

**Обрані праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції
з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд
«ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ
СПОРУД І БУДІВЕЛЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ»,
24-26 квітня 2013 р.**

УДК 691

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.138.2013.102065>

*Д-р техн. наук А.А. Плугін,
д-р хім. наук А.М. Плугін (УкрДАЗТ),
канд. хім. наук О.С. Кагановський
(ТОВ «Капітал Менеджмент», м. Харків),
інж. О.В. Градобоев (ТОВ «БШК»,
Харківська обл.)*

*A.A. Plugin, A.N.Plugin,
A.S.Kaganovsky, O.V.Gradoboev*

**КОЛОЇДНА ХІМІЯ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ЯК ОСНОВА
ВИРОБНИЦТВА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ МІНЕРАЛЬНИХ
В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН ТА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

**COLLOIDAL CHEMISTRY AND PHYSICAL AND CHEMICAL
MECHANICS AS THE BASIS FOR THE PRODUCTION OF RESOURCE
MINERAL BINDERS AND HIGH-PERFORMANCE COMPOSITE
MATERIALS BASED ON THEM**

Постановка проблеми. Портландцемент і композиційні матеріали на його основі – бетон, залізобетон з кінця XIX – початку XX ст. до теперішнього часу є основними конструкційними матеріалами. Не очікуються радикальні зміни і у найближчому майбутньому. Більш того, у наш час властивості портландцементу і бетону удосконалюються, це удосконалення прискорюється, з'являються нові види бетону – самоущільнюючий, високофункціональний, реакційно-порошковий, галузі його застосування продовжують розширюватися. Так, несучі конструкції всіх хмарочосів 1920–70-х рр.,

у т.ч. знаменитих Chrysler Building, Empire State Building, World Trade Center, Sears Tower – виключно металеві, тоді як рекордні хмарочоси Азії 1990–2010 рр., такі як Петронас, Бурдж-Халіфа, зведені вже із залізобетону.

Виходячи з викладеного, можна стверджувати, що технологія бетону на сьогодні переживає науково-технічну революцію завдяки інтенсивному розвитку науки про бетон і подібні йому композиційні матеріали – бетонознавства. Бетонознавство є міждисциплінарною галуззю знань, що вивчає процеси твердіння і руйнування в'язучих матеріалів

і бетону з позицій фундаментальних наук. Деякі із видатних вчених у галузі бетонознавства навіть у назвах своїх праць, що вже стали класичними, підкреслювали їх ґрунтування на фундаментальних науках – фізиці [1], хімії [2–6], фізичній хімії в цілому [7–10] або її розділах, в основному термодинаміці [11–12], математиці [13–16] і навіть геології [17].

Проте такий важливий і дуже плідний розділ фізичної хімії, як колоїдна хімія, за думкою авторів, у бетонознавстві дотепер застосовувався недостатньо ефективно і лише останніми роками з'явилися праці, де системно викладена колоїдна хімія для цементів, бетонів і конструкцій із них [18–22].

Мета роботи – викладення у концентрованому вигляді найбільш важливих положень колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них.

Історичний нарис розвитку колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки, у т.ч. цементів, бетонів і конструкцій із них. Термін «Колоїдна хімія» походить від давньогрецького κόλλα – клей [23]. В англomовних країнах замість цієї назви застосовують Interface and colloid science – дослівно «Поверхнева та колоїдна наука», або «Фізична хімія дисперсних систем і поверхневих явищ». Її прикладне значення у [23] характеризується так: «Розробляє технології будівельних матеріалів, буріння гірських порід, золь-гель технології. Відіграє фундаментальну роль у нанотехнологіях».

Колоїдна хімія формувалась у XVIII–XIX ст. у результаті накопичення знань про дисперсні системи і матеріали:

1745–55 рр. – Михайло Васильович Ломоносов (Росія) досліджує і застосовує дисперсію металів у склі;

1777 р. – Карл Вільгельм Шеєле (Швеція) відкриває явище адсорбції газів вугіллям;

1785 р. – Товій Єгорович Ловіц (Росія) відкриває явище адсорбції із розчинів;

1806 р. – П'єр-Сімон Лаплас (Франція) пояснює всмоктування води

пористими матеріалами та її підняття ними капілярним тиском;

1808 р. – Федір Федорович Рейсс (Росія) відкриває явища електроосмосу та електрофорезу;

1845 р. – Франческо Сельмі (Італія) встановлює різницю між колоїдними та істинними розчинами;

1853 р. – Герман фон Гельмгольц (Німеччина) надає опис подвійного електричного шару ПЕШ;

1857 р. – Майкл Фарадей (Велика Британія) – створює дисперсії металів у рідкій фазі.

Остаточне формування колоїдної хімії в окрему наукову дисципліну пов'язують з ім'ям Томаса Грема (рис. 1), який у 1860-ті рр. проводить системні дослідження колоїдів, уводить в обіг терміни «колоїд», «золь», «гель», відкриває явище діалізу.

Подальший розвиток колоїдної хімії відбувався так:

1878 р. – Джозая Віллард Гіббс (США) розробив термодинаміку поверхневих явищ;

1905 р. – Альберт Ейнштейн (Німеччина) – надав математичний опис броунівського руху;

1917 р. – Ірвінг Ленгмюр (США) розробив кінетичну теорію адсорбції;

1928 р. – Петро Олександрович Ребіндер (СРСР) відкрив явище адсорбційного зниження міцності;

1938 р. – Борис Володимирович Дерягін і Лев Давидович Ландау (СРСР) і приблизно у той же час незалежно від них Фервей і Овербек (E.J.W.Verwey, J.Th.G.Overbeek, Нідерланди) розробили теорію стійкості колоїдів ДЛФО;

1940-50-ті рр. – Петро Олександрович Ребіндер (СРСР) досліджує структуроутворення дисперсій, створює новий розділ колоїдної хімії – фізико-хімічну механіку дисперсних систем.

Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка в бетонознавстві, хоча й описово, використовувались з другої половини XIX ст.

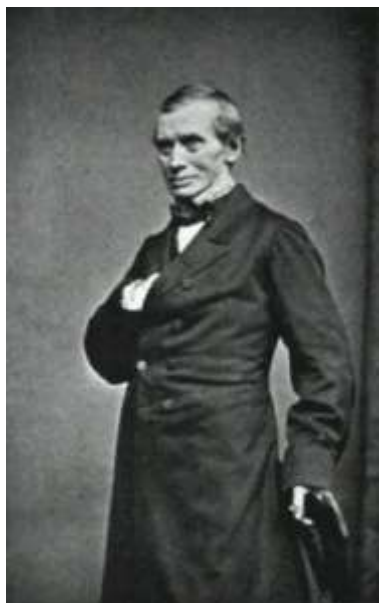


Рис. 1. Томас Грем
(Thomas Graham, 1805-69 pp.,
Велика Британія)

У 1867 р. Вільгельм Михаеліс (Michaelis, Німеччина) пропонує колоїдно-хімічну теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така: твердофазова реакція гідратації мінералів цементу (топохімічний механізм гідратації) – колоїдація гідратованих мінералів цементу – склеювання колоїдних часток у цементний гель.

1883 р. – Анрі Луї Ле-Шательє (Le Chatelier, Франція) пропонує кристало-хімічну теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така:

розчинення мінералів цементу – утворення пересиченого відносно продуктів гідратації водного розчину – кристалізація із пересиченого розчину продуктів гідратації (крізьрозчинний механізм гідратації) – механічне переплетення кристалів, яке забезпечує міцність цементного каменю і бетону. Очевидно, Ле-Шательє доступним йому методом світової мікроскопії спостерігав дещо подібне рис. 2, на якому проглядається послідовне зростання і переплетення кристалів продуктів гідратації в'язучої речовини.

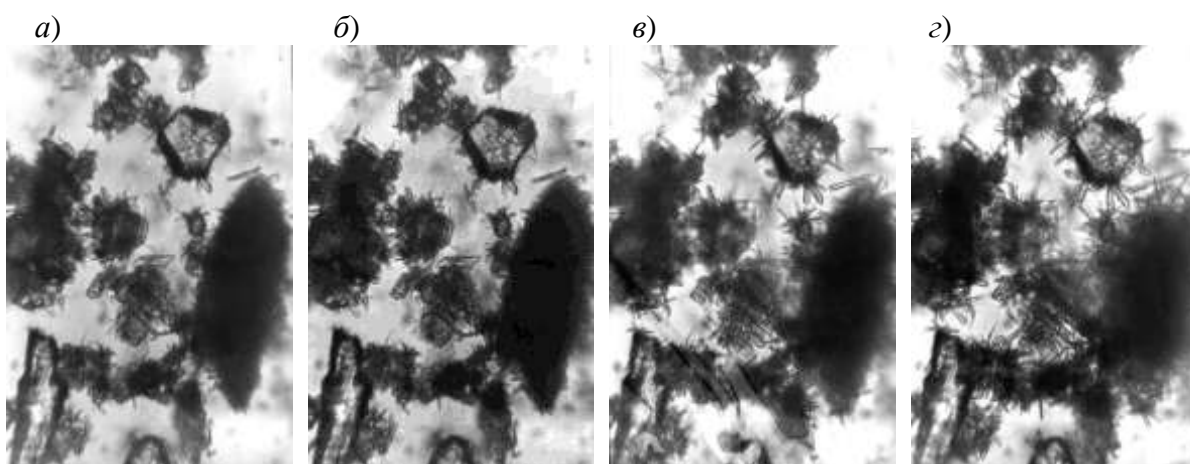


Рис. 2. Мікрофотознімки суміші півгідрату сульфату кальцію і меленого доменного гранульованого шлаку через 5 (а), 10 (б), 15 (в) і 20 хвилин (г) після замішування водою. Знімки отримані А.А. Плугінім та О.Г. Ольгінським у 1993 р. за допомогою мікроскопа МБИ-6 ЛОМО

1923 р. – Олександр Олександрович Байков (СРСР) пропонує теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така: твердофазова реакція гідратації мінералів цементу (топохімічний механізм гідратації) – утворення цементного гелю – перекристалізація гелю з утворенням цементного каменю, що містить гідросилікатний гель і кристалогідрати.

1954 р. – П.О. Ребіндер (рис. 3) розробляє теорію, яку іноді називають теорією гідратаційного структуроутворення



і згідно з якою послідовність процесу твердіння така: розчинення мінералів цементу – утворення пересиченого відносно продуктів гідратації водного розчину – утворення із пересиченого розчину гелевих і кристалічних продуктів гідратації (крізьрозчинний механізм гідратації, рис. 4) – структуроутворення: утворення коагуляційної структури з коагуляційними контактами – її перехід до конденсаційно-кристалізаційної структури з фазовими контактами (рис. 5).

Рис. 3. П.О. Ребіндер (ліворуч) з О.П. Мchedловим-Петросяном – засновником кафедри будівельних матеріалів ХІІТ. 1950-ті рр.

Проте у найбільш досконалій і всесвітньо визнаній теорії Ребіндера залишились недоліки і протиріччя: вона залишилась описовою; імовірність утворення суцільного кристалізаційного каркасу в бетонній конструкції вкрай малоімовірна через неможливість зростання кристалів різних мінералів (із чотирьох клінкерних мінералів утворюються десятки продуктів гідратації різної стехіометрії та кристалічної структури) і зростання однакових, проте несприятливо орієнтованих один до одного кристалів.

1989 р. – А.М. Плугін розробляє електрогетерогенну теорію твердіння портландцементу [19], яка є розвитком теорії Ребіндера з урахуванням електрогетерогенних взаємодій між дисперсними частками та повністю ґрунтується на кількісних закономірностях колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем. У розвинутому в рамках наукової школи А.М. Плуґіна вигляді вона викладена у [20–22] (рис. 6).

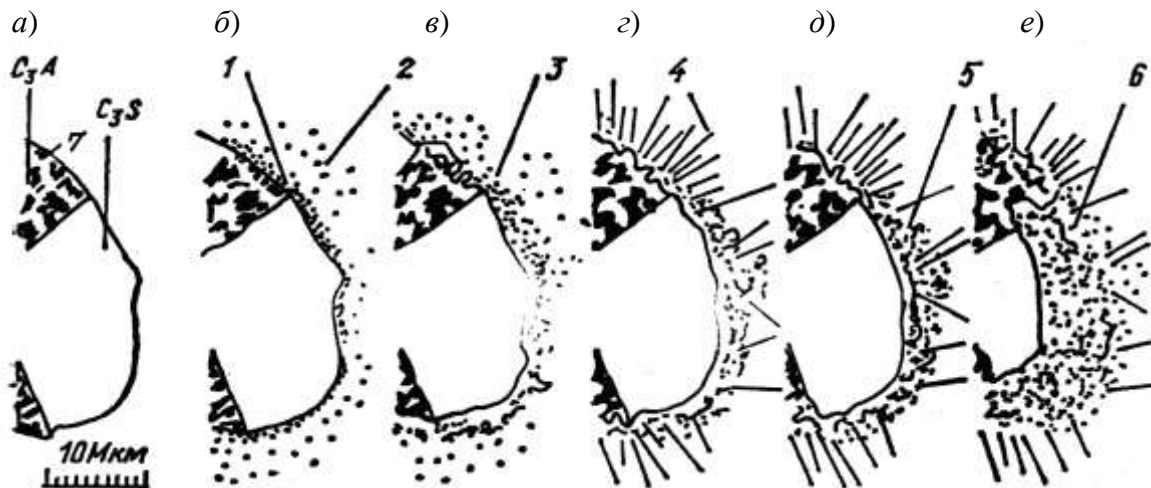


Рис. 4. Схема гідратації за [5; 6] – розчинення частки цементу і утворення гелевих (у вигляді крапок) і кристалічних (у т.ч. у вигляді голок) продуктів гідратації. Послідовно від *a* до *e* розмір частки цементу зменшується, а кількість часток продуктів гідратації – збільшується

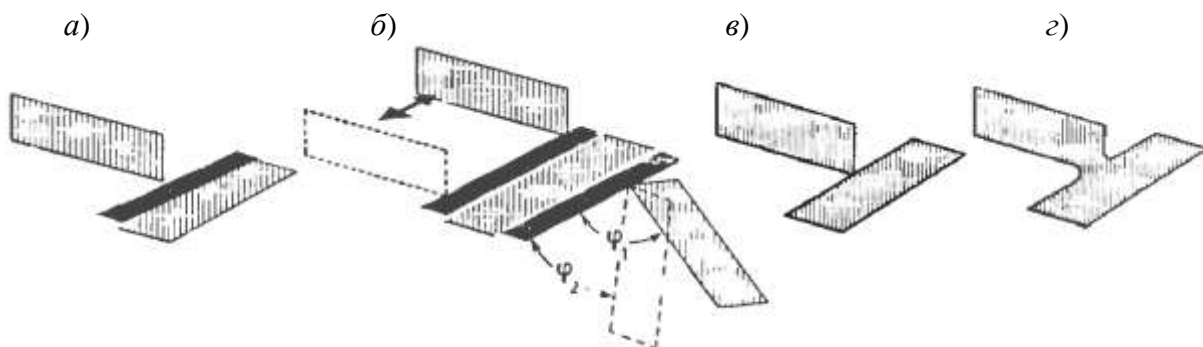


Рис. 5. Схема контактів [4]: *a, б* – коагуляційних через тонкі водні прошарки, які дозволяють часткам переміщуватись або обертатись одна відносно одної (*б*); *в* – точкових з локальними хімічними зв'язками між частками; *г* – фазових зі зростанням кристалічної решітки часток



Рис. 6. Тритомна монографія, в якій викладені основні положення колоїдно-хімічного бетонознавства [20–22]

Основні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки в'язучих, бетонів і конструкцій із них [20–22]

1. Тверднучі й затверділі неорганічні в'язучі і бетони є полідисперсними матеріалами, а продукти гідратації в'язучих – водно-дисперсними системами з дисперсною фазою – частками продуктів гідратації, дисперсійним середовищем – розчином електроліту.

2. Частки неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах мають поверхневий заряд і електроповерхневий потенціал.

3. Між різнойменно зарядженими частками дисперсної фази у тверднучих неорганічних в'язучих і композиційних матеріалах на їх основі виникають електрогетерогенні контакти, які визначають їх міцність (колоїдно-хімічна теорія міцності бетону).

4. Поверхневий заряд та електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес фільтрації в капілярно-пористих матеріалах (безнапірна водопроникність бетону).

5. Поверхневий заряд й електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес дифузії в капілярно-пористих матеріалах, зокрема, на проникнення агресивних речовин у бетон і винесення із нього продуктів корозії. Дифузія визначає швидкість корозії і термін служби бетонних і залізобетонних конструкцій.

6. Характер полідисперсної структури бетону визначає фізичні та фізико-механічні властивості бетону, особливо його безнапірну водопроникність і понаднормативну довготривалу повзучість.

7. Понаднормативна довготривала повзучість цементного бетону визначає понаднормативні деформації довгомірних і тонкостінних залізобетонних конструкцій із них.

З цих положень 1–3 можна вважати основоположними, первинними, інші –

похідними від них. Розглянемо основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки в'язучих, бетонів і конструкцій із них.

Тверднучі й затверділі неорганічні в'язучі і бетони – полідисперсні матеріали, продукти гідратації в'язучих – водно-дисперсні системи

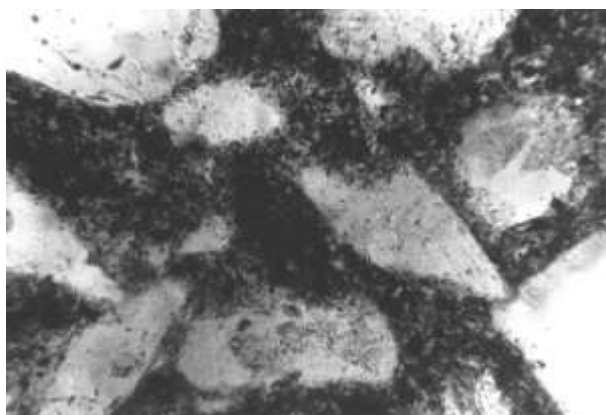
На рис. 7 наведені мікроскопічні та електронно-мікроскопічні знімки, які підтверджують, що бетон і цементний камінь є полідисперсними матеріалами (розмір часток гідросилікатів кальцію – десятки нанометрів, зерен крупного заповнювача – десятки міліметрів).

Це надає можливість розглядати структуру бетону як багаторівневу (рис. 8). Таке уявлення структури бетону дозволило для ефективного керування його структурою та властивостями при призначенні складу застосовувати структурні характеристики кожного рівня – коефіцієнти розсунення зерен крупного та дрібного заповнювача α і μ , водоцементне відношення В/Ц та співвідношення між кількістю гелевих та кристалічних продуктів гідратації Г/К, забезпечуючи їх певні оптимальні значення.

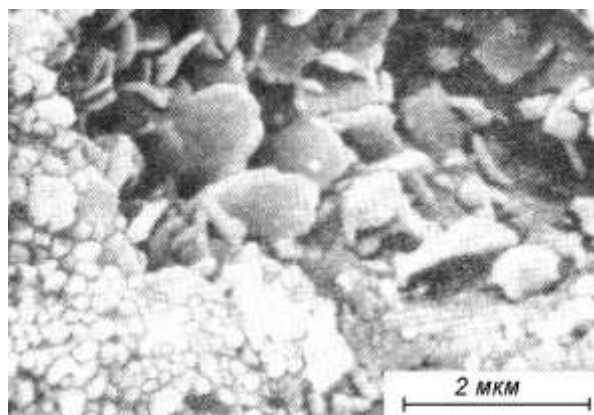
Із рис. 7, б–д видно, що продукти гідратації цементу є водно-дисперсною системою з дисперсною фазою – частками продуктів гідратації, дисперсійним середовищем – розчином електроліту (насиченим розчином $Ca(OH)_2$, причому гідросилікатний гель (рис. 7, д) відповідає колоїдному ступеню дисперсності, що в значній мірі визначає властивості цементного каменю і бетону.

Поверхневий заряд та електроповерхневий потенціал часток неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах обумовлені наявністю подвійного електричного шару ПЕШ на границі розподілу фаз (рис. 9).

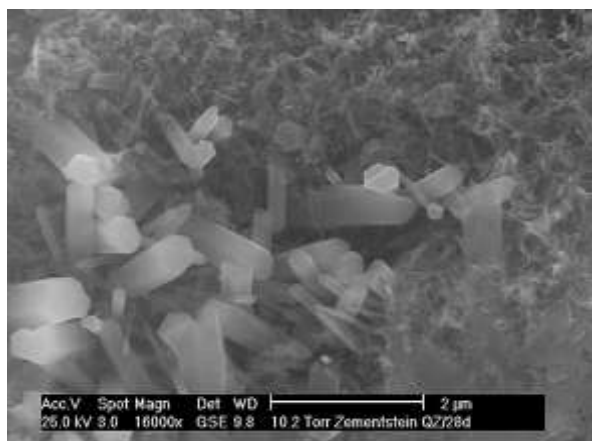
а)



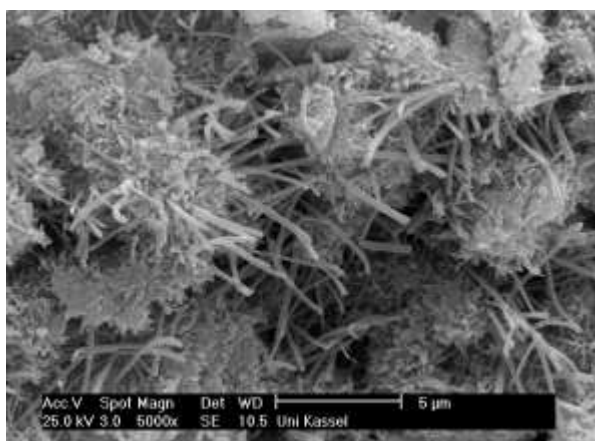
б)



в)



г)



д)

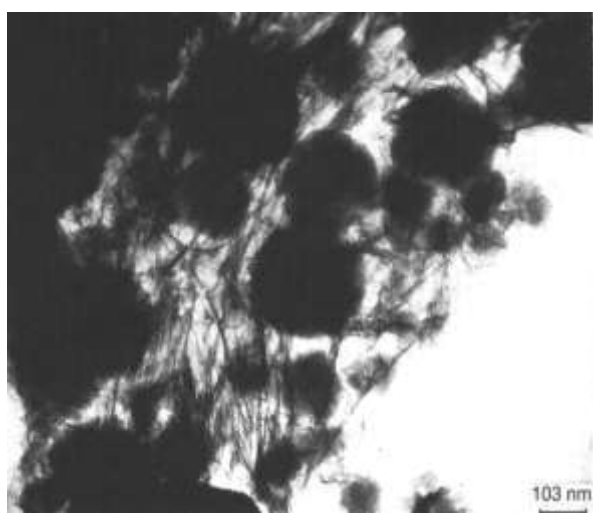


Рис. 7. Мікрофотознімки бетону, цементного каменю і продуктів гідратації цементу:
 а – прозорий шліф, світловий мікроскоп (А.А. Пługін, О.О. Ольгінський);
 б – вугільна репліка, просвічувальний електронний мікроскоп (В. Лах, Я. Буреш);
 в–д – відкол цементного каменю, скануючий електронний мікроскоп (в – І. Харченко, А. Панченко, J. Stark, Н.-В. Fischer; г – R. Krelaus, M. Schmidt, M. Gehrke, B. Middendorf; д – R. Trettin, S. Wild)

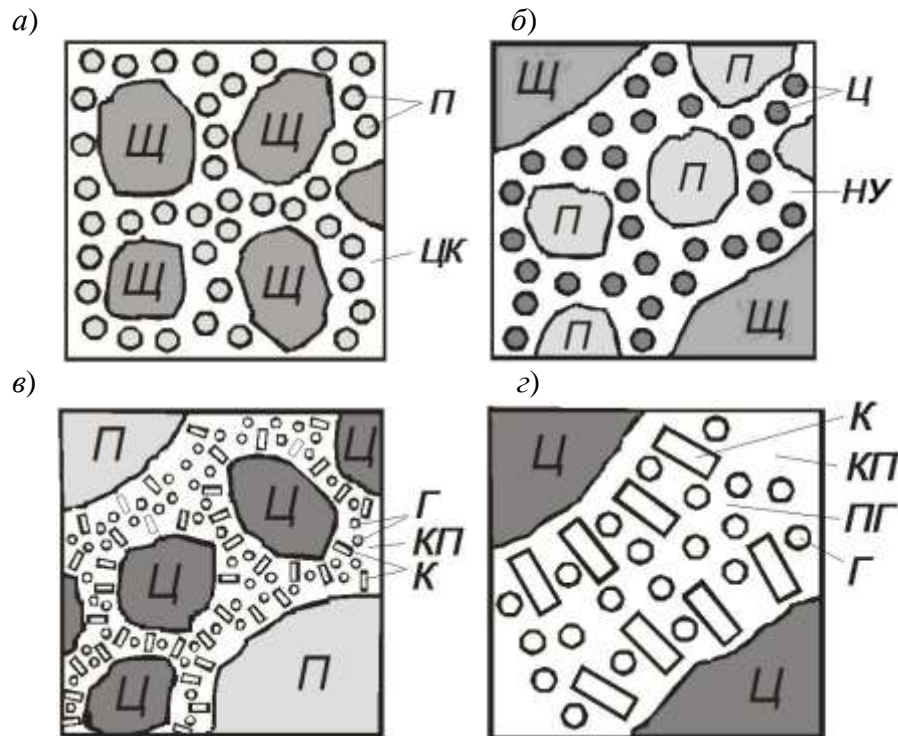


Рис. 8. Схема багаторівневої структури бетону: *а* – макроструктура; *б* – мезоструктура; *в* – мікроструктура; *г* – субмікроструктура; *Щ* – зерна крупного заповнювача (щебеню); *П* – зерна дрібного заповнювача (піску); *ЦК* – цементний камінь (тісто); *Ц* – частки цементу; *НУ* – гідратні новоутворення (продукти гідратації); *К* – кристалогідрати; *Г* – частки гідросилікатного гелю; *КП* – капілярні пори; *ПГ* – пори гелю

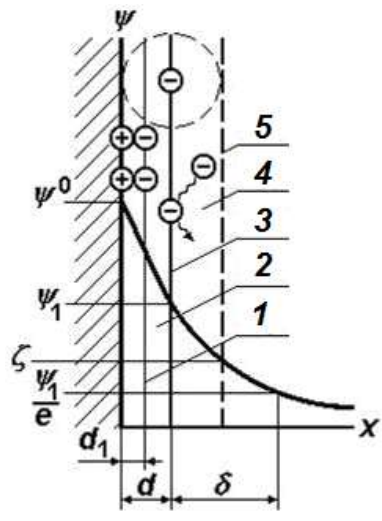


Рис. 9. Схема будови подвійного електричного шару на границі розподілу «неорганічна тверда дисперсна фаза – рідке дисперсійне середовище (водний розчин)» і розподілу потенціалу в ньому:

ψ^0 – електроповерхневий потенціал; ψ_1 – потенціал на границі щільної і дифузної частин ПЕШ; ζ – електрокінетичний потенціал; δ – товщина дифузної частини ПЕШ; 1 – внутрішня плоскість Гельмгольца; 2 – щільна частина ПЕШ; 3 – зовнішня плоскість Гельмгольца; 4 – дифузна частина ПЕШ; 5 – плоскість ковзання

Основними рівняннями, що визначають електроповерхневий потенціал часток неорганічної дисперсної фази у

водно-дисперсних системах, є запропоновані у [17] і удосконалені у [18]:

$$\psi^0 = E^0 + \Delta\psi^0; \quad (1)$$

$$\psi_{XYZ}^0 = -\frac{x\psi_X^0 + y\psi_Y^0 + z\psi_Z^0}{x+y+z}; \quad (2)$$

$$\psi_p^0 = \psi^0 - 0,059 pH, \quad (3)$$

де ψ^0 – абсолютний електроповерхневий потенціал простої речовини, В; E^0 – стандартний електродний потенціал простої речовини, В; $\Delta\psi^0$ – поправка, що враховує перехід від стандартного електродного до електроповерхневого потенціалу, В; ψ_{XYZ}^0 – абсолютний електроповерхневий потенціал складної речовини $X_xY_yZ_z$, де x, y, z – стехіометричні коефіцієнти простих речовин X, Y, Z ; ψ_X^0 ,

ψ_Y^0, ψ_Z^0 – абсолютні електроповерхневі потенціали простих речовин X, Y, Z ; ψ_p^0 – рівноважний електроповерхневий потенціал простої або складної речовини (близький до ψ_1 на рис. 9), В.

Абсолютні та рівноважні електроповерхневі потенціали структурних складових портландцементу, цементного каменю і бетону наведені в таблиці.

Таблиця

Електроповерхневі потенціали структурних складових бетону

№	Найменування	Потенціал, В	
		ψ^0	$\psi_p^0, pH=12$
1	Кварц SiO_2	-0,55	-1,26
2	Граніт $0,3SiO_2 \times 0,7K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$	-0,07	-0,78
3	Кальцит $CaCO_3$	+1,26	+0,55
4	Аліт C_3S	+0,74	-0,03
5	Беліт C_2S	+0,55	-0,16
6	Трикальцієвий алюмінат C_3A	+0,90	+0,20
7	Високоосновні гідросилікати кальцію C_2SH	+0,59	-0,11
8	Низькоосновні гідросилікати кальцію CSH	+0,29	-0,37
9	Портландит $Ca(OH)_2$	+1,24	+0,53
10	Гідроалюмінат кальцію C_3AH_6	+0,92	+0,21
11	Еtringіт $C_3A \times 3CaSO_4 \times H_{32}$	+0,90	+0,19
12	Гідросульфалюмінат кальцію $C_3A \times CaSO_4 \times H_{19}$	+1,24	+0,53

Електрогетерогенні й електрогомогенні контакти між частками дисперсної фази у тверднучих неорганічних в'язучих і композиційних матеріалах на їх основі. Колоїдно-хімічна теорія міцності бетону

Із рис. 4 і 7 видно, що в структурі продуктів гідратації, спочатку

коагуляційній, потім конденсаційно-кристалізаційній, наявні як частки кристалогідратів – портландиту, гідросульфалюмінатів та гідроалюмінатів кальцію, що мають позитивний поверхневий заряд, так і частки гідросилікатного гелю, що мають негативний поверхневий заряд (табл. 1, рис. 10). Між ними виникають

електрогетерогенні (між різнойменно зарядженими частками) й електрогомогенні (між однойменно зарядженими частками) контакти (рис. 10, 11). Аналогічні контакти виникають між частками продуктів гідратації і частками цементу, зернами заповнювачів. З цих контактів саме електрогетерогенні мають високі міцність та водостійкість, оскільки в них і

молекулярна, і електростатична складова взаємодії є притягувальною, відсутні сили, що перешкоджають притягання, крім останнього мономолекулярного шару води, і саме вони на відміну від досить локальних кристалізаційних контактів здатні забезпечити просторову міцну структуру продуктів гідратації по всій конструкції із бетону і, відповідно, міцність бетону.

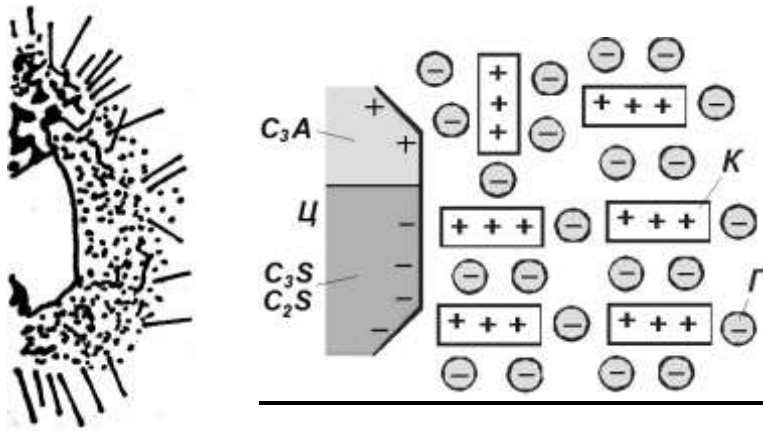


Рис. 10. Схема електрогетерогенних контактів у цементному камені і продуктах гідратації (позначення, як на рис. 8)

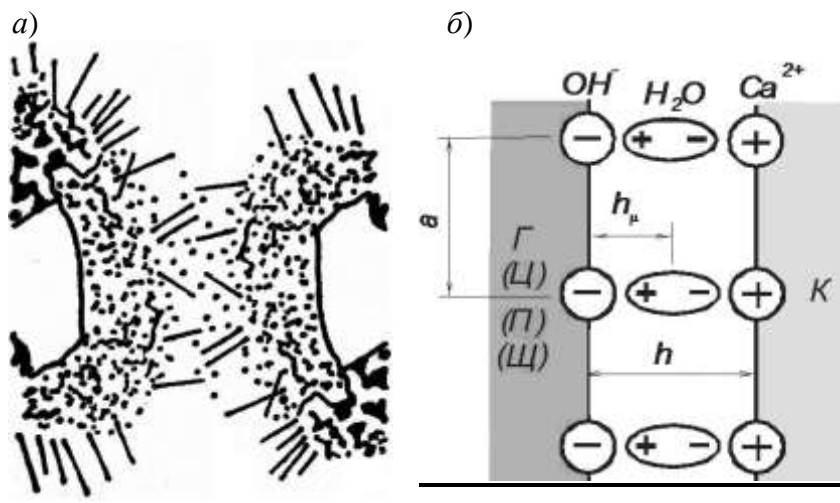


Рис. 11. Схема електрогетерогенних контактів між частками продуктів гідратації, цементу, заповнювачів: а – загальна схема контакту між частками цементу через продукти гідратації; б – електрогетерогенний контакт через мономолекулярний водний прошарок; в – безпосередній (без водного прошарку) електрогетерогенний контакт (позначення, як на рис. 8)

На такій моделі структури ґрунтується колоїдно-хімічна теорія міцності цементного каменю і бетону. Одиничним

елементом міцності є контакт між протилежними потенціалвизначальними іонами кристалогідрату і частинками гелю

(або частинками цементу, зернами заповнювача), що здійснюється через дипольну молекулу води (рис. 11, б). Сила взаємодії в такому контакті визначається відомим законом Кулона та рівнянням взаємодії між зарядом і дипольним моментом, що з нього випливає.

Згідно з теорією міцності дисперсних систем Ребіндера-Щукіна [24] міцність цементного каменю при розтягу $R_t^{чк}$, Па, може бути визначена як добуток міцності електрогетерогенного контакту між поверхнями дисперсних часток $R_t^{ек}$, Па, і поверхневої частки електрогетерогенних контактів у перерізі цементного каменю $\gamma_s^{ек}$:

$$R_t^{чк} = R_t^{ек} \cdot \gamma_s^{ек}. \quad (4)$$

Поверхнева частка електрогетерогенних контактів у перерізі цементного каменю $\gamma_s^{ек}$ залежить від його пористості, отже, водоцементного відношення, ступеня гідратації і т.д. і в найкращому випадку може наближатись до 1.

Міцність електрогетерогенного контакту між поверхнями дисперсних часток $R_t^{ек}$ є добутком сили взаємодії між потенціалвизначальними іонами в одиничному електрогетерогенному контакті $P_{ек}$, Н і поверхневої концентрації потенціалвизначальних іонів на дисперсній частці (кристалогідраті) n^0 , $1/\text{м}^2$:

$$R_t^{ек} = P_{ек} \cdot n^0 = [\text{Н} \cdot 1/\text{м}^2 = \text{Па}]. \quad (5)$$

Сила взаємодії між потенціалвизначальними іонами в одиничному електрогетерогенному контакті $P_{ек}$ згідно з

рис. 11, б складається із іон-іонної взаємодії (притягання) між потенціалвизначальними іонами та іон-дипольної взаємодії між потенціалвизначальним іоном дисперсної частки (кристалогідрату) і полярною молекулою води, через мономолекулярний шар якої взаємодіють частки.

Поверхнева концентрація потенціалвизначальних іонів на дисперсній частці n^0 визначається виходячи із будови ПЕШ (рис. 9):

$$n^0 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 (\psi_p^0)^+}{4\pi d_1 z^+ e}, \quad (6)$$

де ε_1 – діелектрична проникність щільної частини ПЕШ; ε_0 – електрична стала; ψ_p^0 – рівноважний електроповерхневий потенціал; d_1 – товщина щільної частини ПЕШ (рис. 9); z^+ – валентність (заряд) потенціалвизначального іона кристалогідрату; e – елементарний заряд.

Висновки. Таким чином, у статті викладені основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них, які дозволяють ефективно керувати властивостями бетону і композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих речовин. Наведені рівняння електроповерхневого потенціалу дисперсної фази, міцності електрогетерогенного контакту і цементного каменю.

Список літератури

1. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона [Текст] / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ли, Ф.М. Химия цемента и бетона [Текст]: пер.с англ. Б.С. Левмана; под ред. С.М. Рояка. – М.: Госстройиздат, 1961. – 646 с.
3. Химия цементов [Текст] / под ред. Х.ф.У.Тейлора; сокр. пер. с англ.; под ред. Ю.М. Бутта и С.А. Кржеминского. – М.: Стройиздат, 1969. – 502 с.

4. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве [Текст] / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1969. – 200 с.
5. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов [Текст] / О.П. Мчедлов-Петросян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
6. Тейлор, Х. Химия цемента [Текст]: пер.с англ. А.И. Бойковой и Т.В. Кузнецвой. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
7. Куколев, Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов [Текст] / Г.В. Куколев. – М.: Высш.шк., 1966. – 464 с.
8. Физическая химия силикатов [Текст] / А.А. Пашенко, Н.В. Алексенко, Е.А. Мясникова и др.; под ред. А.А. Пашенко. – К.: Вища школа, 1977. – 384 с.
9. Рамачандран, В. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн: пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой; под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
10. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
11. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – М.: Госстройиздат, 1962. – 268 с.
12. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд., перераб.и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
13. Баженов, Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона [Текст] / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
14. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Я. Керш, Т.В. Ляшенко и др.; под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
15. ЭВМ и оптимизация свойств строительных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов; под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1989. – 240 с.
16. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков; под. ред. В.А.Вознесенского. – К.: Вища школа, 1989. – 328 с.
17. Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи [Текст] / В.С. Лесовик. – Белгород: БГТУ, 2012. – 213 с.
18. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: дисс. ... д-ра хим. наук / А.Н. Плугин. – К.: ИКХХВ, 1989. – 282 с.
19. Плугин, А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.А. Плугин. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – 442 с.
20. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В. Трикоз, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин; под ред. А.Н. Плуцина. – К.: Наук. думка, 2011. – 331 с.
21. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.2. Теория твердения портландцемента / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев; под ред. А.Н. Плуцина. – К.: Наук. думка, 2012. – 224 с.

22. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев, О.С. Борзяк; под ред. А.Н. Плуцина. – К.: Наук. думка, 2012. – 288 с.

23. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ru.wikipedia.org>.

24. Ребиндер, П.А. О механической прочности пористых дисперсных тел [Текст] / П.А. Ребиндер, Е.Д. Щукин, Л.Я. Марголис // ДАН СССР. – 1964. – Т. 154. – № 3. – С. 695-698.

Ключові слова: цемент, бетон, твердіння, міцність, колоїдна хімія

Анотації

Викладені основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них. Наведені рівняння електроповерхневого потенціалу дисперсної фази, міцності електрогетерогенного контакту і цементного каменю.

Изложены основополагающие первичные положения коллоидной химии и физико-химической механики цементов, бетонов и конструкций из них. Приведены уравнения электроповерхностного потенциала дисперсной фазы, прочности электрогетерогенного контакта и цементного камня.

Sets out the fundamental position of the primary colloid chemistry and physical and chemical mechanics of cement and construction of them. The equations of surface electrical potential of the dispersed phase and the strength of electroheterogeneous contact and cement stone.