

*Наведено результати дослідження властивостей пористих реакційних порошкових бетонів, які являють собою композицію з портландцементу, дрібно-го заповнювача, порошку речовини, що містить сполуки d-елементу – заліза або марганцю, а також поверхнево-активних речовин, що утворюють міцели, призначених для виготовлення бетонних та залізобетонних виробів. Визначено, що одночасне застосування речовин, що містять сполуки d-елементу та поверхнево-активні речовини, які утворюють міцели, при виготовленні означеного бетону призводить до суттєвого підвищення швидкості формування його міцності та її величини*

*Ключові слова: бетон, поверхнево-активні речовини, мицелярний катализ, гідратація, перехідні елементи*

*Приведены результаты исследования свойств пористых рекреационных порошковых бетонов, представляющих собой композицию из портланд-цемента, мелкого заполнителя, порошка вещества, содержащего соединения d-элемента – железа или марганца, а также поверхностно-активных веществ, образующих мицеллы, предназначенных для изготовления бетонных и железобетонных изделий. Определено, что одновременное применение веществ, содержащих соединения d-элемента и поверхностно-активных веществ, которые образуют мицеллы, при изготовлении указанного бетона приводит к существенному повышению скорости формирования его прочности и ее величины*

*Ключевые слова: бетон, поверхностно-активные вещества, мицелярный катализ, гидратация, переходные элементы*

УДК 666.948 : 666.972.112

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.63957

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОЛУК ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МІЦЕЛЯРНИЙ КАТАЛІЗ ФОРМУВАННЯ МІЦНОСТІ РЕАКЦІЙНОГО ПОРОШКОВОГО БЕТОНУ

О. О. Шишкін

Доктор технічних наук, професор  
Кафедра технології будівельних виробів,  
матеріалів і конструкцій  
Криворізький національний університет  
вул. XXII-го партз'їзду, 11,  
м. Кривий Ріг, Україна, 50027  
E-mail: 5691180@gmail.com

## 1. Вступ

Використання різних цементів, заповнювачів та добавок при виготовленні бетону, дозволяє змінювати його механічну, хімічну, термічну стійкість, морозостійкість та впливати на терміни його тужавлення і тверднення. У той же час варіювання тільки речовинного складу бетонних сумішей не дозволяє усунути деякі негативні властивості бетону, такі як достатньо невелика швидкість формування його міцності, що суттєво впливає на терміни будівництва монолітних будівель та споруд та виготовлення збірних бетонних та залізобетонних конструкцій. Означений недолік бетону може бути усунути використанням наномодифікаторів або нанокаталізу, які спроможні підвищити швидкість формування міцності.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Відомо [1], що двокальцієвий ферит, хімічна речовина аналогічна трикальцієвому алюмінату, здатний створювати аналогічні комплекси, які відрізняються від створених на основі трикальцієвого алюміна-

ту більшою стійкістю при дії агресивних середовищ. Очевидно, що відмінність у властивостях комплексів на основі алюмінію і заліза полягає у виді комплексоутворювача. Заміна алюмінію на залізо призводить до підвищення стійкості одержуваних комплексів.

У [1] визначено, що заряд центрального іона в комплексних з'єднаннях є основним фактором, що впливає на координаційне число. Отже, кремній, що володіє зарядом рівним 2, буде оточений двома лігандами, а алюміній і залізо в тривалентній формі – трьома, тобто ці елементи можуть утворювати однозначні, по насиченню лігандами, комплексні сполуки. Однак відомо [1], що в аквакомплексах, заснованих на іонах алюмінію, вода може перебувати тільки в координованому стані. У той же час аквакомплекси на основі іонів заліза містять воду, як в координованому стані, так і утримують і кристалізаційну воду. З точки зору фундаментальної хімії [1], алюміній може так само, як і залізо мати дві форми, які характеризуються валентностями: 2 і 3. Однак залізо має і шестивалентного форму. Крім того, розподіл електронів на підрівні у цих речовин різне. Аналіз даних [1] показує, що найменші радіуси атомів і атомні об'єми мають перехідні елементи періодичної таблиці Д. І. Менделєєва. Слід зазначити, що з перехідних

хімічних елементів найменшими радіусами і атомним об'ємом володіють: залізо, кобальт, нікель, мідь, хром і марганець. Отже, ці елементи найбільш схильні до комплексоутворення. З точки зору створення міцних і стійких до зовнішніх впливів комплексних з'єднань, викликають інтерес так звані хелатні комплексні сполуки [1]. Хелатні сполуки відрізняються особливою міцністю, так як центральний атом у них як би «блокований» циклічними лігандами. Комплекси хелатних сполук настільки міцно пов'язують катіони металів, що при їх додаванні розчиняються такі погано розчинні речовини, як сульфати, оксалати і карбонати кальцію. Характерним прикладом відомих комплексних хелатних сполук є оксалатний комплекс заліза (III)  $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ . Основою даного комплексу може служити карбонат заліза, так званий мінерал сидерит  $\text{Fe}[\text{CO}_3]$ .

Ефект збільшення щільності цементного каменю введенням до складу цементу, що твердіє, іонів перехідних елементів, зокрема, заліза або залізовмісних речовин, встановлений в роботах [2–5]. Крім того, в роботах [4, 5] встановлено збільшення міцності цементного каменю, а в роботі [4] – також зниження усадки цементного каменю, підвищення його радіаційної стійкості та стійкості до дії підвищених температур, при введенні до складу системи, що твердіє, залізовмісних речовин. В роботі [4] встановлено утворення в продуктах гідратації даної системи високоосновних з'єднань, подібних до еtringіту, які містять залізо.

На підставі викладеного можна зробити висновок про те, що забезпечення умов утворення в дисперсній системі, отриманій на основі гідралічної в'язучої речовини, що твердіє, стійких аквакомплексів на основі перехідних хімічних елементів (d-елементів) періодичної системи Д. І. Менделєєва, сприятиме зниженню усадки, підвищенню щільності цементного каменю і, як наслідок, підвищенню його міцності і стійкості до дії агресивних середовищ.

У той же час відомо [6, 7], що введення до складу мінеральної в'язучої речовини мінеральних комплексів на основі заліза призводить до утворення новотворів, які містять значну кількість хімічно зв'язаної води, що сприяє зменшенню кількості вільної води у складі затверділого бетону, а також значно зменшує деформації його усадки та підвищує його міцність.

Ще на початку двадцятого століття був відзначений ефект взаємодії між силікатами натрію і солями заліза [8], а дещо пізніше було отримана так звана шлакошламова в'язуча речовина [9], яка представляє собою суміш доменного гранульованого шлаку з відходами гірничо-збагачувальних комбінатів (залізо-силікатним мінеральним комплексом), що твердіє при змішуванні з водою. Активність даної в'язучої речовини значно перевищує активність доменного гранульованого шлаку змішаного з водою.

Ці два положення послужили основою для отримання нового виду в'язучої речовини, так званої шлакошламової лужної в'язучої речовини, яка представляє собою суміш доменного гранульованого шлаку із залізо-силікатним мінеральним комплексом, яка твердіє при змішуванні із водним розчином лужного компоненту [10]. Даний вид в'язучої речовини має міцність при стисканні, яка досягає 110 МПа. Крім цього отримано так званий «шламопортландцемент», що представляє собою суміш портландцементу із залі-

зо-силікатним мінеральним комплексом (в тому числі відходами гірничо-збагачувальних комбінатів), яка твердіє при змішуванні із водою [6].

На цей час широким науковим дослідженням піддаються «реакційні порошкові бетони» [11–13], які являють собою суміш в'язучої речовини, мікронаповнювача та дрібного заповнювача. У якості в'язучої речовини в таких бетонах можуть застосовуватися портландцемент [14], шлаколужна, шлакошламова або гіпсоцементна в'язуча речовина. А в якості мікронаповнювача в таких бетонах можуть застосовуватися доменні шлаки [14], відходи збагачення залізних руд [15], мікрокремнезем [16], зола-віднесення [17], оксиди деяких металів [18, 19].

Як показали дослідження [10], застосування залізо-силікатних мінеральних комплексів (в тому числі відходів гірничо-збагачувальних комбінатів) призводить до збільшення кількості хімічно зв'язаної води у затверділому бетоні. Тобто, застосування таких залізо-силікатних мінеральних комплексів для отримання реакційних порошкових бетонів достатньо перспективно з огляду можливості отримання бетонів, що володіють малою усадкою та значно підвищеною міцністю. Однак, як показано у наведених вище літературних джерелах [4–6] означені мінеральні комплекси, що містять перехідні елементи, не впливають на швидкість формування міцності бетонів. У той же час існує можливість прискорення формування міцності бетону за рахунок застосування міцелярного каталізу, як однієї із складових нанотехнологій [20]. Таким чином, вирішення проблеми підвищення міцності бетонів з одночасним підвищенням швидкості формування їх міцності є на цей час актуальною задачею.

### 3. Мета і завдання досліджень

За мету дослідження було поставлено визначення впливу мінеральних комплексів, що містять перехідні хімічні елементи, та поверхнево-активних речовин, що утворюють міцели, на величину міцності при стиску реакційних порошкових бетонів та швидкість її формування.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- визначити вплив мінеральних комплексів, що містять перехідні хімічні елементи, на величину хімічно-зв'язаної води в реакційному порошковому бетоні;
- визначити вплив кількості мінеральних комплексів, що містять перехідні хімічні елементи, на міцність порошкових реакційних бетонів, у тому числі ніздрюватих, при одночасному застосуванні міцелярного каталізу, за рахунок використання поверхнево-активних речовин, що утворюють міцели.

### 4. Матеріали та методи дослідження впливу поверхнево-активних речовин, що утворюють міцели, на швидкість формування міцності реакційного порошкового бетону

#### 4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Для виготовлення бетону використовували портландцемент ПЦ ІІ/Б–Ш–400, виробництва ПАТ «Хай-

дельберг цемент. Кривий Ріг» (Україна), у якості дрібного заповнювача – відходи збагачення залізних руд Центрального гірничозбагачувального комбінату (Кривий Ріг, Україна), які мають розмір часток від 0,01 до 0,63 мм. У якості поверхнево-активної речовини, що утворює міцели (МПАР), застосовували олеат натрію (Simagchem Corp., Китай), у якості утворювача пін – піноутворювач ПО2.

Сухі компоненти бетонної суміші дозувалися в кількості, розрахованої згідно із планом експерименту, і перемішувалися в лабораторному змішувачі впродовж 1 хв. Потім до означеної суміші додавали воду і перемішували в лабораторному змішувачі ще на протязі 2 хвилин, що забезпечувало отримання однорідної суміші.

Отриману бетонну суміш укладали в металеву форму-куб, що має розмір сторін 15 см. Відформовані в такий спосіб зразки бетону тверділи впродовж 28 діб при вологості навколишнього середовища  $70 \pm 10\%$  і температурі навколишнього повітря  $293 \pm 2$  К.

#### 4. 2. Методика визначення показників властивостей зразків

Опосередковану оцінку впливу мінеральних комплексів, що містять перехідні хімічні елементи, на кінетику хімічного зв'язування води здійснювали за результатами д-сушіння цементного каменя при водоцементному співвідношенні (В/Ц) 0,26, фіксуючи зміну маси дослідних зразків.

За основний показник, що характеризував кінетику твердіння цементу після його тужавіння, була прийнята міцність при стиску реакційного порошкового бетону. Склад бетону був прийнятий постійним у всіх дослідженнях зі співвідношенням цемент/дрібний заповнювач = 1/0,5. У дослідях змінювали кількість, як поверхнево-активних речовин (ПАР), так і мінеральних комплексів, що містять перехідні хімічні елементи. Визначення величини межі міцності при стиску зразків проводилося у відповідності до стандартних методик, прийнятих в Україні. Контроль міцності зразків робили на універсальній машині УММ-100 (рис. 1).

Так як структурна міцність дисперсної системи «гідралічна в'язуча речовина – мінеральний комплекс, що містить залізо, – міцелоутворююча поверхнево-активна речовина (МПАР)» характеризує його структуроутворення, то в певній групі експериментів досліджено зміну структурної міцності дисперсної системи «гідралічна в'язуча речовина – мінеральний комплекс, що містить залізо, – МПАР» в залежності від складу МПАР і його вмісту в системі, водоцементного відношення в ній і часу її структуроутворення. В якості мінерального комплексу, який містить залізо (ЗСМК), були використані відходи Центрального гірничозбагачувального комбінату (Кривий Ріг, Україна). У якості МПАР – олеат натрію, а в якості гідралічної в'язучої речовини – портландцемент.

Структурна міцність цементного тіста визначалася через визначення площі розтікання конуса цементного тіста, що найбільш повно відповідає умовам його використання. Дисперсна система готувалася шляхом змішування портландцементу з мінеральним комплексом, який містить залізо, з подальшим додаванням водного розчину олеату натрію в заданих співвідно-

шеннях. Приготована дисперсна система поміщалася в стандартний конус, призначений в Україні для визначення легкоукладності бетонної суміші. Ущільнення здійснювалося шляхом штикування стандартним методом, прийнятим в Україні при випробуванні бетонної суміші. Після цього форма конуса знімалася, і замірявся нижній діаметр конуса матеріалу після його розтікання. За формулою

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

визначалася площа основи конуса матеріалу.



Рис. 1. Універсальна випробувальна машина УММ-00

Потім матеріал, яким була заповнена форма (конус), зважувався, і визначалася його маса – Р. Величина структурної міцності визначалася за формулою

$$\tau = \frac{P}{S},$$

де Р – маса матеріалу в об'ємі стандартного конуса, S – площа основи конуса матеріалу після розтікання,

#### 5. Результати дослідження показників властивостей бетонних зразків

У даній групі експериментів досліджувалась кількість зв'язаної води в дисперсній системі «портландцемент – ЗСМК – МПАР» у залежності від вмісту ЗСМК та МПАР. У дослідженнях для одержання бетонів використані сполуки заліза – оксид заліза (ЗСМК), портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-400, виробництва ПАТ «Хайдельберг цемент. Кривий Ріг» (Україна) та МПАР – олеат натрію.

Як показали результати досліджень, ЗСМК, використовуваний спільно з МПАР, сприяє збільшенню кількості зв'язаної води в продуктах гідратації дис-

першої системи «портландцемент – ЗСМК – МПАР» (рис. 2), що свідчить про утворення мінералів з високим вмістом зв'язаної води. При цьому комплекс «ЗСМК – МПАР» забезпечує зв'язування більшої кількості води в порівнянні з кожним з його компонентів.

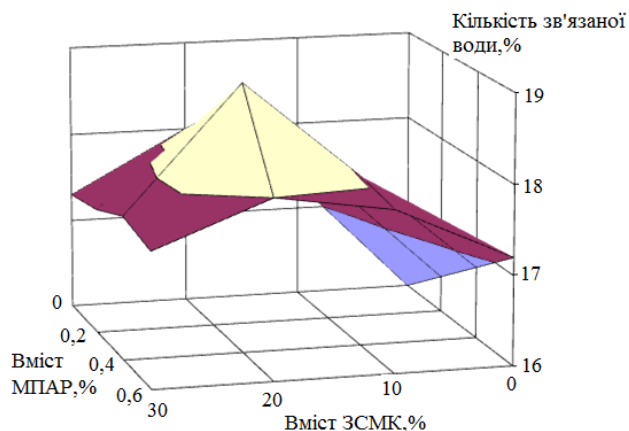


Рис. 2. Вплив комплексу «ЗСМК – МПАР» на кількість зв'язаної води продуктами гідратації дисперсної системи «портландцемент – ЗСМК – МПАР»: твердіння 28 діб в нормальних умовах

Аналіз результатів досліджень показав, що вміст в досліджуваній дисперсній системі ЗСМК в кількості 20...30 % від маси її дисперсної фази забезпечує максимальну величину структурної міцності одержуваного на її основі цементного тесту. Збільшення водоцементного відношення при будь-якому вмісті ЗСМК в межах експерименту знижує структурну міцність цементного тіста.

Олеат натрію, як поверхнево-активна речовина декілька інакше впливає на структурну міцність дисперсної системи (рис. 2).

Збільшення вмісту олеату натрію до певної межі (в умовах експерименту до 0,00021 % від маси портландцементу в дисперсній системі «портландцемент – олеат натрію») призводить до збільшення структурної міцності. Подальше збільшення вмісту олеату натрію в системі призводить до зниження її структурної міцності. Це підтверджує уявлення про зміну характеру впливу олеату натрію на поверхню дисперсної фази системи. Очевидно, встановлену межу зміни залежно структурної міцності даної дисперсної системи від змісту олеату натрію, при якому починається зниження її структурної міцності (рис. 3), відповідає моменту утворення його міцел.

У процесі виконаних експериментів встановлено, що введення в досліджувану систему реакційного порошкового бетону (RPC) оксиду заліза призводить до різкого збільшення міцності одержуваного бетону, як у віці 3 діб (рис. 4), так і у віці 28 діб (рис. 5). При цьому у віці 3 діб наявність оптимального вмісту оксиду заліза, яке забезпечує формування максимальної міцності системи, не встановлено.

У процесі виконаних експериментів встановлено, що введення в досліджувану систему (реакційний порошковий бетон), як оксиду заліза, так і МПАР призводить до різкого збільшення міцності одержуваного бетону.

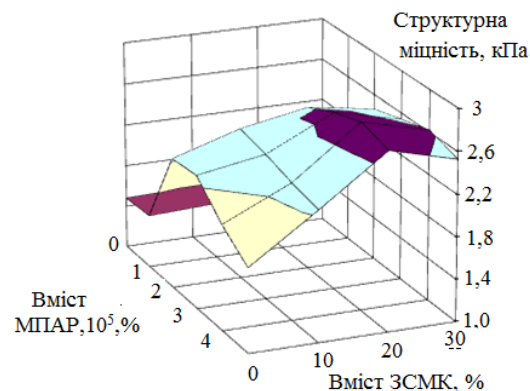


Рис. 3. Структурна міцність дисперсної системи «портландцемент – ЗСМК – МПАР»: час – 1,2 години після отримання системи

Кінетика зміни міцності досліджуваного бетону в залежності від вмісту в його складі оксиду заліза та МПАР визначалася встановленням та порівнянням міцності бетону у різному віці (рис. 6).

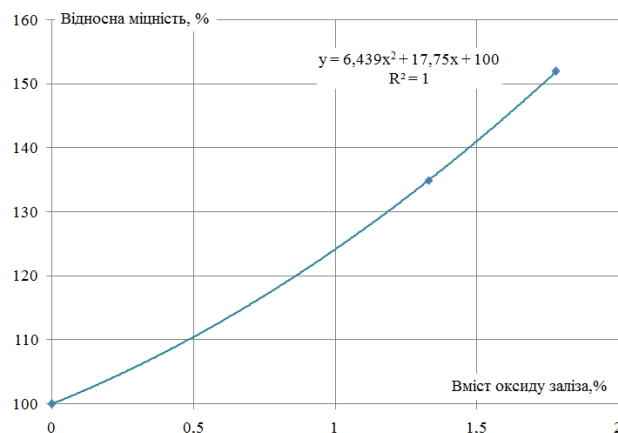


Рис. 4. Відносна міцність реакційного порошкового бетону у віці 3 діб

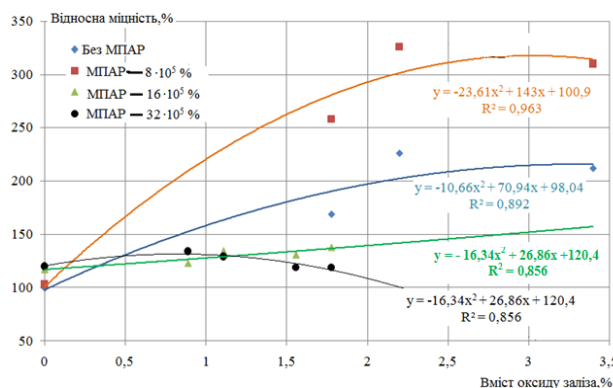


Рис. 5. Відносна міцність реакційного порошкового бетону у віці 28 діб

В умовах експерименту одночасне введення в реакційний порошок бетон сполук d-елементів (оксиду заліза) та поверхнево-активних речовин, що утворюють міцели, призводить до збільшення міцності такого бетону.



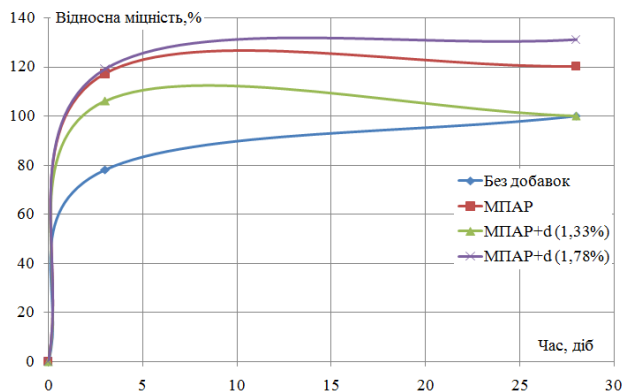


Рис. 6. Кінетика формування міцності RPC із ЗСМК та МПАР до віку у 28 діб: d – оксид заліза

## 6. Обговорення результатів досліджень впливу міцел поверхнево-активних речовин на міцність реакційних порошкових бетонів

Додавання до портландцементу сполук d-елементів (оксиду заліза) та міцелуотворюючих поверхнево-активних речовин призводить до збільшення кількості хімічно-зв'язаної води (рис. 2) в мінералах, що утворюються в процесі гідратації портландцементу. Це свідчить про набуття цементним тістом та цементним каменем нових властивостей, відмінних від властивостей цементного тіста та цементного каменю без означених добавок. В першу чергу вплив МПАР та сполук d-елементів (оксиду заліза) впливає на величину структурної міцності цементного тіста (рис. 3). При цьому необхідно зазначити, що оптимальна за величиною структурної міцності кількість МПАР співпадає з оптимальним за міцністю при стиску вмістом МПАР в таких бетонах [17].

У ранньому віці твердіння бетону введення сполук d-елементів (оксиду заліза) в бетон призводить до збільшення його міцності (рис. 4). При подальшому твердінні бетону (вік 28 діб) за результатами експериментів спостерігається наявність оптимального вмісту сполук d-елементів (оксиду заліза) (рис. 5). Але підвищення міцності бетону спостерігається тільки при певному вмісті МПАР. Збільшення вмісту МПАР в бетоні в даному випадку призводить до зменшення його

міцності, яка має величину навіть меншу за міцність бетону без добавок.

Отримані дані щодо впливу сполук d-елементів, на процес тужавлення бетону (рис. 6), дозволяють стверджувати наступне: на перших стадіях тужавлення бетону (3 доби), сполуки d-елементів практично не впливають на швидкість реакцій гідратації цементу в бетоні, який містить МПАР. При подальшому твердінні вплив сполук d-елементів збільшується і бетон, який містить ці сполуки та МПАР, набуває міцності більшої ніж бетон, який містить МПАР, або не містить ніяких добавок.

У віці 3 діб перевищення міцності бетону, що містить МПАР та сполуки d-елементів, над міцністю бетону без добавок досягає 120 %, а у віці 28 діб – до 250 % (рис. 6).

Отримані результати свідчать про те, що застосування перехідних хімічних елементів одночасно з поверхнево-активними речовинами, що утворюють міцели, при виготовленні реакційних порошкових бетонів призводить до збільшення як міцності при стиску таких бетонів, так і швидкості її формування. Це дозволяє скоротити терміни зведення будівель і споруд з монолітного бетону та терміни виготовлення збірних бетонних та залізобетонних конструкцій.

## 7. Висновки

1. Встановлено, що введення сполук d-елементів до складу бетону, що містить міцелуотворюючі поверхнево-активні речовини, призводить до збільшення кількості хімічно-зв'язаної води на 8..10 %, що забезпечить зменшення пористості бетону, його усадки, та призведе до збільшення його міцності.

2. Установлено, що відносна міцність при стиску реакційних порошкових бетонів, що містить міцелуотворюючі поверхнево-активні речовини, при введенні до їхнього складу сполук d-елементів, досягає 220 % від міцності бетону аналогічного складу, отриманого без застосування добавок. Введення сполук d-елементів до складу бетону, що містить міцелуотворюючі поверхнево-активні речовини, призводить до збільшення міцності при стиску на 250 % до від міцності бетону аналогічного складу, отриманого без застосування добавок.

## Література

- Глинка, Н. Л. Общая химия [Текст] / Н. Л. Глинка. – Л.: Химия, 1979. – 730 с.
- Сычев, М. М. Воздействие порошков d-металлов на твердение цементов [Текст] / М. М. Сычев // Журн. прикл. химии. – 1984. – Т. VII, № 3. – С. 552–557.
- Пащенко, А. А. Вяжущие материалы [Текст] / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, Е. А. Старчевская. – М.: Высш. шк., 1975. – 444 с.
- Шейнич, Л. А. Специальные бетоны и композиционные материалы [Текст] / Л. А. Шейнич // Будівельні клонструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Київ, НДІБК. – 2002. – Вип. 56. – С. 367–377.
- Шейнич, Л. А. Радіаційнозахисні матеріали для об'єктів атомної енергетики України [Текст] / Л. А. Шейнич // Будівельні клонструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 1999. – Вип. 50. – С. 19–23.
- Шишкин, А. А. Бетоны на основе шламов обогащения железных руд и щелочного компонента [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / А. А. Шишкин. – Кривой Рог, 1989. – 177 с.
- Шишкин, О. О. Специальные бетоны для усиления строительных конструкций, що експлуатуються в умовах дії агресивних середовищ [Текст] / О. О. Шишкин. – Кривий Ріг: «Мінерал», 2001. – 113 с.

8. Охотин, В. В. Стабилизация грунтов методом силикатирования. Стабилизация грунтов [Текст] / В. В. Охотин, А. И. Кульвинская. – Изд-во Гупосдор, 1938. – С. 102–116.
9. Резниченко, П. Т. Охрана окружающей среды и использование отходов промышленности [Текст] / П. Т. Резниченко, А. П. Чехов. – Днепропетровск: Проминь, 1973. – 94 с.
10. Шишкин, А. А. Шлакошламовые вяжущие [Текст]: тез. докл. конф./ А. А. Шишкин, Г. И. Калужный // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении. – Белгород, 1989. – С. 125.
11. Фаликман, В. Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны [Текст] / В. Р. Фаликман // Бетон и железобетон. – 2011. – № 2. – С. 78–84.
12. Erdem, T. K. Use of binary and ternary blends in high strength concrete [Text] / T. K. Erdem, O. Kirca // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22, Issue 7. – P. 1477–1483. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026
13. Батудаева, А. В. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей [Текст] / А. В. Батудаева, Г. С. Кардумян, С. С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 2005. – № 4. – С. 14–18.
14. Swamy, R. N. Role of Superplasticizers and Slag for Producing High Performance Concrete [Text] / R. N. Swamy, M. Sakai, N. Nakamura // The Fourth CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI SP-148-1, 2006. – P. 1–26.
15. Шишкин, А. А. Щелочные реакционные порошковые бетоны [Текст] / А. А. Шишкин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 2 (17). – С. 56–65.
16. Yang, Y. Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages [Text] / Y. Yang, R. Sato, K. Kawai // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, Issue 3. – P. 449–456. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.006
17. Termkhajornkit, P. Effect of fly ash on autogenous shrinkage [Text] / P. Termkhajornkit, T. Nawa, M. Nakai, T. Saito // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, Issue 3. – P. 473–482. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.010
18. Тевяшев, А. Д. О возможности управления свойствами цементобетонов с помощью наномодификаторов [Текст] / А. Д. Тевяшев, Е. С. Шитиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 4, № 7 (40). – С. 35–40. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/22048/19660>
19. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World [Text] / K. Sobolev, M. Ferrada-Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2005. – Vol. 10. – P. 14–17.
20. Шишкіна, О. О. Дослідження впливу нанокаталізу на формування міцності реакційного порошкового бетону [Текст] / О. О. Шишкіна, О. О. Шишкін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, № 6 (79). – С. 55–60. doi: 10.15587/1729-4061.2016.58718