  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio. It was established that the surface energy increases with an increase in the  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio. The paper has studied influence caused by the ettringite phase on the main characteristics of alumina cement and gypsum in a modified gypsum binder. Studies have been conducted on formation of the maximum amount of ettringite phase. We have calculated the maximum amount of the ratio of alumina cement and gypsum to obtain the maximum amount of mineral – 70 % alumina cement and 30 % gypsum. The highest effect is achieved during the simultaneous use of  $\text{C}_6\text{A}\dot{\text{S}}_3\text{H}_{32}$  and  $\text{AH}_3$ , which occurs during hydration of  $\text{C}_4\text{A}_3\dot{\text{S}}$ . Taking into account the above, it is advisable to obtain clinker containing calcium sulfoaluminate and cements based on it.

**Keywords:** composite binder; modification; ettringite; ettringite stabilization; aluminate cements; sulfoaluminate cements

**Актуальність.** У багатьох видах цементів важливу складову становить еtringітова фаза, за рахунок якої можна регулювати певні властивості процесів гідратації і структури цементного каменю. Прикладом можуть бути спеціальні цементи: розширні, безусадкові, швидкотверднучі, сульфоалюмінатні та інші. Але в процесі експлуатації за дії зовнішніх факторів можлива зміна структурної складової через нестабільність еtringіту. Це одна з досить значних проблем у використанні бетонів і розчинів на основі сульфоалюмінатних і спеціальних цементів.

**Аналіз публікацій.** Еtringіт (трисульфатна форма гідросульфоалюмінату кальцію)  $\text{C}_6\text{A}\dot{\text{S}}_3\text{H}_{32}$  – це продукт гідратації багатьох мінеральних в'язучих речовин. Хімічний склад відповідає формулі:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (31-32)\text{H}_2\text{O}$ . Але слід

вказати, що вміст кристалізаційної води може змінюватись в межах менше 10–12 % відносної вологості і температури вище  $65^\circ\text{C}$  [1]. І якщо в спеціальних цементах на основі портландцементу проблема вирішується, то у сульфоалюмінатних цементах вона залишається. Це пов'язано із значним вмістом еtringіту.

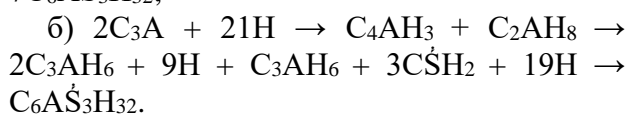
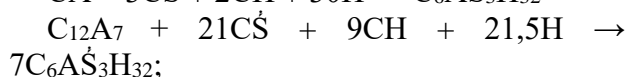
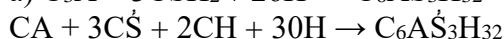
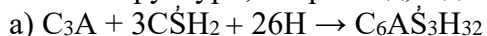
Позитивні властивості еtringіту: швидкість твердіння, висока міцність, у певних умовах висока екзотерія. До негативних властивостей належить його нестабільність за певних умов: зміни вологості і підвищенні температури.

Збільшення вмісту еtringіту можна досягти шляхом використання сульфоалюмінатного клінкеру САЦ, основним мінералом якого є еліміт  $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$  ( $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ ) (компонент Клейна), розробка Китайської академії

будівельних матеріалів (China Building Material Academi, Beijing, China).

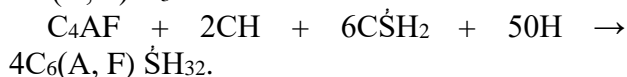
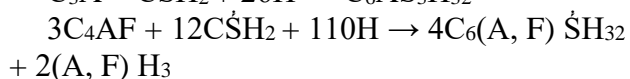
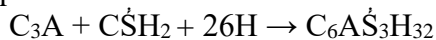
Другий варіант – модифікація двоводного сульфату кальцію ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) глиноземистим цементом.

Але в обох випадках формування в системі еtringіту під час гідратації в подальшому потребує стабілізації даної фази. При цьому слід урахувувати пряме формування і формування в еtringіті через проміжні структури, наприклад, відповідно:



Процеси гідратації з утворенням еtringітової фази можна поділити на групи: цементу на основі портландцементу, ніх клінкерів, глиноземистих, сульфоалюмінатних цементів і глиноземистих за присутності гіпсу (ангідриту).

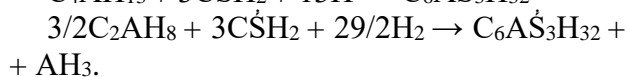
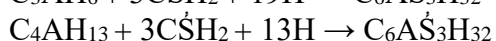
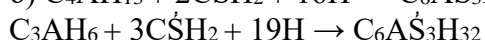
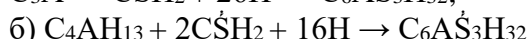
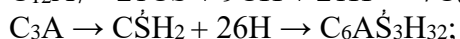
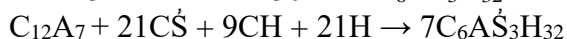
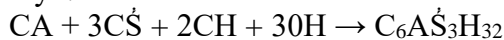
На основі портландцементу первинний еtringіт:



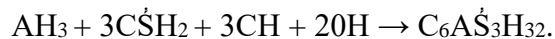
У сульфоалюмінатних цементах формування еtringіту є на основі мінералу еліміту  $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$  ( $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ ) +  $2\text{C}\dot{\text{S}}\text{H}_2$  +  $34\text{H} \rightarrow \text{C}_6\text{A}\dot{\text{S}}_3\text{H}_{32} + 2\text{AH}_3$ .

Процес гідратації  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$  подібний гідратації в портландцементі.

Мінерали глиноземистих цементів за присутності іонів сульфатів кальцію теж утворюють еtringіт первинних і вторинних сполук:



За наявності гіпсу в суміші:



Структурна схема основних складових еtringіту наведена на рисунках 1, 2 [1].

Еtringіт ( $M = 1\,255,11$ ; склад:  $\text{CaO} - 26,81\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 8,12\%$ ;  $\text{SO}_3 - 19,14\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 45,93\%$ ;  $\text{Ca} - 19,16\%$ ;  $\text{Al} - 4,3\%$ ;  $\text{S} - 7,66\%$ ;  $\text{H} - 5,14\%$ ;  $\text{O} - 53,74\%$ ). Структурна формула еtringіту:  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ . У звичайних умовах, за деякими даними, він містить 31 молекулу води. Гексагональна сингонія; просторова гратка  $R\bar{6}_3/ttc$ ;  $a = 11,24$ ;  $c = 21,45$ ;  $Z = 2$ .

Безкольорові голчасті кристали чи видовжені призми дуже часто можуть бути зібраними у сфероліти. Загальна спаяність по (1010); одновісний; від'ємний, пряме погашення;  $n_0 = 1,464$ ;  $n_b = 1,4458$ . У процесі гідратації показники заломлення збільшуються і знак подовження з від'ємного змінюється на додатний.

Під електронним мікроскопом видно, що характерна форма кристалів – голчасті кристали, сфероліти, часто довгі товсті стрижні.

За ДТА маємо ендоефект за температур  $100-200\text{ }^\circ\text{C}$ . У процесі термічної дегідратації у структурі еtringіту залишається: за  $60\text{ }^\circ\text{C} - 20$  молекул; за  $110\text{ }^\circ\text{C} - 8$ ; за  $145\text{ }^\circ\text{C} - 6$ ; за  $200\text{ }^\circ\text{C} - 2$  молекули води.

Щільність –  $1\,730-1\,790\text{ кг/м}^3$ ;  $1\,480-1\,770\text{ кг/м}^3$ . Твердість –  $2-2,5$ .

Розчиняється в  $\text{HCl}$  та розкладається за присутності  $\text{MgSO}_4$  і розчинів лужних карбонатів.

Вторинний еtringіт входить у склад новоутворень тільки за відповідних умов: концентрації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  більше  $460\text{ мг/л}$ .

У насиченому розчині еtringіт первинно буде виділятися в колоїдному високодисперсному стані та одночасно осідати на поверхні частинок  $\text{CA}$  та  $\text{C}_2\text{A}$ , спонукаючи всю систему до сповільнення строків тужавлення та процесу гідратації.

У композиційному в'язучому, що складається з глиноземистого цементу та гіпсу, в процесі структуроутворення відбувається зміщення іонного балансу в бік  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{NaOH}$ , що сприяє формуванню еtringіту. За рахунок високого вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в глиноземистому цементі і

високого значення поверхневої енергії зміцнення структури.  
 відбувається утворення еtringіту та

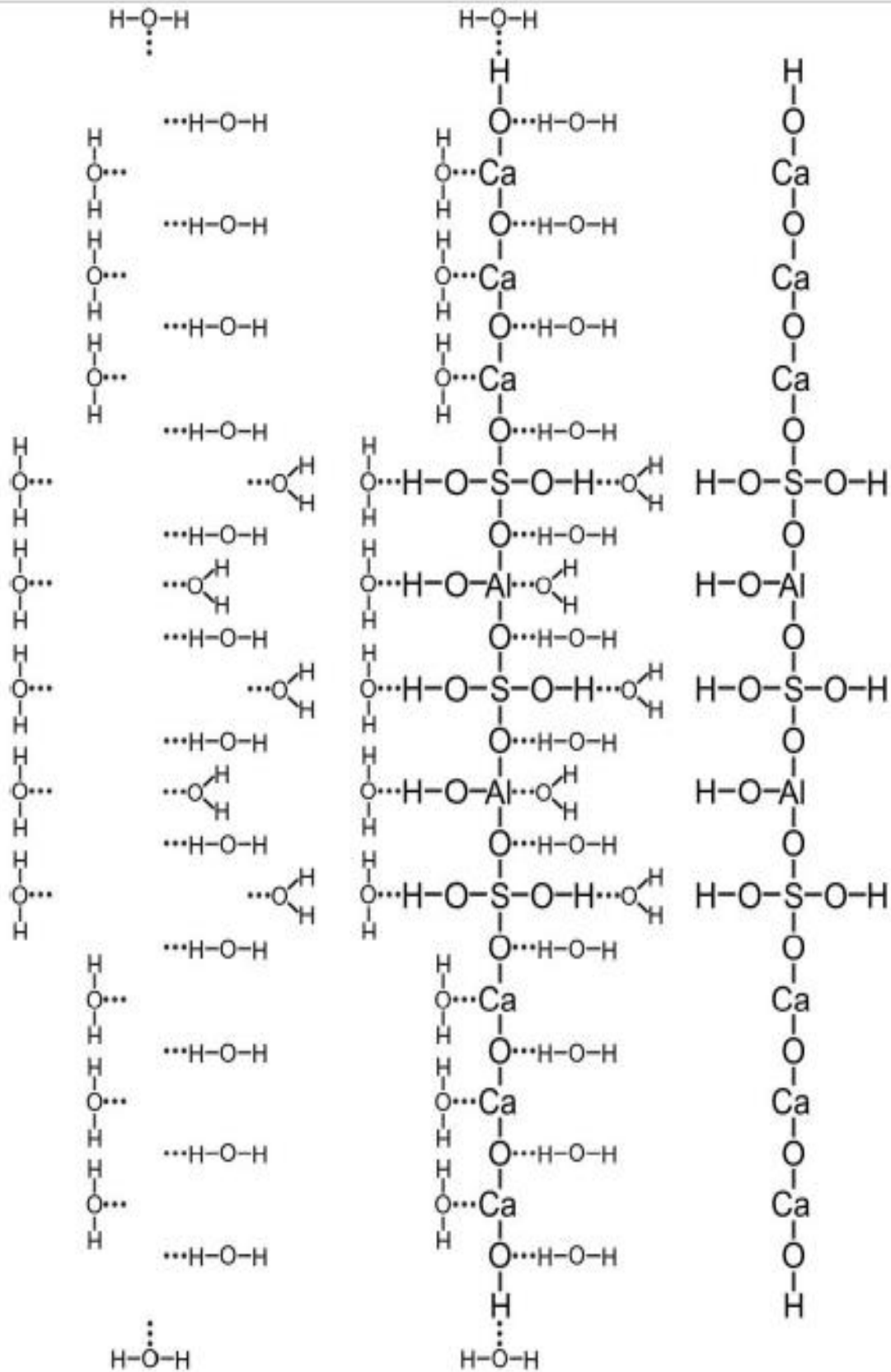


Рис. 1. Структурна схема основних складових еtringіту  $3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  [1]



Керуючи властивостями і самим формуванням еtringіту, можна регулювати властивості цементних композицій. Високий вміст первинного еtringіту на початковій стадії твердіння (4–12 год.) викликає прискорення процесів гідратації цементного тіста.

У разі оптимального дозування гіпсу еtringіт, заповнюючи пори, буде підвищувати міцні властивості твердіючої системи.

**Результати досліджень.** У процесі гідратації алюмінатів  $CA$ ,  $CA_2$ ,  $C_{12}A_7$  кальцію за присутності  $C\bar{S}H_2$  залежно від умов, у яких відбувається реакція, формується структура, що має різноманітні властивості: реологія, міцність, тепловиділення, напруження (розширення), стабільність структури (мікрофотографії гідросульфоалюмінатів).

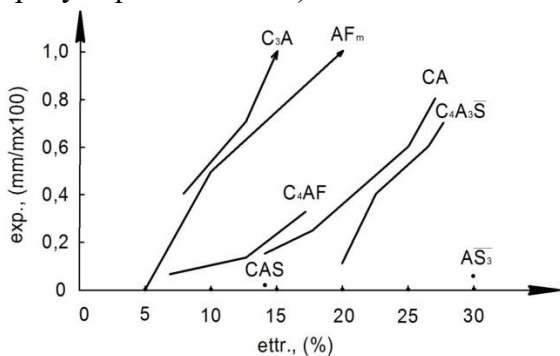


Рис. 3. Залежність ступеня розширення цементного каменю від кількості утвореного еtringіту за твердіння у вологих умовах [2]

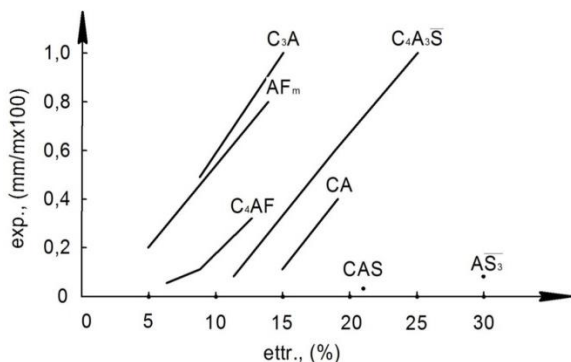


Рис. 4. Залежність ступеня розширення цементного каменю від кількості утвореного еtringіту за твердіння у воді [2]

Розглянемо залежність ступеня розширення, викликаного утворенням еtringіту, від кількості сформованого

мінералу. І. Odler, J. Colan-Subauste займалися вивченням механізму гідратації мінералів:  $C_3A$ ,  $C_4A_3\bar{S}_3$ ,  $C_4AF$ ,  $CA$ ,  $CAS$ ,  $CAS_3$ ,  $C_4A\bar{S}H_{12}$ , з утворенням еtringіту. На рисунках 3, 4 наведено криві [2], що виражають залежність між ступенем розширення під час гідратації цих мінералів і кількістю утвореного еtringіту.

Як показали дані досліджень, спроможність еtringіту викликати розширення неоднакова і залежить не тільки від кількості утвореного мінералу, а й від активності компонента суміші, що містить  $Al^{3+}$  іони.

Відсутність розширення у процесі гідратації  $CAS$  і  $A\bar{S}_3$  можна пояснити тим, що до складу цих мінералів входить сульфат алюмінію, який має високий ступінь розчинності, тому весь еtringіт утворився в результаті кристалізації з розчину, а не шляхом топонімічної реакції, а, по-друге, більша частина еtringіту, якщо не весь, утворилася в початковий період гідратації, можливо, раніше, ніж настала стадія тужавлення, тобто в період, коли система має достатню пластичність для того, щоб будь-які внутрішні напруження могли бути усунуті в результаті пластичної деформації матеріалу.

За результатами праці [2] можна зробити такі висновки: швидкість утворення еtringіту залежить від складу фази, що містить  $Al^{3+}$  іони, тобто швидкість гідратації визначається швидкістю розчинення  $Al^{3+}$  вмісного компонента; ступінь розширення підвищується зі збільшенням кількості кристалів еtringіту, що утворився в результаті топонімічної реакції і залежить від умов твердіння, тобто за твердіння у водних умовах спостерігають найбільше розширення.

У [3; 4] відмічається, що розширення відбувається зі збільшенням кількості не тільки еtringіту, а й моногідросульфоалюмінату кальцію (МГСАК) [5]. Фазові переходи гідросульфоалюмінатів кальцію (ГСАК) помітно не впливають на деформації розширення. Низка дослідників [6; 7] вважають, що розширення цементного

каменю відбувається в результаті переходу моносольфатної форми ГСАК трисульфатну. Суттєвий недолік наведеної гіпотези – відсутність доказів переходу МГСАК в ТГСАК [8].

Згідно з [9], розширення відбувається в результаті набухання колоїдного еtringіту, що утворюється під час насичення рідкої фази гідроксидом кальцію. Автор говорить, що поєднання високої питомої поверхні (колоїдний еtringіт) і специфічної кристалічної будови (велика кількість гідроксильних груп, що здатні притягувати і орієнтувати водні диполі) дає можливість еtringіту поглинати більшу кількість води і набухати за міжчастинкового відштовхування.

Причиною розширення стає виникнення сольватних плівок навколо гідратованих зерен цементу [10]. В умовах обмеженого вільного простору ці плівки можуть перетинатися, і в місцях перетину диполі води дезорієнтуються, що спричинює склеювання частинок загальним сольватним шаром. Ці умови виникають під час гідратації портландцементу. У випадку розширюваних цементів є дві тверді фази (портландцемент і алюмінатний цемент), різність силових полів яких виключає перетин сольватних оболонок і дезорієнтацію водних диполів, у результаті чого послаблюється злипання частинок цементу.

Розширення цементного каменю пов'язане зі збільшенням об'єму твердої фази, що утворюється під час гідратації цементу і викликається тією її частиною, яка не здатна розміститися в поровому просторі гідратованої структури [11]. Найбільш повно такі умови реалізуються під час реакцій утворення «вторинних» ГСАК, коли останні утворюються не в результаті взаємодії безводних мінералів із гіпсом, а під час реакцій гідроалюмінатів кальцію з розчином сульфату кальцію, що потрапляє до зони реакції в результаті дифузії.

В цьому випадку відбувається збільшення об'єму і твердої фази і системи в цілому. Ці умови реалізуються і за дифузії іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{OH}^-$  у гель гідроксиду алюмінію

з утворенням гідроалюмінатів кальцію, які викликають значне збільшення об'єму твердої фази всередині гелю, що супроводжується його руйнуванням і виникненням напружень у структурі, які викликають її розширення.

У [12] показано, що напруження цементного каменю виникає в результаті накладення двох процесів: зміцнення структури за рахунок гідратації силікатів і алюмінатів кальцію і розширення в результаті утворення еtringіту. Величина самонапруження визначається співвідношенням цих двох процесів.

За однакової величини самонапруження великими деформаціями будуть характеризуватися більш пластичні структури.

Таким чином, проектуючи склади цементу з різними співвідношеннями крихких (кристалічних) і пластичних (желеподібних) фаз, можна одержувати цементи із заданими властивостями: безусадкові, розширні, напружні. Проява цих властивостей залежить від кінетики і часу утворення гідратних сполук.

У процесі формування гідраційної структури, кристалізації гідратів, що викликає її розширення, випереджає утворення гідратних сполук, що зміцнюють цементний камінь. В цьому випадку ні розширення, ні самонапруження структури відомими методами не фіксуються. Утворення гідратів, які викликають розширення і зміцнення структури, відбувається одночасно, що спричинює видимі деформації і самонапруження цементного каменю.

Гідратні сполуки, які викликають розширення структури, утворюються після її ущільнення. Залежно від досягнутої величини за дії сили розширення структура може мати велике напруження чи руйнування (якщо сили розширення перевищують міцність цементного каменю).

На основі викладених теоретичних уявлень можна зробити такі висновки: під час гідратації розширюваних і напружних цементів незалежно від складу і природи

розширюваного компонента первинною фазою стає еtringіт.

Моносульфатна форма ГСАК утворюється пізніше як наслідок взаємодії еtringіту з безводними алюмінатами кальцію. Утворення еtringіту первинно супроводжується ущільненням і зміцненням цементного каменю, а далі – в результаті взаємодії гіпсу і гідроалюмінатів кальцію еtringіт, що утворюється, викликає розширення цементного каменю, а також його руйнування.

### Висновки

Результати досліджень процесів гідратації сульфоалюмінатних цементів і процесу формування структури цементного каменю дозволяють відмітити дуже важливу роль еtringіту і гідроксиду алюмінію серед інших гідратів. Позитивна роль цих гідратів у забезпеченні властивостей цементного каменю пояснюється таким: утворення еtringіту відбувається в перші терміни твердіння з високою швидкістю, що забезпечує зростання міцності каменю; еtringіт з його витягнутими голчастими кристалами забезпечує хороше армування структури цементного каменю; на процес

утворення еtringіту впливає значна кількість води і суттєво збільшується об'єм твердої фази, тим самим досягається зміцнення структури в перші терміни твердіння.

Еtringіт має більш високу стійкість порівняно з іншими гідратами і менше підтверджений фазовим перетворенням, що забезпечує стабільність структури твердіння; гель гідроксиду алюмінію сприяє зниженню внутрішніх напружень під час росту кристалів за рахунок більш еластичних зв'язків з кристалами, в результаті чого структура твердіння зберігає високу міцність і цілісність у процесі збільшення кристалічних фаз.

На основі АН<sub>3</sub> більше утворюються інші гідратні фази, в тому числі еtringіт; АН<sub>3</sub> заповнює пори та капіляри, забезпечує високу щільність структури твердіння.

Найвищий ефект досягається у разі одночасного використання С<sub>6</sub>А<sub>3</sub>Н<sub>32</sub> і АН<sub>3</sub>, що має місце під час гідратації С<sub>4</sub>А<sub>3</sub>Ş.

З урахуванням вищесказаного бачиться доцільним отримання клінкеру, що містить сульфоалюмінат кальцію і цементів на його основі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучеренко О. А. Структурні та термодинамічні характеристики еtringіту. *Технології бетонів*. № 9–10 (74–75). 2012. С. 60–63.
2. Дерев'янка В. М., Курятник Т. С., Кондратьєва Н. В. Механізм утворення еtringіту та його вплив на структуру цементного каменю. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 20. Одеса : Місто майстрів, 2005. С. 67–79.
3. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Хасан Є. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство : підруч. За ред. П. В. Кривенка. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.
4. Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Матеріалознавство для архітекторів та дизайнерів : навч. посіб. Київ : Вид-во «Ліра-К», 2019. 424 с.
5. Kondofesky-Mintova L., Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. *Proceedings Tenth International Conference* (October 2012, Prague, Czech Republic). P. 423.
6. Hansen T. Strength, elasticity and creep ad related to the internal structure of concrete. *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*. 1960. Washington, D. C. Vol. II. P. 709.
7. Rossetti A., Chiochio G., Paolini A. Expansive properties of the mixture C<sub>4</sub>AŞH<sub>17</sub> – 2CŞ. *Cement and Concrete Research*. 1982. Vol. 12, № 6. Pp. 577–585.
8. Nakamura T., Sudoh G., Akaiwa S. Mineralogical Composition of Expansive Cement Clinker Rich in SiO<sub>2</sub> and its Expansibility. *Symposium on the Chemistry of Cement*. Tokyo, 1968. Vol. IV. Pp. 351–365.
9. Pushkarova K., Sukhanevych M., Marsikh A. Using of untreated carbon nanotubes in cement composition. *Materials Science Forum*. Brno, Czech Republic, 2016. Vol. 865. Pp. 6–11.
10. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 448 с.
11. Пашенко О. О. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1995. 416 с.



12. Land G., Stephan D. The Acceleration of the Hydration of Cements with and without supplementary cementitious materials by C–S–H seeds. 19 Internationale Baustofftagung. 16–18 September, 2015. Bauhaus–Universität Weimar. Bundesrepublik Deutschland. Band 2. Pp. 1011–1017.

## REFERENCES

1. Kucherenko O.A. *Strukturni ta termodinamichni kharakterystyky etrynhitu* [Structural and thermodynamic characteristics of ettringite]. *Tekhnolohiyi betoniv* [Technologies of Concrete]. No. 9–10 (74–75), 2012, pp. 60–63. (in Ukrainian)
2. Derevyanko V.M., Kuryatnik T.S. and Kondratieva N.V. *Mekhanizm utvorennia etrynhitu ta yoho vplyv na strukturu tsementnoho kameniu* [The mechanism of ettringite formation and its effect on the structure of cement stone]. *Visnyk Odes'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture]. Iss. 20, Odessa : City of Masters, 2005, pp. 67–79. (in Ukrainian)
3. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskyi B.Ya. and Raksha V.O. *Budivel'ne materialoznavstvo : pidruchnik* [Materials Science in Construction : textbook]. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian)
4. Pushkariova K.K. and Kochevykh M.O. *Materialoznavstvo dlya Arhitektoriv ta Dizayneriv : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science for Architects and Designers : textbook]. Kyiv : Lira-K Publ., 2018, 424 p. (in Ukrainian)
5. Kondofesky-Mintova L. and Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference. October 2012, Prague, Czech Republic, p. 423.
6. Hansen T. Strength, elasticity and creep ad related to the internal structure of concrete. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement. 1960, Washington, D. C. Vol. II, p. 709.
7. Rossetti A., Chiocchio G. and Paolini A. Expansive properties of the mixture C4AŠH17 – 2CŠ. Cement and Concrete Research. 1982, vol. 12, no. 6, pp. 577–585.
8. Nakamura T., Sudoh G. and Akaiwa S. Mineralogical Composition of Expansive Cement Clinker Rich in SiO<sub>2</sub> and its Expansibility. Symposium on the Chemistry of Cement. 1968, Tokyo, vol. IV, pp. 351–365.
9. Pushkarova K., Sukhanevych M. and Marsikh A. Using of untreated carbon nanotubes in cement composition. Materials Science Forum. Brno, Czech Republic, 2016, vol. 865, pp. 6–11.
10. Runova R.F., Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. and Nosovs'kij Yu.L. *V'yazhuchi rehovini* [Binders]. Kyiv : Osnova Publ., 2012, 448 p. (in Ukrainian)
11. Pashchenko O.O. *V'yazhuchi materialy* [Binding materials]. Kyiv : Vishcha Shkola Publ., 1995, 416 p. (in Ukrainian)
12. Land G. and Stephan D. The Acceleration of the Hydration of Cements with and without supplementary cementitious materials by C–S–H seeds. 19 Internationale Baustofftagung. 16–18 September, 2015, Bauhaus–Universität Weimar. Bundesrepublik Deutschland, Band 2, pp. 1011–1017.

Надійшла до редакції: 05.04.2023.