



Пушкарьова К. К.



Гончар О. А.



Іонов Д. С.



Гадайчук Д. Р.

Пушкарьова К. К., д.т.н., проф.,
завідувач кафедри будівельних матеріалів КНУБА,
КНУБіА, 03680, м. Київ,
Повітрофлотський пр-т, 31,
✉ pushkarova.kk@knuba.edu.ua ☎ +38 (067) 174 68 06.

Гончар О. А., к.т.н., доц.,
доцент кафедри будівельних матеріалів КНУБА,
КНУБіА, 03680, м. Київ,
Повітрофлотський пр-т, 31,
✉ gonchar.oa@knuba.edu.ua ☎ +38 (067) 101 51 65.

Іонов Д. С., к.т.н.,
науковий співробітник ДП «НДІБМВ»
ДП «НДІБМВ»,
04080, м. Київ,
вул. Костянтинівська, 68
✉ dimetrfsa@gmail.com ☎ +38 (093) 684 09 49.

Гадайчук Д. Р., аспірант
кафедри будівельних матеріалів КНУБА,
КНУБіА, 03680, м. Київ, Повітрофлотський пр-т, 31,
✉ danil.starcon@gmail.com ☎ +38 (067) 349 97 86.

K. Pushkarova, Doctor of Technical Sciences,
Prof., Head of the Department of building materials KNUCA,
KNUCA, 03680, Kyiv,
Povitroflotskyi ave., 31

✉ pushkarova.kk@knuba.edu.ua ☎ +38 (067) 174 68 06.

O. Honchar, Ph.D., Associate professor,
assistant professor of Department of building materials KNUCA,
03680, Kyiv,
Povitroflotskyi ave., 31

✉ gonchar.oa@knuba.edu.ua ☎ +38 (067) 101 51 65.

S. Ionov, Ph.D.,
Researcher STATE ENTERPRISE "UKRAINIAN RESEARCH, PROJECT
PLANNING AND DESIGN INSTITUTE OF BUILDING MATERIALS AND
PRODUCTS "NIISMI",

04080, Kyiv, Konstyantynovskv Street, 68
✉ dimetrfsa@gmail.com ☎ +38 (093) 684 09 49.

D. Hadaichuk, PhD student
of the Department of building materials KNUCA,
KNUCA, 03680, Kyiv, Povitroflotskyi ave., 31
✉ danil.starcon@gmail.com ☎ +38 (067) 349 97 86.

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ У БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

PECULIARITIES OF OBTAINING AND PROSPECTS FOR USING REACTIVE-POWDER CONCRETE IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY OF UKRAINE

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕАКЦИОННОЙ-ПОРОШКОВЫХ БЕТОНОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ УКРАИНЫ

Анотація. В роботі показано, що отримання високофункціональних бетонів, в тому числі реакційно-порошкових, досягається за умови виконання багатьох факторів, таких як: використання високоміцних цементів та заповнювачів, максимально низьким водоцементним співвідношенням, високою максимально можливою витратою цементу, застосуванням суперпластифікаторів нової генерації і модифікуючих нанодобавок. Використання таких складів бетонів особливо є ефективним в технологіях будівельного друку на 3D принтерах.

Ключові слова: високоміцні бетони, високофункціональні бетони, самоущільнювальні бетони, реакційно-порошкові бетони.

Abstract. It is shown in the work that the production of highly functional concretes, including reaction-powder concretes, is achieved subject to the fulfillment of many factors, such as: the use of high-strength cements and aggregates, the lowest possible water-cement ratio, the highest possible cement consumption, the use of new generation superplasticizers and modifying nanoadditives. The use of such concrete compositions is especially effective in construction technologies for printing on 3D printers.

Keywords: high-strength concrete, high performance concrete, self-Compacting concrete, reactive powder concrete.

Аннотация. В работе показано, что получение высокофункциональных бетонов, в том числе реакционно-порошковых, достигается при условии выполнения многих факторов, таких как: использование высокопрочных цементов и заполнителей, максимально низким водоцементным соотношением, максимально возможным расходом цемента, применением суперпластификаторов нового поколения и модифицирующих нанодобавок. Использование таких составов бетонов особенно эффективно в технологиях строительной печати на 3D принтерах.

Ключевые слова: высокопрочные бетоны, высокофункциональные бетоны, самоуплотняющиеся бетоны, реакционно-порошковые бетоны.

У сучасному будівництві бетон вважається основним конструкційним матеріалом, виробництво якого постійно зростає, причому враховуючи особливості будівельного ринку все більша увага приділяється саме архітектурному бетону [1]. В останні роки все ширшого застосування набувають бетони нової генерації, до яких належать: високоміцні бетони (High-Strength Concrete, HSC), високофункціональні бетони (High Performance Concrete, HPC), самоущільнювальні бетони (Self-Compacting Concrete, SCC) та реакційно-порошкові бетони (Reactive Powder Concrete, RPC).

Високоміцний бетон згідно EN 206-1:2000 та ДСТУ Б В.2.7-176:2008 – це важкий бетон з класами міцності при стиску від C55/67 до C100/115 та легкий бетон з класами міцності при стиску від LC55/60 до LC80/88.

Під високофункціональними бетонами розуміють всі види бетонів певного функціонального призначення, які за показниками якості відповідають або перевищують максимальні критерії, регламентовані стандартами різних країн [2-7].

На сьогоднішній день за показниками міцності можна виділити наступні види бетонів [8]:

- Бетон нормальної міцності (NSC) до B60 МПа;
- Високоміцний бетон (HSC) B60 до B100 МПа;
- Бетон високофункціональний (HPC) від B100 до B150 МПа;
- Ультра високофункціональний бетон (UHPC, UH-PFRC) від B150 до B300 МПа, в тому числі бетони DSP та MDF.

Розробка високофункціональних бетонів в 70-х роках минулого століття почалася з використання дуже низьких значень водоцементного відношення (цементні пасти високої міцності з В/Ц від 0,2 до 0,3), що давало можливість отримати бетони з дуже низьким рівнем пористості та високою міцністю при стиску – до 200 МПа [9]. Подальші дослідження були направлені на підбір складу та видів основних компонентів бетонних сумішей – заповнювачів, цементу, води, добавок, домішок і волокон. Відмінність складів таких бетонів від звичайних може полягати в кількості в'язучої речовини, особливостях гранулометричного складу заповнювача та виду наповнювачів, а також в наявності волокон [10].

Можна виділити два підходи до проектування складу високофункціонального бетону. Перший з них передбачає ущільнення цементної матриці дрібними частинками. Так виник бетон DSP (Densified Small Particles), зерниста матриця якого має певний гранулометричний склад та дозволяє отримати штучний камінь, міцність при стиску якого коливається від 150 до 400 МПа. У DSP бетонній суміші використовують надзвичайно міцні заповнювачі, наприклад, випалений боксит або граніт. Крім того, бетонна суміш має дуже високий вміст суперпластифікаторів та мікрокремнезему, що дозволяє значно зменшити пористість цементного каменю та збільшити міцність матеріалу [11]. Другий підхід привів до створення бетону Macro Defect Free (MDF). Це полімермодифікований цементний матеріал, де полімери заповнюють пори бетону, що веде до утворення надзвичайно міцних і компактних матриць. Однак бетони MDF відрізняються підвищеними вимогами щодо дотримання технології виготовлення та мають надмірну повзучість [12].

Для виробництва високофункціонального бетону важливо досягти максимальної щільності упаковки всіх зернистих компонентів бетонної суміші [13]. Щільність упаковки є однією з найважливіших властивостей системи частинок і визначається як об'ємний відсоток твердих речовин в одиниці об'єму бетону [14].

Чим меншого розміру частинки використані, тим щільність упаковки буде більше. Враховуючи той факт, що

бетонна суміш повинна мати певні показники легкоукладальності, повністю щільна упаковка матриці не є ефективною і її досягнення практично неможливо [15]. Підвищення щільності матриці для отримання необхідних як технологічних показників бетонної суміші, так і експлуатаційних характеристик бетону, досягається оптимізацією упаковки всіх її складових компонентів – цементу, наповнювачів (тонкомелених добавок, наприклад, мікрокремнезему, золи, шлаку, метакаоліну) і дрібних заповнювачів [16]. Позитивно впливати на щільність упаковки частинок і стабільність цементної пасти можна шляхом додавання наповнювачів до цементу. Особливо це стосується наповнювачів, розмір зерен яких менше розміру зерен цементу [15].

Враховуючи підвищену крихкість MDF та DSP бетонів, ефективним є введення волокон, від кількості та розмірів яких залежить як легкоукладальність бетонних сумішей, так і тріщиностійкість отриманого штучного каменю. Слід відмітити, що введення волокна до складу сумішей для отримання MDF-бетону технологічно ускладнене через їхню підвищену в'язкість, тому сьогодні волокно додається переважно у матрицю бетону DSP [17].

Важливим фактором впливу на показники отриманих бетонів є вид та розміри заповнювачів, а також їх співвідношення. При отриманні високофункціональних бетонів необхідно, щоб заповнювачі мали високу міцність і не були найслабкішою частиною штучного каменю. При додаванні крупних заповнювачів до розчину вміст цементу знижується, а отже зменшується контракція (аутогенна усадка), а також стає меншою собівартість матеріалу. Проте використання крупних заповнювачів у складі високофункціональних бетонів є доцільним у випадках, коли товщина конструкційного елемента значно більше, ніж розмір заповнювача [18].

Таким чином, високофункціональні бетони (High Performance Concrete – HPC) відрізняються від звичайних бетонів нижчим водоцементним відношенням, зменшеною кількістю крупного заповнювача, оптимальним зерновим складом, а також наявністю сучасних суперпластифікаторів і великої кількості тонкодисперсних компонентів (наповнювачів), що можуть бути представлені золою-винесенням, метакаоліном, мікрокремнеземом тощо [19].

На основі DSP-бетонів було розроблено реакційно-порошкові бетони, які відрізняються від інших видів бетону зменшеними розмірами частинок і зміцненням структури за рахунок використання різних видів фібри. Регулювання рухомістю реакційно-порошкових сумішей, що мають дуже низьке водов'язуче відношення та не містять у своєму складі крупного заповнювача, може бути здійснено шляхом додавання ефективних суперпластифікаторів.

Підвищити фізико-механічні характеристики реакційно-порошкового бетону можна шляхом збільшення ступеня щільності упаковки основних компонентів цементної матриці [20]. В цьому випадку ефективним є додавання наночастинок, що можуть не лише ущільнювати структуру, а й регулювати склад і кількість продуктів тверднення, наприклад, стимулювати формування більшої кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію (C-S-H), що, в свою чергу сприятиме покращанню фізико-механічних властивостей та довговічності бетонів.

Відомо [21], що з підвищенням кількості використаного нанокремнезему має місце збільшення міцності при стиску реакційно-порошкових бетонів, причому оптимальна кількість цієї добавки становить біля 4% від маси в'язучої речовини, що значно менше ніж при використанні мікрокремнезему. При використанні 1% наноме-



такаоліну спостерігається зміцнення мікроструктури бетону, що сприяє зниженню проникнення йонів хлору та підвищенню його корозійної стійкості [22]. Введення нанокарбонатних добавок до складу реакційно-порошкового бетону прискорює процеси гідратації в ранньому віці, що дає змогу отримати більш щільну упаковку частинок цементної матриці та підвищити фізико-механічні характеристики отриманого штучного каменю [23, 24].

Крім того, при введенні частинок TiO_2 відмічено підвищений рівень поглинання CO_2 через рекарбонізацію та самовідновлюючі властивості реакційно-порошкових бетонів завдяки проявленню фотокаталітичного ефекту [25].

Таким чином, використання наноматеріалів в складі реакційно-порошкових бетонів (нанокремнезему, нанометакаоліну, нанокарбонатів) дає можливість отримати більш щільну мікроструктуру за рахунок як максимальної упаковки, так і можливості направленої регулювання продуктів гідратації цементів в складі таких сумішей. Використання модифікованих бетонних сумішей забезпечує не лише отримання більш щільної мікроструктури отриманого бетону, а й покращує його експлуатаційні характеристики. Також при проектуванні складів високо-функціональних бетонів, в тому числі реакційно-порошкових, доцільним є встановлення реакційної здатності матеріалів та врахування можливості їх сумісної роботи щодо направленої синтезу кристалохімічно подібних гідратних новоутворень, які відіграють визначальну роль при синтезі міцності будь-якого штучного каменю [26]. Краща сумісність тонкомелених добавок може привести до зниження потрібної кількості суперпластифікатора. Саме врахування цих факторів відкриває нові можливості щодо керування нано- та мікрорівнем структури бетону, які, в свою чергу, будуть впливати на покращення структури каменю на мезо- та макрорівнях [27].

Отже, отримання високофункціональних бетонів, в тому числі реакційно-порошкових, досягається за умови виконання багатьох факторів, таких як: використання високоміцних цементів та заповнювачів, максимально низьким водоцементним співвідношенням, високою максимально можливою витратою цементу, застосуванням суперпластифікаторів нової генерації і модифікуючих нанодобавок, що забезпечують ущільнення мікроструктури бетону та підвищення показників його фізико-механічних властивостей.

Використання таких реакційно-порошкових бетонів особливо є ефективним в технологіях будівельного друку на 3D принтерах, де крім традиційних вимог до бетону, таких як міцність, довговічність, морозостійкість, важливими є також реологічні властивості бетонної суміші, зчеплення між компонентами суміші та її сусідніми шарами, швидкий набір ранньої міцності для витримування навантаження від наступних шарів, що наносяться, а також мінімальна усадка та максимальна тріщиностійкість безпосередньо бетону.

За результатами попередніх експериментальних досліджень [24, 27] формування матриці для отримання реакційно-

порошкового бетону, а особливо бетонної суміші для 3D принтера повинно передбачати:

- використання комплексної органо-мінеральної добавки, яка буде забезпечувати потрібні реологічні характеристики бетонної суміші та позитивно впливати на функціональні властивості отриманого бетону; ця добавка може бути мікро- ти нанорівня, вибір її базується на досягненні максимальної щільності упаковки матриці, тобто при підборі гранулометрії порошкоподібних складових матриці потрібно звертати увагу на тонину помелу портландцементу, активних мінеральних добавок та наповнювачів (як мікро-, так і наномасштабного рівня);
- мінеральна складова добавки повинна позитивно впливати на реологічні характеристики бетонної суміші та бути сумісною з полімерною складовою, що входить до пластифікуючих або інших функціональних добавок; вона має бути реакційноздатною не тільки до зв'язування портландиту в низькоосновні гідросилікати кальцію, але й приймати участь у формуванні термодинамічно стабільних водостійких гідратних фаз (з відомих добавок з цієї функцією краще справляється мікро- та нанокремнезем);
- також добавка повинна знижувати тепло гідратації цементної системи та позитивно впливати на реологію і процеси структуроутворення – з цими функціями мабуть краще буде справлятися карбонатна добавка або комплексна карбонатно-силікатна, причому це може бути як добавка мікро- так і нанорівня.

Використовуючи оптимізовані склади реакційно-порошкових бетонних сумішей можна реалізувати всі переваги адитивної технології 3D-друку, такі як мінімальні трудозатрати, практично повна відсутність відходів, висока швидкість бетонунування при необмеженій архітектурній виразності конструкцій, що вимагає особливої підходу до розробки складів архітектурних бетонів, до яких висуваються особливі вимоги не тільки до їх реологічних властивостей, але й до експлуатаційних, особливо на ранніх етапах твердіння.

В той же час, використання таких принтерів в будівництві відкриває нові можливості зниження собівартості та підвищення точності виготовлення «друкованих» об'єктів, дає змогу використовувати різні матеріали в якості вихідних для бетонних сумішей, зменшує час безпосередньо на зведення будівель і споруд різного призначення.

Таким чином, використання високофункціональних бетонів на основі реакційно-порошкових матеріалів з підвищеними показниками конструктивної якості відкриває певні можливості зниження матеріаломісткості і маси будівельних конструкцій, розробки тонкостінних конструкцій, архітектурних поверхонь, надмічних споруд оборонного застосування, підсилюючих розчинів та високоміцних елементів транспортних споруд, що особливо є актуальним для будівельної галузі України.

Література:

1. Сайт «1beton.info»: Состав архитектурного бетона, технология изготовления, область применения армированного бетона. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://beton-house.com/vidy/dekorativnye/arhitekturnyj-beton-826/>. 19.11.2018 .
2. Collepardi M. The new concrete, Copyrigh Mario Collepardi.-2006 – 421p.
3. Aitcin, P. Cements of yesterday and today—concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 2000- 30(9)-pp. 1349–1359.
4. Aitcin P.-C. The art and science of high performance concrete// Nelu Spiratos Symposium on Siperpkastizers, Bucharest, Romania, 2003- pp.69-88.
5. Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. *Betony ultrawysokowartosciowe, ilasciowosci, technologie, zastosowanie.*-Krakow: Stowarszenie Producentow Cementu, 2008.-159 s.
6. Бетоны нового поколения на основе тонкозернисто-порошковых смесей// Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М./ *Magazine of Civil Engineering/* 2012.-№8.- с.47-53.
7. Вплив мінеральних добавок на властивості цементуючих систем для високофункціональних бетонів / М.А.Саницький, О.Р.Позняк, Б.Г.Русин, І.М.Гев'юк // Вісник НУ «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва.- Львів, 2012.-№737.- С.191-197.
8. Development and Application of ultra high Performance concrete// R.A.Mavlonov, N.R.Nosirjonov //Международный научный журнал «Инновационная наука», 2016.- №5- с.130-132 .
9. Hardened Portland cement pastes of low porosity. V. Compressive strength//Marvin Yudenfreund, Kaissar M.Hanna, JanSkalny, Ivan Older, Stephen Brunauer/*Cement and Concrete Research*. 1972.- Vol.2- issue 6 – pp. 731-743.
10. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges //S.Abbas, M.L. Nehdi, M.A.Saleem// *International Journal of Concrete Structures and materials*, 2016. – vol.10, №3/- pp. 271-295.
11. Bache, H.H. Densified cement/ ultra fine particle based materials. The second International conference on superplasticizers in Concrete. Ottawa, Ontario, Canada June 10 – 12.- 1981.
12. Peter Buitelaar. Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years//Plenary Session International Symposium on UHPC, 2004.- Kassel, Germany, pp.25 .
13. Deeb, R., A. Ghanbari, and B.L. Karihaloo, Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(2): p. 185-190.
14. Ghafari, E., et al. Optimization of UHPC by Adding Nanomaterials// in *Proceedings of Hipermat 2012 – 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*. 2012, Kassel University Press: Kassel, Germany.
15. Vogt, C., Ultrafine particles in concrete, in *School of Architecture and the Built Environment, Division of Concrete Structures*. 2010, KTH: Stockholm.
16. Resplendino, J., Introduction: What is UHPFRC?, in *Designing and building with UHPFRC – State of the Art and Development*, F.Toutlemonde and J. Resplendino, Editors. 2011, ISTE Ltd;: London. p. 3-12.
17. Bache H.H. Model for Strength of Brittle Materials Built up of Particles Joined at points of Contact. *Journal of the American Ceramic Society*.- 1970. Volume 53.- No. 12.
18. Camacho, E., J.Á. López, and P.Serna, Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials, in *Proceedings of Hipermat 2012 – 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials*. 2012, Kassel University Press: Kassel, Germany.
19. Rossi, P., Ultra-High Performance Concretes. *Concrete International*, 2008. 30(02): p. 31-34.
20. Sobolev, K., & Amirjanov, A. (2004). The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies. *Powder Technology*, 141, 155–160.
21. Ghafari, E., Costa, H., Julio, E., Portugal, A., & Duraes, L. (2014a). The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Material and Design*, 59, 1–9.
22. Li, W., Huang, Z., Zu, T., Shi, C., Duan, W., & Shah, S. (2015). Influence of nanolimestone on the hydration, mechanical strength, and autogenous shrinkage of ultrahigh-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 1–9.
23. Huang, Z., & Cao, F. (2012). Effects of nano-materials on the performance of UHPC. *Materials Reviews*, 26(9), 136–141.
24. Пушкарьова К.К., Маломуж В., Гадайчук Д.Р., Каверин К.О. Цементні композиції, модифіковані нанокарбонатними добавками //Conf. Proc. Intern. Scient.-pract. Conf. «Build – master-class -2019», KNUCA, 2019 – p.182-183
25. Falikman, V., Vajner, A., & Zverev, I. (2012). New photocatalytic cementitious composites containing modified titanium dioxide nanoparticles. In *Proceedings of the 3-rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, Germany 2012 – pp. 147–152.
26. Pushkarova K., Gonchar O., Kaverin K. The role of the crystallo-chemical factor in the enalution and improvement of the nanomodification efficiency of mortar and concrete// *Transbud-2019.-vol.708.-012102.-11p.* doi:10.1088/1757-899X/708/1/012102.
27. Пушкарьова К.К., Каверин К.О., Гадайчук Д.Р. Особливості модифікації портландцементу карбонатними добавками різного ступеня диспергації //36. *Наук.праця «Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка»*, №60.- 2019.- Київ.- с.28-33; ISSN 2413-7693.