

БЕТОН НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНО МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ

Мета. В науковій статті потрібно розглянути визначення типів зв'язків, що утворюються в модифікованій цементній матриці бетону, та оцінку якості цих зв'язків у неоднорідному матеріалі для визначення геометричних і фізичних співвідношень між структурою модифікаторів і цементної матриці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведені дослідження мікроструктури дисперсно модифікованої цементної матриці бетону та механізму структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення. Визначені методи надійної оцінки міцності бетону. **Результати.** Автором запропонована модель просторової структури цементної матриці бетону, модифікованої шляхом дисперсного армування кристалогідратами. Вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу в цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Встановлено, що найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при твердненні формуються в результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач, або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону. **Наукова новизна.** Встановлений механізм розвитку процесу формування початкової міцності та жорсткості модифікованої цементної матриці за рахунок швидкого росту кристалогідратів у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка обумовлює зростання міцності. **Практична значимість.** Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Розроблена технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічним процесам гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити технологічні основи бетонів спеціального призначення.

Ключові слова: цементна матриця; дисперсне модифікування; структуроутворення; бетон

Вступ

Відповідно до відомих уявлень бетон розглядають як гетерогенне середовище з «уродженими дефектами», які містяться у ньому з явно вираженою неоднорідною і неупорядкованою структурою з порушеннями суцільності у вигляді неоднорідного порового простору і можливих тріщин усадки. На поведінку бетону під час навантаження визначально впливають неоднорідності, що належать до верхнього рівня структури матеріалу. Верхній рівень структури (макроструктура) визначає значною мірою кінетику формування і розвитку критичних тріщин, які відповідальні за руйнування матеріалу під час експлуатації [4, 7]. У зв'язку з цим можна вважати, що ефективним рівням дисперсного модифікування цементної матриці повинні відповідати такі параметри її структури, за яких могло б найбільшою мірою

проявлятися гальмування (блокування) зростання тріщин, що формуються на рівні макроструктури бетону.

Для стереологічного уявлення структурної моделі модифікованої цементної матриці бетону введемо поняття – елементарний об'єм (елементарна чарунка). Будемо вважати, що елементарним є такий мінімальний об'єм цементної матриці бетону, який має усі основні властивості (у тому числі щільність) і містить усі рівні структури матеріалу. При цьому в об'ємі кожної елементарної чарунки виділимо неоднорідності («дефекти»), відповідні верхньому рівню структури бетону, а «дефекти» нижніх рівнів, які відносять до мезо-, мікро- і субмікроструктури, будемо вважати розподіленими по всьому об'єму, тобто матеріал чарунок між «дефектами» макроструктури подаємо квазіоднорідним.

Мета

Визначення типів зв'язків, що утворюються у модифікованій цементній матриці бетону, та оцінка якості цих зв'язків у неоднорідному матеріалі для визначення геометричних і фізичних співвідношень між структурою модифікаторів і цементної матриці.

Методика

Для досягнення поставленої мети виконані дослідження мікроструктури дисперсно модифікованої цементної матриці бетону, механізму структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення; визначені методи надійної оцінки міцності бетону.

Результати

Моделльні дослідження структури бетонів виконувалися багатьма авторами [1, 5, 6]. Розвиваються різні уявлення, що моделюють структуру бетону у вигляді капілярно-пористого середовища, пронизаного паралельними циліндричними каналами, або системи послідовно розташованих капілярів різної довжини і різного діаметра, а також у вигляді простору, заповненого однаковими кулями з кубічною або гексагональною упаковкою, або такою, що містить контактуючі між собою октаедри зі зрізаними вершинами [3, 8, 9, 12].

Відомо модельне відображення [10], що подає бетон у вигляді квазіоднорідного вихідного середовища, пронизаного системою дефектів (тріщинами, порами, капілярами). Тріщини поділяють бетон на ізольовані об'єми, умовно названі зернами, причому перешийки між зернами, прийняті умовно сферичної форми, утворюють «зв'язки», які формують у просторі ортогональну систему, що сприймає напруження розтягу у бетоні [2, 11]. Така модель дозволяє встановити закономірності крихкого і псевдокрихкого руйнування бетону з урахуванням впливу на ці процеси масштабного фактора [14, 15]. Масштабний фактор набуває істотного значення при моделюванні структури бетону на модифікованій цементній системі [13].

Викликає інтерес модель просторової структури цементної матриці бетону, модифікованої шляхом дисперсного армування кристалогідратами. При цьому, напевно, слід йти

не від геометричного «образу» просторової моделі до структури модифікування, а від аналізу структури цементної матриці до геометричного «образу» моделі модифікованого матеріалу.

У запропонованій моделі структури модифікованого матеріалу вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу у цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Вочевидь, найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при його твердненні формуються у результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону. Можна вважати, що контактні тріщини при їх виникненні мають розміри, співмірні з розмірами макроскопічних неоднорідностей цементної матриці. На межі з неоднорідностями при силових впливах формується, як правило, найбільш інтенсивне поле напружень, здатне до нестійкого поширення тріщин в об'ємі бетону від одного неоднорідного включення до іншого. Завдання полягає у блокуванні зростання, перш за все, контактних тріщин.

Припустимо, що неоднорідності у бетоні знаходяться практично в ідеальному безладі. У такій системі з достатньо великою кількістю неоднорідних включень макроскопічний безлад повинен задовольняти вимогам постійної щільності розподілу, тобто можна уявити, що кількість неоднорідностей зерен заповнювача, пор, що приходяться на кожен елементарну одиницю об'єму цементної матриці бетону, буде приблизно однаковою і, отже, будь-який обмежений об'єм бетону, що містить певну кількість макроскопічних неоднорідностей, можна без небезпечних наслідків замінити аналогічним об'ємом, узятим з будь-якої іншої частини зразка. Така ситуація дозволяє надати системі з неупорядкованим ансамблем неоднорідностей певну регулярність у вигляді моделі з елементами структури, що мають статистичну однорідність.

Якщо уявити макроскопічні неоднорідності бетону у вигляді куль, що хаотично, але однорідно заповнюють простір, і провести вектори, що з'єднують центр кожної неоднорідності з центрами найближчих сусідів, а потім через середини векторів перпендикулярно їм провести пло-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

щини, то об'єми, обмежені цими площинами, будуть являти собою деяку багатогранну фігуру на кшталт поліедра, характерного для систем з невпорядкованою організацією структури.

Отриманий багатогранник подамо у вигляді елементарної чарунки макроструктури бетону. У реальних бетонах (навіть у одному складі) не можна отримати абсолютно ідентичні один одному елементарні чарунки макрооб'ємів. Але, оскільки у кожному з цих об'ємів у відповідності з прийнятим допущенням є макроскопічна неоднорідність, отримана елементарна чарунка не може істотно відрізнятись від симетричних і конгруентних об'ємних фігур, усереднених у реальному матеріалі.

Можна уявити різні варіанти геометричного відображення елементарних чарунок структури бетону і їх просторового розподілу в об'ємі матеріалу: від найбільш щільних упаковок, наприклад, у вигляді ромбічних додекаєдрів, до найпростіших просторових решіток з кубічним розподілом. Характер просторового розподілу і вид елементарних чарунок визначають важливі геометричні параметри структури, зокрема фіксують відстані між неоднорідностями у перетинах матеріалу, що моделюється. Якщо відомі діаметри макроскопічних неоднорідностей, можна визначити кількість матеріалу, що припадає на кожен неоднорідність. Ця кількість буде відповідати усередненій величині об'єму елементарної чарунки макроскопічної неоднорідності, об'ємному вмісту неоднорідностей на рівні макроструктури бетону та діаметра неоднорідних включень.

Також можна прогнозувати різні варіанти розподілу модифікуючих армуючих кристалогідратів в об'ємі елементарних чарунок цементної матриці.

Введемо положення про необхідність чергування з певним кроком макроскопічних неоднорідностей і геометричних центрів модифікуючих кристалогідратів по найкоротших з можливих відстаней між ними, тому що найбільш ймовірно поширення тріщини від однієї неоднорідності до іншої має протікати в напрямку найменшої відстані між ними, що відповідає мінімуму енергетичних витрат, необхідних у цілому для руйнування матеріалу. Цей період чергування (трансляції) визначає у значній мірі рівень дисперсності модифікуючих кристалогідратів.

Ґрунтуючись на цьому положенні, розмістимо центри кристалогідратів у центрі кожної грані багатогранних фігур, що обмежують об'єми елементарних чарунок бетону. Лінії (вектори), що з'єднують центр кожної неоднорідності з центрами найближчих сусідів, проходять через центр кожного з кристалогідратів. Якщо замінити багатогранник елементарної чарунки сукупністю ліній (векторів), що виходять з центру кожної неоднорідності до відповідного перетину з центрами кристалогідратів, отримаємо просторове відображення моделі у вигляді полярного комплексу. Рівень дисперсності модифікуючого армування кристалогідрату цементної матриці бетону у запропонованій моделі відповідає рівню дисперсного розподілу макроскопічних неоднорідностей в об'ємі матеріалу. Подібна модель розташування центрів кристалогідратів оптимальна з точки зору створення перешкод для розвитку тріщин між неоднорідностями в об'ємі бетону.

Мікроструктура новоутворень дисперсно модифікованої цементної системи досліджувалася на зразках, приготовлених з теоретично розрахованою кількістю води, необхідною для проектного ступеня гідратації. Спостереження за допомогою скануючого електронного мікроскопа виконані на поверхнях зламів, отриманих при розриві висушених зразків, покритих шаром сплаву, що складається з 60 % Au і 40 % Pd. Результати досліджень дозволили висунути таку гіпотезу розвитку мікроструктури модифікованої цементної системи. Кристалогідрати швидко ростуть у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, зумовлює розвиток початкової міцності і жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності. Утворення голчастих кристалів не розглядається як безумовна вимога для затвердіння.

Міцність залежить від утворення продуктів реакції, що заповнюють вільний простір. Це призводить до формування щільної мікроструктури з мінімальною пористістю. Вочевидь, сприяє цьому характерне зростання голчастих і ниткоподібних кристалів. Наростання міцності модифікованої цементної системи наведено на рис. 1.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

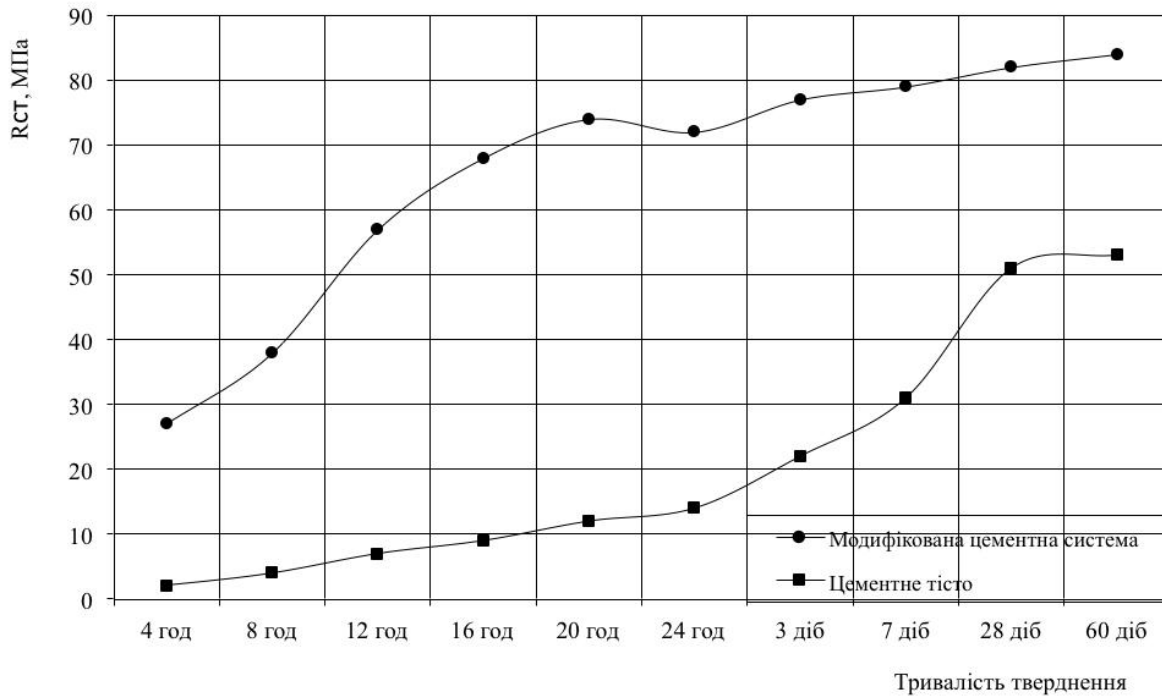


Рис. 1. Кінетика зміни міцності при стиску цементної матриці бетону

Fig. 1. Kinetics of changes in the compressive strength of cement concrete matrix

У дослідженнях використаний портландцемент М 500. Різниця в наростанні міцності очевидна. Оскільки немає помітної зміни у мікроструктурі, зменшення міцності зразків модифікованої цементної системи, яке тимчасово відбувалося у віці 1 доби, можна пояснити напруженням при розтягу, викликаним усадкою, що спостерігається через 1 добу тверднення. Раннє наростання міцності зразків модифікованої цементної системи у перші 24 год знаходиться у відповідності до спостережень, виконаних за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Появу перших голчастих кристалів виявлено через 2 год після приготування модифікованої цементної системи, перш ніж система почала набирати міцність. До 4 год ріст кристалів значно збільшився. Надалі мікроструктура не показала змін, за винятком поступового зменшення пористості.

Наукова новизна та практична значимість

Встановлений механізм розвитку процесу формування початкової міцності і жорсткості модифікованої цементної матриці за рахунок

швидкого росту кристалогідратів у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності.

Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Розроблена технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічних процесів гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити технологічні основи бетонів спеціального призначення. Це сприяє розширенню напрямків використання модифікованих бетонів у різних видах будівельного виробництва, наприклад підвищення в'язучого потенціалу цементу у високоміцних бетонах, використання модифікованих цементних систем в особливих умовах підводного бетонування і ремонту різних споруд, торкретування та ін. У перспективі дисперсне модифі-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

кування дозволяє розробити принципово нову пневмоструминну технологію бетонних та армобетонних виробів, при якій використовується кінетична енергія маси, що рухається, виключається процес приготування бетонної суміші і з'являється можливість формування виробів складної конфігурації.

Висновки

1. Запропоновано модель просторової структури модифікування цементної матриці бетону шляхом дисперсного армування кристалогідратами. Вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу в цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Встановлено, що найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при твердненні формуються у результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону.

2. Рівень дисперсності модифікуючого армування кристалогідратами цементної матриці бетону у запропонованій моделі відповідає рівню дисперсного розподілу макроскопічних неоднорідностей в об'ємі матеріалу. Подібна модель розташування центрів кристалогідратів оптимальна з точки зору створення перешкод для розвитку тріщин між неоднорідностями в об'ємі бетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дейнега, Ю. Ф. Дисперсные системы в электрических полях / Ю. Ф. Дейнега // Укр. хим. журн. – 2001. – Т. 67, № 3. – С. 13–18.
2. Иванова, А. П. Анализ и перспективы применения эффективных ресурсосберегающих технологий в производстве бетона / А. П. Иванова, О. И. Труфанова // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 150–156. doi: 10.15802/stp2014/30453.
3. Особенности структурообразования высокопрочного цементного камня в условиях длительного твердения / В. В. Бабков, Р. Р. Сахибгареев, А. Е. Чуйкин [и др.] // Строит. материалы. – 2003. – № 10. – С. 42–43.
4. Пирадов, К. А. Механика разрушения железобетона / К. А. Пирадов, Е. А. Гузеев. – Москва : Новый век, 1998. – 190 с.
5. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
6. Руденко, Д. В. Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 174–182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
7. Хердтл, Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76–80.
8. Хорошун, Л. П. Нелинейные свойства композитных материалов стохастической структуры / Л. П. Хорошун, Б. П. Маслов. – Киев : Наук. думка, 1992. – 132 с.
9. Collepardi, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepardi // Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering : Proceedings. – Milan, 2003. – P. 1–8.
10. Lee, C. Y. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems / C. Y. Lee, H. K. Lee, K. M. Lee // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33, № 3. – P. 425–431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)-00973-0.
11. Mehta, P. K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development / P. K. Mehta // The Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology : Proc. (20.05–21.05.2004). – Beijing, 2004. – P. 3–13.
12. Middendorf, B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials / B. Middendorf, N. B. Singh // Cement Intern. – 2006. – № 4. – P. 80–86.
13. Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2013. – Vol. 13, № 4. – P. 218–224.
14. Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2010. – Vol. 10B. – P. 128–133.
15. Rudenko, N. Technology of shotcreting based on activated binder / N. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2014. – Vol. 14, № 1. – P. 222–228.

Д. В. РУДЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Городское строительство и хозяйство», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

БЕТОН НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Цель. В научной статье необходимо рассмотреть определение типов связей, возникающих в модифицированной цементной матрице бетона, и оценку качества этих связей в неоднородном материале для определения геометрических и физических соотношений между структурой модификаторов и цементной матрицы. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры дисперсно модифицированной цементной матрицы бетона и механизма структурообразования модифицированной цементной системы бетона естественного твердения. Определены методы надежной оценки прочности бетона. **Результаты.** Авторами предложена модель пространственной структуры цементной матрицы бетона, модифицированной путем дисперсного армирования кристаллогидратами. Исходным объектом исследования является совокупность элементарных объемов (ячеек) цементной матрицы и система пространственного распределения в этих объемах армирующих кристаллогидратов. Установлено, что наиболее опасные дефекты в виде трещин в объеме бетона при твердении формируются в результате возникновения внутренних напряжений, главным образом, в зоне контакта цементная матрица – наполнитель, или в области, граничащей с наиболее крупными порами бетона. **Научная новизна.** Установлен механизм развития процесса формирования начальной прочности и жесткости модифицированной цементной матрицы за счет быстрого роста кристаллогидратов в пространстве между частицами дисперсного армирующего модификатора. Поскольку свободному росту кристаллов препятствует недостаток пространства, кристаллы взаимно прорастают, образуя плотную структуру, которая обуславливает рост прочности. **Практическая значимость.** Дисперсное модифицирование цементной матрицы позволяет получить долговечные бетоны специального назначения с проектными эксплуатационными свойствами. Разработанная технология дисперсного модифицирования цементной системы, установленные особенности механизма ее структурообразования, а также использование принципа конгруэнтности комплекса технологических воздействий физико-химическим процессам гидратации клинкерных минералов позволили разработать технологические основы бетонов специального назначения.

Ключевые слова: цементная матрица; дисперсное модифицирование; структурообразование; бетон

D. V. RUDENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Urban Construction and Management», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Soborny Ave., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, e-mail veberc@ukr.net, tel. +38 (098) 214 04 85, ORCID 0000-0003-0827-042X

CONCRETE BASED ON MODIFIED DISPERSE CEMENT SYSTEM

Purpose. The article considers definition of the bond types occurring in a modified cement concrete matrix, and the evaluation of the quality of these links in a non-uniform material to determine the geometrical and physical relationships between the structure and the cement matrix modifiers. **Methodology.** To achieve this purpose the studies covered the microstructure of dispersed modified concrete cement matrix, the structure formation mechanism of the modified cement concrete system of natural hardening; as well as identification of the methods of sound concrete strength assessment. **Findings.** The author proposed a model of the spatial structure of the concrete cement matrix, modified by particulate reinforcement crystal hydrates. The initial object of study is a set of volume elements (cells) of the cement matrix and the system of the spatial distribution of reinforcing crystallohydrates in these volume elements. It is found that the most dangerous defects such as cracks in the concrete volume during hardening are formed as a result of internal stresses, mainly in the zone of cement matrix-filler contact or in the area bordering with the largest pores of the concrete. **Originality.** The result of the study is the defined mechanism of the process of formation of the initial strength and stiffness of the modified cement matrix due to the rapid growth of crystallohydrates in the space among the dispersed reinforcing modifier particles. Since the lack of space prevents from the free growth of crystals, the latter cross-penetrate, forming a dense structure, which contributes to the growth of

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

strength. **Practical value.** Dispersed modifying cement matrix provides a durable concrete for special purposes with the design performance characteristics. The developed technology of dispersed cement system modification, the defined features of its structure formation mechanism and the use of congruence principle for the complex of technological impacts of physical and chemical processes of hydration of clinker minerals allowed developing technological bases for special-purpose concrete.

Keywords: cement matrix; disperse modification; structure formation; concrete

REFERENCES

1. Deynaga Yu.F. Dispersnyye sistemy v elektricheskikh polyakh [Disperse systems in electric fields]. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal – Ukrainian Chemical Journal*, 2001, vol. 67, no. 3, pp. 13-18.
2. Ivanova A.P., Trufanova O.I. Analiz i perspektivy primeneniya effektivnykh resursosberegayushchikh tekhnologiy v proizvodstve betona [Analysis and application prospects of effective resources-saving technologies in concrete manufacture]. *Nauka ta progres transport – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 150–156. doi: 10.15802/stp2014/30453.
3. Babkov V.V., Sakhibgareyev P.P., Chuykin A.Ye., Anvarov R.A., Komokhov P.G. Osobennosti strukturoobrazovaniya vysokoprochnogo tsementnogo kamnya v usloviyakh dlitel'nogo tverdeniya [Features of structure formation of high-strength cement stone in long-term hardening]. *Stroitelnyye materialy – Construction Materials*, 2003, no. 10, pp. 42-43.
4. Piradov K.A., Guzeyev Ye.A. *Mekhanika razrusheniya zhelezobetona* [Fracture mechanics of concrete]. Moscow, Novyy vek Publ., 1998. 190 p.
5. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proyektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii* [Composites based on fiber reinforced concrete. Questions of the theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2004. 560 p.
6. Rudenko D.V. Fizyko-khimichna modyfikatsiya tsementnoi systemy monolitnoho betonu [Physico-chemical modification of monolithic concrete cement system]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no.6 (60), pp. 174-182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
7. Kherdtl R., Ditermann M., Shmidt K. Dolgovechnost betonov na osnove mnogokomponentnykh tsementov [Durability of concrete on the basis of multicomponent cements]. *Tsement i yego primeneniye – Cement and its Application*, 2011, no. 1, pp. 76-80.
8. Khoroshun L.P., Maslov B.P. *Nelineynnye svoystva kompozitnykh materialov stokhasticheskoy struktury* [Non-linear properties of composite materials of stochastic structure]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 132 p.
9. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering: Proc. Milan, 2003, pp. 1-8.
10. Lee C.Y., Lee H.K., Lee K.M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 425-431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0.
11. Mehta P.K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development. The Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology: Proc. (20.05–21.05.2004). Beijing, 2004, pp. 3-13.
12. Middendorf B., Singh N.B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials. *Cement International*, 2006, no. 4, pp. 80-86.
13. Rudenko D. Properties of the phase components of the modified cement system. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 218-224.
14. Rudenko N. The Development of Conception of New Generation Concretes. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2010, vol. 10B, pp. 128-133.
15. Rudenko N. Technology of shotcreting based on activated binder. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2014, vol. 14, no 1, pp. 222-228.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. А. Банахом (Україна), д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна)

Надійшла до редколегії: 16.03.2016

Прийнята до друку: 08.06.2016