

Досліджено сумісність роботи кремнеземистої добавки та полікарбоксилатних суперпластифікаторів, підібрані оптимальні склади комплексної органо-мінеральної добавки. Встановлено вплив цієї добавки на процеси гідратації та структуроутворення, а також на фізико-механічні властивості цементного каменю. Показано можливість заміни відомих силікатних добавок на більш дешеві та доступні природні або техногенні речовини

Ключові слова: комплексна органо-кремнеземиста добавка, мікрокремнезем, полікарбоксилатний суперпластифікатор, низькоосновні гідросилікати кальцію, гідрогранати

Исследована совместимость работы кремнеземистой добавки и поликарбоксилатных суперпластификаторов, подобраны оптимальные составы комплексной органо-минеральной добавки. Установлено влияние этой добавки на процессы гидратации и структурообразования, а также на физико-механические свойства цементного камня. Показана возможность замены известных силикатных добавок на более дешевые и доступные природные или техногенные вещества

Ключевые слова: комплексная органо-кремнеземистая добавка, микрокремнезем, поликарбоксилатный суперпластификатор, низкоосновные гидросиликаты кальция, гидрогранаты

УДК 691.075.3/691.54+691.327.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51836

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ, МОДИФІКОВАНИХ КОМПЛЕКСНИМИ ОРГАНО- КРЕМНЕЗЕМИСТИМИ ДОБАВКАМИ

К. К. Пушкарьова

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: sribm_pushkarova@mail.ru

К. О. Каверин

Аспірант*

E-mail: Kaverin_K_RAF@mail.ru

Д. О. Калантаєвський*

E-mail: kalantaev94@gmail.com

*Кафедра будівельних матеріалів

Київський національний

університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

Введення до бетонних сумішей модифікуючих добавок суттєво змінює механізм і кінетику процесів гідратації та твердіння в'язучих речовин, що істотно впливає як на технологічні властивості сумішей, так і на фізико-механічні властивості бетону, отриманого при їх твердінні. Слід зазначити, що мінеральні модифікуючі добавки в більшості випадків застосовуються у складі комплексних органо-мінеральних добавок і, найчастіше, спільно з суперпластифікаторами.

Проблеми модифікації цементних матриць комплексними добавками на основі суперпластифікаторів та мікрокремнезему розглядаються в роботах [1–3].

Високоміцний легкий бетон представляє собою багатокомпонентну композиційну систему, в якій регулювання властивостей можливе на всіх рівнях: на мікрорівні – за рахунок модифікації портландцементу комплексними органо-мінеральними добавками, які синергетично взаємодіють з в'язучою речовиною та забезпечують направлений синтез низькоосновних гідросилікатів кальцію у складі продуктів тверднення; а на мезо- та макрорівні – шляхом зміцнення контактної зони та коригування виду і гранулометричного складу заповнювача та наповнювача.

Враховуючи поліфункціональну дію комплексної органо-кремнеземистої добавки, що містить суперпластифікатор та мікрокремнезем, є актуальною проблема отримання високоміцних легких бетонів за рахунок спрямованого регулювання процесів фазо- та структуроутворення цементного каменю шляхом введення ефективних комплексних добавок.

2. Аналіз інформаційних джерел і постановка проблеми

У практиці високоміцних бетонів в якості регуляторів їх реологічних і фізико-механічних властивостей використовують різноманітні пластифікуючі добавки і активні мінеральні речовини, такі як: зола-винесення, мікрокремнезем, метакаолін [4–6]. При застосуванні суперпластифікаторів основна їх дія пов'язана з уповільненням розчинення клінкерних мінералів цементу внаслідок поверхневих реакцій, що знижують швидкість гідратації [7]. При цьому показано [8, 9], що суперпластифікатори можуть мати зовсім різну ефективність дії залежно від їх витрати і хімічного складу, що дозволяє забезпечити довговічність та високу міцність бетону за умови зниження В/Ц та використання ефективних модифікуючих добавок, в першу чергу полікарбоксилатних суперерпластифікаторів [10, 11].

Встановлено [12], що при введенні до цементної матриці мікрокремнезему основним фактором, що визначає його дію, є реакція взаємодії кремнеземистої складової та гідроксиду кальцію з утворенням низькоосновних гідросилікатів типу CSH(I). Також відмічається [13], що міцність контактної зони зростає при збільшенні кількості введеного мікрокремнезему.

Особливо актуальним це питання стає при оптимізації складу матриці високоміцних легких бетонів, оскільки міцнісні показники в цьому випадку визначаються саме цементною матрицею, а не заповнювачем.

В той же час питання сумісності роботи мікрокремнезему з різними видами суперпластифікаторів, які використовують у сучасних в'язучих системах, розкрито частково, що обумовлює необхідність проведення додаткових досліджень в цьому напрямку.

3. Мета та задачі дослідження

Метою проведення досліджень є визначення особливостей процесів твердіння та структуроутворення цементних композицій, модифікованих комплексними органо-кремнеземистими добавками.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити оптимальний склад комплексної органо-кремнеземистої добавки і дослідити сумісність дії її компонентів при введенні до цементної композиції;
- дослідити вплив комплексної органо-мінеральної добавки на фізико-механічні властивості отриманого штучного каменю;
- встановити особливості процесів структуроутворення та формування фазового складу цементних композицій, модифікованих комплексною органо-кремнеземистою добавкою;
- визначити доцільні галузі використання розроблених цементних композицій.

4. Сировинні матеріали

Дослідження проводили з використанням портландцементу ПЦ І 500–Н, полікарбоксилатних суперпластифікаторів та кремнеземистих добавок різного походження.

За результатами ІЧ-спектроскопії, що виконана на спектрографі Tensor-37 фірми Bruker, добавки на основі полікарбоксилатів (рис. 1) MC PowerFlow 3100 та SikaPlast 555W отримані на основі поліетиленгліколів, а саме: MC PowerFlow 3100 містить поліетиленгліколь з молекулярною масою 3000, що в своєму складі має поліетиленполіамін (ПЕПА), а SikaPlast 555W – поліетиленгліколь з молекулярною масою 1000, що в своєму складі має поліакриламід.

Всі використані кремнеземисті добавки за величиною питомої поверхні відносяться до високодисперсних, а саме: побічні продукти Стаханівського феросплавного заводу ($S_{\text{пит}}=36398 \text{ см}^2/\text{г}$), ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» ($S_{\text{пит}}=9478 \text{ см}^2/\text{г}$) та продукти торгових марок Elkem Microsilica Grade 940–U

($S_{\text{пит}}=24795 \text{ см}^2/\text{г}$) і SikaFume ($S_{\text{пит}}=8556 \text{ см}^2/\text{г}$), тонкомелене ніздрювате скло «МНС» ($S_{\text{пит}}=10485 \text{ см}^2/\text{г}$) та трепел Коноплянського родовища, помелений 2 години у кульовому млині ($S_{\text{пит}}=21300 \text{ см}^2/\text{г}$). За результатами хімічного аналізу кремнеземисті добавки техногенного походження містять в своєму складі від 88 до 92 % SiO_2 , а добавка природного походження (трепел) від 76 до 88 % SiO_2 .

5. Методи дослідження впливу комплексної органо-кремнеземистої добавки на фізико-механічні властивості та процеси структуроутворення цементного каменю

Дослідження проводили з використанням комплексу фізико-механічних методів досліджень згідно діючих нормативних документів.

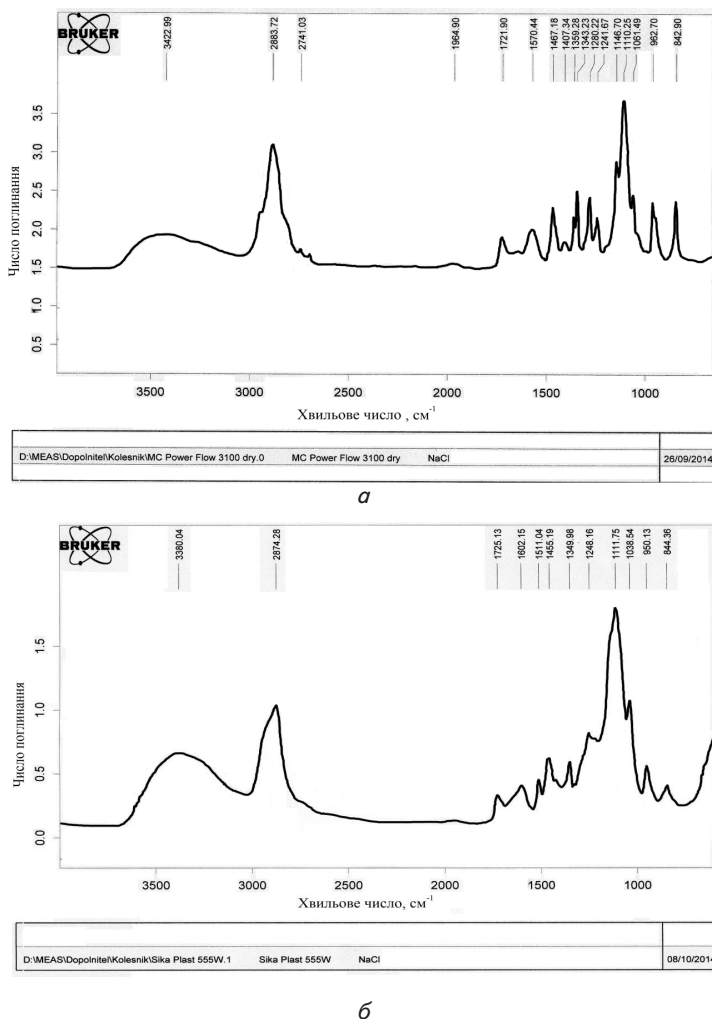


Рис. 1. Інфрочервоні спектри полікарбоксилатних суперпластифікаторів: а – MC PowerFlow3100; б – SikaPlast 555W

Суперпластифікатори у вигляді водного розчину вводили у кількості 0,5; 1,0 та 1,5 мас %, а мікрокремнезем – у кількості 5; 10 і 15 мас % від маси цементу.

Визначення кінетики зміни міцності проводили на зразках розмірами 2×2×2 см, що тверділи в стан-

дартних умовах протягом 3, 7 та 28 діб. Водцементне відношення (В/Ц) для зразків-кубів на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою, становило 0,24.

Дослідження морфології новоутворень та механізму формування фазового складу і структури цементного каменю були проведені за допомогою рентгенофазового (РФА) і диференційно-термічного аналізів (ДТА), а також растрової електронної мікроскопії [16–20]. Рентгенофазовий аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3М, диференціально-термічний аналіз – на дериватографі системи Р. Паулік, І. Паулік, Л. Ердей фірми MOM (Будапешт), а електронно-мікроскопічні дослідження структури штучного каменю – на мікроскопі РЕММА-102.

6. Результати досліджень властивостей цементних зразків, модифікованих комплексною органо-кремнеземистою добавкою

Результати визначення механічної міцності цементних зразків-кубів на основі портландцементу ПЦ 500-I-N, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою представлені в табл. 1. При введенні даних суперпластифікаторів в кількості 0,5...1,5 % від маси цементу (табл. 1, склади № 2..7) мож-

на відмітити, що на ранніх етапах твердіння (3...7 доба) найбільший приріст міцності спостерігається при використанні добавки суперпластифікатора MC PowerFlow 3100 (табл. 1, склади № 2..4), при цьому міцність при стиску на 3-ю добу досягає 68,75 МПа (склад № 3), що в 4,7 рази більше міцності контрольних зразків. На пізніх етапах твердіння (28 доба) найбільш ефективною є добавка суперпластифікатора SikaPlast 555W (табл. 1, склади № 5..6), введення якої дало змогу підвищити міцність при стиску до 100,9 МПа (склад № 5), що в 2 рази перевищує міцність контрольних зразків.

Наступним кроком досліджень було визначення сумісності роботи полікарбоксилатного суперпластифікатора та різних видів кремнеземистих добавок (табл. 1, склади № 8..43) при модифікації вищевказаних цементних матриць.

Аналіз отриманих даних дозволяє зазначити, що при введенні до модифікованої цементної матриці кремнеземистої добавки міцність при стиску в ранні терміни зростає від 2 до 55 %, а на 28 добу – до 30 % залежно від виду кремнеземистої складової та типу суперпластифікатора.

Якщо порівнювати дані результати з міцністю бездобавочних зразків (табл. 1, склад № 1), то модифікація цементної матриці комплексною органо-кремнеземистою добавкою сприяє збільшенню міцності на 3 добу у 6 разів, на 7 добу – у 3 рази та на 28 добу – у 2 рази, тобто з часом ефект від введення добавки зменшується.

Таблиця 1

Склади модифікованих цементних композицій та кінетика зміни міцності цементного каменю у часі

№ складу	Цемент ПЦ I -500 Н, мас. %	Вид та кількість кремнеземистої добавки		Суперпластифікатор		В/Ц	Графічна інтерпретація зміни міцності у часі																				
		назва	мас. %	назва	мас. %																						
1	2	3		4		5	<table border="1"> <caption>Strength development for MC PF 3100 (MPa)</caption> <thead> <tr> <th>Time (days)</th> <th>1.50%</th> <th>1%</th> <th>0.50%</th> <th>0%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>64.92</td> <td>68.75</td> <td>62.58</td> <td>14.40</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>63.00</td> <td>71.68</td> <td>81.60</td> <td>31.90</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>84.30</td> <td>87.50</td> <td>84.33</td> <td>47.7</td> </tr> </tbody> </table>	Time (days)	1.50%	1%	0.50%	0%	3	64.92	68.75	62.58	14.40	7	63.00	71.68	81.60	31.90	28	84.30	87.50	84.33	47.7
Time (days)	1.50%	1%	0.50%	0%																							
3	64.92	68.75	62.58	14.40																							
7	63.00	71.68	81.60	31.90																							
28	84.30	87.50	84.33	47.7																							
2	100	–	–	–	–	0,4																					
3	100	–	–	–	–	1,5																					
						1																					
4	100	–	–	MC PF 3100	–	0,24																					
						0,5																					
						0,24																					
5	100	–	–			1,5	<table border="1"> <caption>Strength development for SikaPlast 555w (MPa)</caption> <thead> <tr> <th>Time (days)</th> <th>1.50%</th> <th>1%</th> <th>0.50%</th> <th>0%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>58.75</td> <td>45.08</td> <td>57.08</td> <td>14.40</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>64.38</td> <td>78.50</td> <td>59.67</td> <td>31.90</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>100.9</td> <td>97.4</td> <td>76</td> <td>47.7</td> </tr> </tbody> </table>	Time (days)	1.50%	1%	0.50%	0%	3	58.75	45.08	57.08	14.40	7	64.38	78.50	59.67	31.90	28	100.9	97.4	76	47.7
Time (days)	1.50%	1%	0.50%	0%																							
3	58.75	45.08	57.08	14.40																							
7	64.38	78.50	59.67	31.90																							
28	100.9	97.4	76	47.7																							
6	100	–	–			1																					
						0,24																					
7	100	–	–	SikaPlast 555w	–	0,5																					
						0,24																					

Продовження таблиці 1

1	2	3		4		5	6
8	100	«Стаханівський»	15	MC PF 3100	1	0,24	
9	100		10		1	0,24	
10	100		5		1	0,24	
11	100	«Стаханівський»	15	SikaPlast 555w	1,5	0,24	
12	100		10		1,5	0,24	
13	100		5		1,5	0,24	
14	100	«АрселорМіттал Кривий Ріг»	15	MC PF 3100	1	0,24	
15	100		10		1	0,24	
16	100		5		1	0,24	
17	100	«АрселорМіттал Кривий Ріг»	15	SikaPlast 555w	1,5	0,24	
18	100		10		1,5	0,24	
19	100		5		1,5	0,24	
20	100	«Elkem Microsilica Grade 940-U»	15	MC PF 3100	1	0,24	
21	100		10		1	0,24	
22	100		5		1	0,24	

Продовження таблиці 1

1	2	3		4		5	6
23	100	«Elkem Microsilica Grade 940-U»	15	SikaPlast 555w	1,5	0,24	
24	100		10		1,5	0,24	
25	100		5		1,5	0,24	
26	100	«SikaFume»	15	MC PF 3100	1	0,24	
27	100		10		1	0,24	
28	100		5		1	0,24	
29	100	«SikaFume»	15	SikaPlast 555w	1,5	0,24	
30	100		10		1,5	0,24	
31	100		5		1,5	0,24	
32	100	«МНС»	15	MC PF 3100	1	0,24	
33	100		10		1	0,24	
34	100		5		1	0,24	
35	100	«МНС»	15	SikaPlast 555w	1,5	0,24	
36	100		10		1,5	0,24	
37	100		5		1,5	0,24	

1	2	3	4	5	6	
38	100	«Трепел»	15	1	0,24	
39	100		10			
40	100		5			
41	100	«Трепел»	15	1,5	0,24	
42	100		10			
43	100		5			

Отриманні результати є порівнювальні, причому міцність модифікованих композицій на 28 добу змінюється в межах 110...116 МПа, причому враховуючи стабільність нарощування міцності у часі кращою є комплексна добавка, що містить PowerFlow3100 та трепел: міцність цементних зразків при введенні такої добавки досягає 95,8; 110,2; 116,4 МПа відповідно на 3,7 та 28 добу (табл. 1, склад № 40) [21–23].

Результати даних РФА та ДТА приведені на рис. 1 та рис. 2. Відомо, що при гідратації портландцементу, в тому числі ПЦ І 500-Н після 28 діб твердіння в складі новоутворень фіксується портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=0,493$; $0,311$; $0,263$; $0,193$; $0,179$ нм) і частково гідросилікати кальцію С-S-Н(I) ($d=0,304$; $0,277$; $0,182$; $0,162$ нм), С-S-Н(II) ($d=0,49$; $0,304$; $0,278$; $0,271$; $0,191$ нм), тоберморит $11,3 \text{ \AA}$ ($d=0,307$; $0,215$; $0,207$; $0,176$ нм). Наявність вищевказаних сполук підтверджується також нашими дослідженнями (рис. 1, крива 1).

При введенні до портландцементу суперпластифікаторів (рис. 1, крива 2, 3) має місце деяке збільшення інтенсивності піків гідросилікатів кальцію різної основності, що дозволяє стверджувати про збільшення їх кількості. При вивченні процесів гідратації композицій на основі портландцементу, модифікованого одночасно мікрокремнеземом та суперпластифікаторами, можна відмітити подібність новоутворень, а відповідно, і отриманих рентгенограм та термограм незалежно від виду використаних добавок. Фазовий склад новоутворень змінюється за такою тенденцією як і склад продуктів гідратації немодифікованого портландцементу (рис. 1, крива 1). Як свідчать дані РФА (рис. 1, крива 4–7) фіксуються гідросилікати кальцію різної основності: С-S-Н(I) ($d=0,304$; $0,277$; $0,182$; $0,162$ нм), С-S-Н(II) ($d=0,49$; $0,304$; $0,278$; $0,271$; $0,191$ нм), тоберморит $11,3 \text{ \AA}$ ($d=0,307$; $0,215$; $0,207$; $0,176$ нм), а також присутні дифракційні відображення портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=0,493$; $0,311$; $0,263$; $0,193$; $0,179$ нм), кальци-ту CaCO_3 ($d=0,304$; $0,228$; $0,263$; $0,209$; $0,191$ нм). В той

же час наявність дифракційних відображень ($d=0,303$; $0,271$; $0,214$; $0,197$; $0,176$ нм) свідчить про формування плазоліту $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2(\text{SiO}_2\cdot\text{CO}_2)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ та гідрогранатів ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ($d=0,278$; $0,227$; $0,202$ нм) [14–20, 24]. Синтез вищевказаних гідросилікатних фаз підтверджується даними диференційно-термічного аналізу (рис. 3). На термограмах цементного каменю поряд з традиційними ендотермічними ефектами: $100\text{...}150^\circ\text{C}$ (видалення адсорбційно зв'язаної води з продуктів гідратації); $530\text{...}550^\circ\text{C}$ (дегідратація $\text{Ca}(\text{OH})_2$), $760\text{...}900^\circ\text{C}$ (декарбонізація CaCO_3), зафіксовані додаткові екзотермічні ефекти в інтервалах температур $330\text{...}380$ і $800\text{...}830^\circ\text{C}$, що свідчить про присутність тобермориту $11,3 \text{ \AA}$. Поряд з цим наявність ендоефекту в інтервалі температур $490\text{...}530^\circ\text{C}$ обумовлена розкладанням гідрогранатів [18, 24, 26].

За даними РФА та ДТА слід відмітити, що при введенні кремнеземистих добавок до складу портландцементу спостерігається зв'язування $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у гідросилікати кальцію, що підтверджується зниженням інтенсивності дифракційних відображень цієї сполуки (рис. 1, кр. 4–7) та зменшенням ендоефекту в інтервалі температур $530\text{...}535^\circ\text{C}$ (рис. 2, кр. 4–7). При гідратації портландцементу з добавкою мікрокремнезему має місце утворення не тільки голчастих низькоосновних гідросилікатів кальцію, а також гідрогранатів ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) та плазоліту $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2(\text{SiO}_2\cdot\text{CO}_2)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, що позитивно буде впливати на фізико-механічні властивості у часі як цементного каменю, так і бетону. Це також підтверджується даними [26].

З метою перевірки даних РФА та ДТА, а також уточнення особливостей процесів структуроутворення, що відбуваються при модифікації портландцементів комплексними органо-мінеральними добавками за допомогою електронної мікроскопії було досліджено поверхню сколу штучного каменю після твердіння протягом 28 діб (рис. 3).

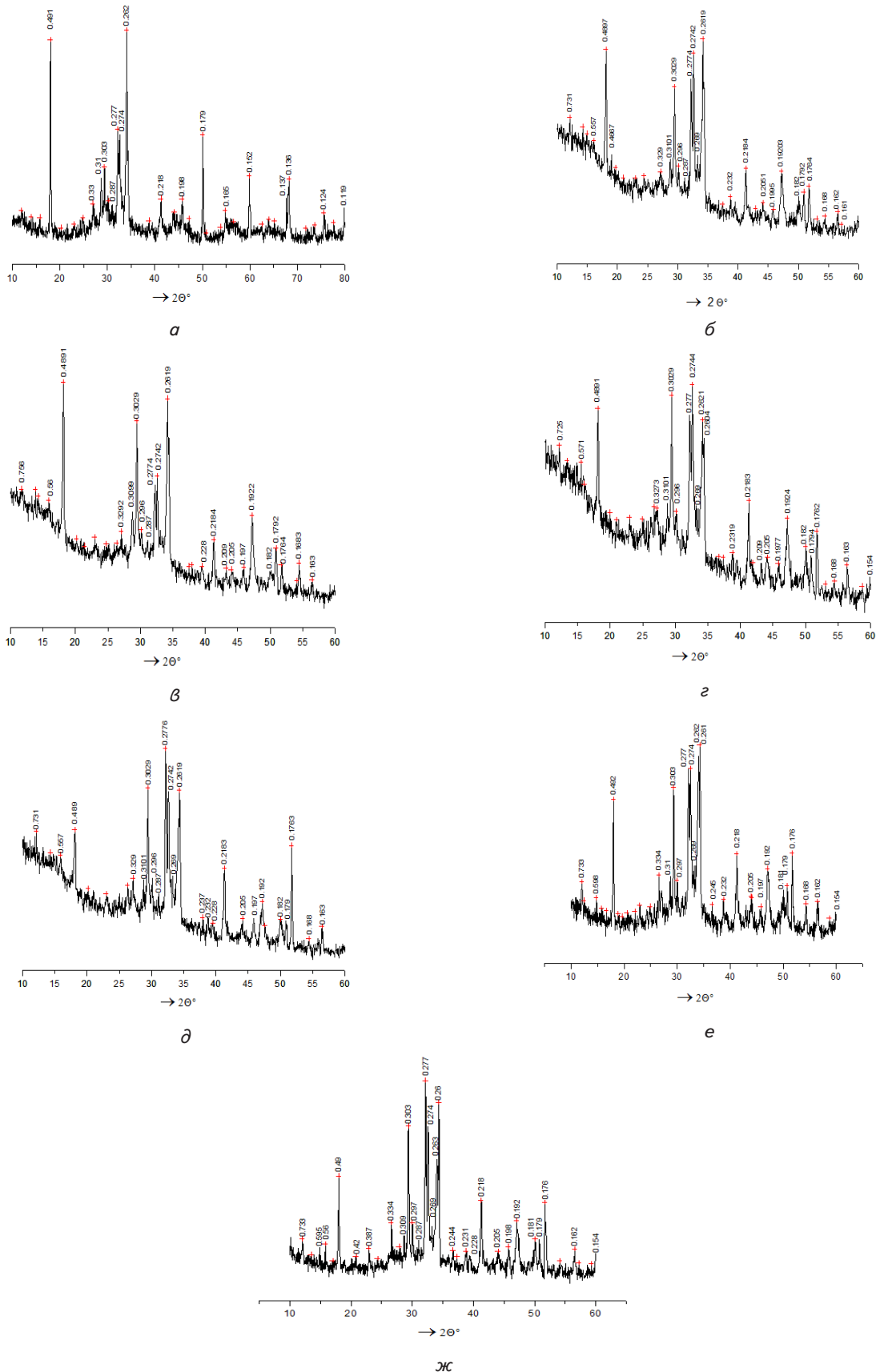


Рис. 2. Рентгенограмми зразків цементного каменю, отриманих при твердінні протягом 28 діб наступних композицій: *a* – ПЦ I 500-Н; *б* – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»; *в* – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»; *г* – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»+МК «Elkem Microsilica Grade 940-U»; *д* – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»+МК «Elkem Microsilica Grade 940-U»; *е* – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»+«Трелел»; *ж* – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»+«Трелел»

Згідно отриманим даним (рис. 3, а–з) на фотографіях сколу зразків фіксується утворення великої кількості модифікованих голкоподібних гідросилікатів кальцію довжиною 5...20 мкм, що відносяться до типу CSH (I) та тобермориту 11,3 Å.

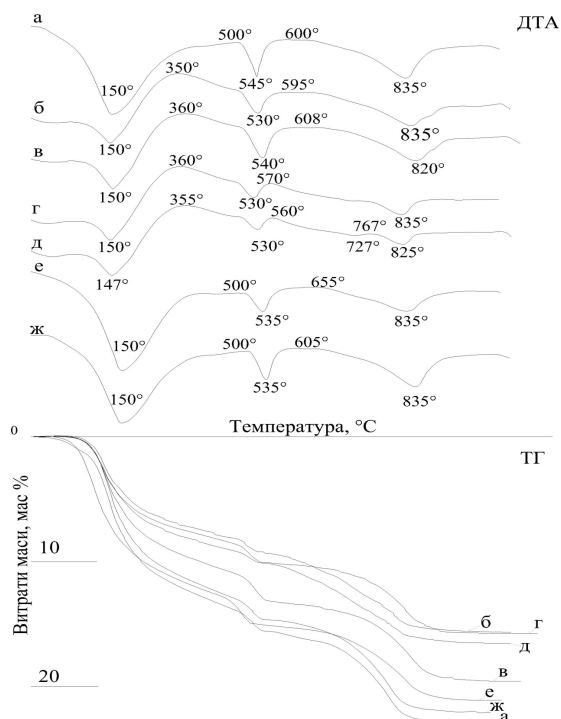


Рис. 3. Дериватограми зразків цементного каменю, отриманих при твердінні протягом 28 діб наступних композицій: а – ПЦ I 500-Н; б – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»; в – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»; г – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»+МК «Elkem Microsilica Grade 940-U»; д – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»+МК «Elkem Microsilica Grade 940-U»; е – ПЦ I 500-Н+СП «PF3100»+«Трепел»; ж – ПЦ I 500-Н+СП «SikaPlast555W»+«Трепел»

За результатами електронної мікроскопії, що підтверджуються також даними РФА та ДТА, видно, що крім голкоподібних гідросилікатів кальцію фіксуються кристали кубічної форми з довжиною ребра 2...3 мкм (рис. 4), що відповідають гідрогранатам.

7. Обговорення результатів впливу комплексної органік-кремнеземистої добавки на портландцементі композиції

Особливий інтерес привертає зміна фазового складу новоутворень при тривалому твердінні цементу, модифікованого комплексною добавкою, оскільки в досліджених композиціях створюються стиснені умови за рахунок зниження В/Ц, що обумовлює направлений синтез кристалохімічно подібних сполук, в тому числі низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH (I), тобермориту 11,3 Å, плазоліту та гідрогранатів, що здатні до зрощування та сприяють формуванню більш досконалої мікроструктури високоміцного цементного каменю [24].

Згідно з [19, 25] необхідною умовою зрощення кристалів за схемою Руайе-Фриделя є їх кристалохімічна подібність, яка оцінюється величиною відмінності параметрів кристалічних ґраток і не повинна перевищувати 15 %. Такі

сполуки як CSH (I); тоберморит 11,3 Å; плазоліт та гідрогранати є кристалохімічно подібними по параметру “а” і можуть утворювати відповідні зрощення, що є передумовою для появи значної кількості контактів зрощування між новоутвореннями, які сприяють отриманню досить щільної структури з низькою пористістю та мають домінуючий вплив на фізико-механічні властивості штучного каменю, в тому числі на його міцність [19] (рис. 5, а, б).

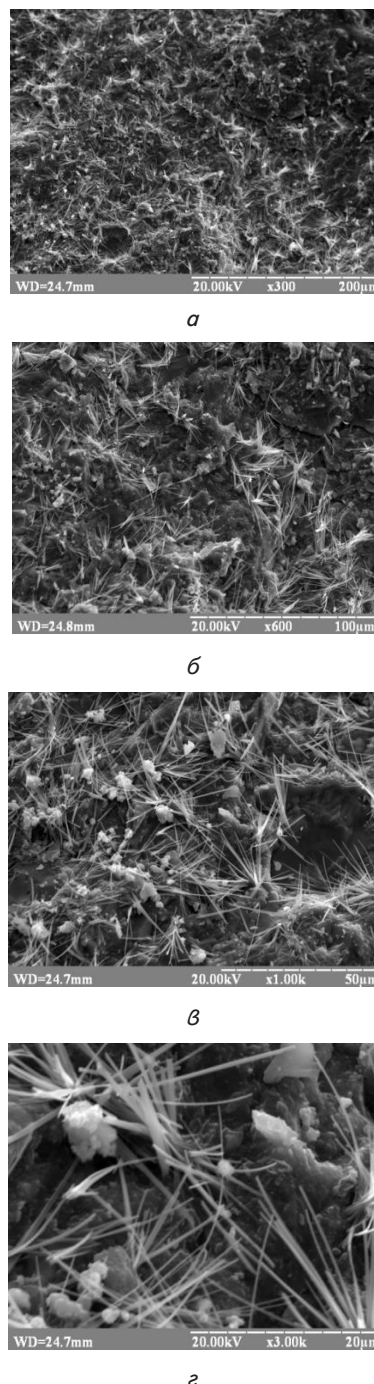


Рис. 4. Фотографії мікроструктури цементного каменю, модифікованого комплексною органік-кремнеземистою добавкою, що містить полікарбоксилатний суперпластифікатор «SikaPlast 555W» і мелений трепел Коноплянського родюща (час твердіння – 28 діб): а – збільшення ×300 разів; б – збільшення ×600 разів; в – збільшення ×1000 разів; г – збільшення ×3000 разів

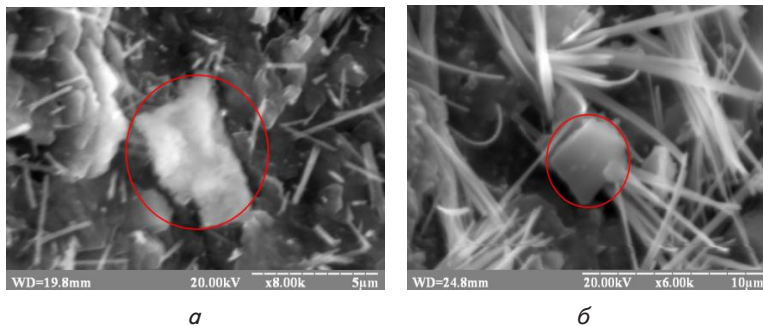


Рис. 5. Фотографії, отримані за допомогою електронно-растрової мікроскопії, гідрогранатів, що утворилися після 28 діб твердіння цементних композицій, модифікованих полікарбоксилатними суперпластифікаторами та кремне-земистими добавками:
а – мікрокремнеземом «Elkem Microsilica Grade 940-U»; **б** – трепелом Коноплянського родошица

8. Висновки

Проведеними дослідженнями показано, що за критеріями зміни міцності у часі високомолекулярна добавка «PowerFlow 3100» краще співпрацює з кремнеземистою добавкою на основі меленого трепелу, а низькомолекулярна добавка SikaPlast 555W – з технічними кремнеземами, а саме Elkem Microsilica Grade 940-U.

Досліджено фізико-механічні властивості цементних композицій, модифікованих комплексними ор-

гано-кремнеземистими добавками та показано, що ефективність використання комплексної добавки досягає 100 %, якщо порівнювати з чистим портландцементом та 30 %, якщо порівнювати з цементними системами, модифікованими тільки суперпластифікаторами.

З використанням фізико-хімічних методів дослідження показано, що при введенні комплексної орґано-кремнеземистої добавки до портландцементу, має місце тенденція зменшення кількості портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та збільшення фаз низькоосновних гідросилікатів кальцію C-S-H(I), C-S-H(II), тобермориту $11,3 \text{ \AA}$, а також фіксуються зародки гідрогранатів $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ та плазоліту $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2 \cdot \text{CO}_2) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, що є кристалохімічно подібними вищенаведеним сполукам, та забезпечують отримання щільної і високоміцної структури цементного каменю.

Розроблені цементно-кремнеземисті композиції були використані для отримання високоміцних легких керамзитобетонів класів C20/25...C32/40 (B25...B40), при середній густині $1600 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$, в той час як в разі використання немодифікованого портландцементу можливо отримати керамзитобетони такої ж середньої густини класів C10/12,5...C20/25 (B12,5...B25).

Література

1. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика, изд. 2-е, переработанное и дополненное [Текст] / В. Г. Батраков. – М., 1998. – 768 с.
2. Баженов Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] / Ю. М., Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 380 с.
3. Дворкин, Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями [Текст] / Л. И. Дворкин, В. Н. Выровой и др. – Киев: Будівельник, 1991. – 136 с.
4. Rixom, W. R. Chemical Admixtures for concrete [Text] / W. R. Rixom, N. P. Mailvaganam. – E & FN Spon, London, UK, 1998. – 516 p.
5. Malhotra, V. M. Innovate applications of superplasticizers in concrete – a review [Text] / V. M. Malhotra; P. K. Mehta (Ed.) // Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology. – Rome, 1997. – P. 271–314.
6. Кирсанова, А. А. Комплексный модификатор с метакаолином для получения цементных композитов с высокой ранней прочностью и стабильностью [Текст] / А. А. Кирсанова, Л. Я. Крамар, Т. Н. Черных, Т. М. Аргынбаев, З. В. Стафеева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 49–56.
7. Plank, J. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption [Text] / J. Plank, C. Hirsch // Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 37, Issue 4. – P. 537–542. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.007
8. Collepardi, M. Advances in Superplasticizing Admixtures [Text] / M. Collepardi // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. – Bucharest, Romania, 2003. – P. 13–36.
9. Spiratos, N. Superplasticizers for concrete: Fundamentals, Technology, and Practice [Text] / N. Spiratos, M. Page, N. Mailvaganam, V. M. Malhotra, C. Jolicoeur. – Copyright © 2003 by Supplementary Cementing, 2003.
10. Tseng, Y. C. New carboxylic acid-based superplasticizer for high-performance concrete [Text] / Y. C. Tseng, W. L. Wu, H. L. Huang, C. T. Wang, K. C. Hsu; V. M. Malhotra (Ed.) // Proceedings of the 6-th CAMET/ACI Conference on Superplasticizers in Concrete. – Nice, France, ACI SP-195, 2000. – P. 401–412.
11. Tsukada, K. Performance of an advanced polycarboxylate-based powder superplasticizer [Text] / K. Tsukada, M. Ishimori, M. Kinoshita; V. M. Malhotra, (Ed.) // Proceedings of the 7-th CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – Berlin, Germany, ACI SP-217-26, 2003. – P. 393–408.
12. Monasterio, M. Effect of addition of silica- and amine functionalized silica-nanoparticles on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel [Text] / M. Monasterio, J. J. Gaitero, E. Erkizia, A. M. Guerrero Bustos, L. A. Miccio, J. S. Dolado, S. Cerveny // Journal of Colloid and Interface Science. – 2015. – Vol. 450. – P. 109–118. doi: 10.1016/j.jcis.2015.02.066

13. Kar, A. Estimation of C-S-H and calcium hydroxide for cement pastes containing slag and silica fume [Text] / A. Kar, I. Ray, A. Unnikrishnan, J. F. Davalos // Construction and Building Materials, Morgantown. – 2012. – Vol. 30. – P. 505–515. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.029
14. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, 1973. – 480 с.
15. Пащенко, О. О. В'яжучі матеріали [Текст] / О. О. Пащенко, В. П. Сербін, О. О. Старчевська. – К.: Вища школа, 1995. – 416 с.
16. Тимашев, В. В. Избранные труды. Синтез и гидратация вяжущих материалов [Текст] / В. В. Тимашев. – М.: Наука, 1986. – 424 с.
17. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
18. Рамачандран, В. С. Применение дифференциально-термического анализа в химии цементов [Текст] / В. С. Рамачандран; под ред. В. Б. Ратинова; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1977. – 408 с.
19. Ларионова, З. М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона [Текст] / З. М. Ларионова, Л. В. Никитина, В. Р. Гаражин. – М.: Стройиздат, 1977. – 262 с.
20. Рид, С. Электронно-зондовый микроанализ [Текст] / С. Рид. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
21. Пушкарьова, К. К. Дослідження впливу органо-кремнеземистих добавок на міцність цементних композицій [Текст] / К. К. Пушкарьова, К. О. Каверин // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 57. – С. 371–379.
22. Пушкарьова, К. К. Дослідження процесів структуроутворення цементних композицій, модифікованих органо-кремнеземистими добавками [Текст] / К. К. Пушкарьова, К. О. Каверин, М. С. Дмитров // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 56. – С. 201–208.
23. Пушкарьова, К. К. Особливості модифікації цементної матриці для отримання високоміцних легких керамзитобетонів [Текст] / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, К. О. Каверин // Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. – 2014. – Вип. 52. – С. 43–48.
24. Index (inorganic) to the Powder Diffraction File [Text] / ASTM Publication PD IS – 19 i, American Society for Testing and Materials, York, Pennsylvania, 1969. – 253 p.
25. Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов [Текст] / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1973. – 504 с.
26. Штарк, И. Цемент и известь [Текст] / И. Штарк, Б. Вихт; под ред. П. Кривенко; пер. с нем. А. Тулаганова. – Киев, 2008. – 480 с.
27. Труды VI Международного конгресса по химии цемента (1975, Москва). Т. 2. Кн. 1 [Текст]. – М.: Стройиздат, 1976.