

/ А. В. Радкевич. – Дніпропетровськ, 2006. – 35 с.

14. **Савйовський В. В.** Методологічні принципи організаційно-технологічного проектування реконструкції цивільних будівель : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук : спец. 05.23.08 «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / В. В. Савйовський – Харків, 2010. – 44 с.

15. Современное высотное строительство : монография / [Айрапетов А. Б., Абрамов А. М., Айрумян Э. Л. и др.]; под ред. Н. М. Щукиной. – М. : ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. – 440 с.

16. **Тугай О. А.** Система адаптації організації будівництва до євростандартів: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук: спец. 05.23.08 «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / О. А. Тугай. – Харків, 2008. – 33 с.

17. **Шаленный В. Т.** Организационно-технологические основы формирования энергосбережения на определяющих этапах жизненного цикла гражданских зданий : дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.08 / Шаленный Василий Тимофеевич. – Днепропетровск, 2004. – 406 с.

18. **Шутенко Л. Н.** Технологические основы формирования и оптимизации жизненного цикла городского жилого фонда : дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.08 / Шутенко Леонид Николаевич. – Харьков, 2002. – 550 с.

УДК 691.545 / 691.328

### **ВЫСОКОПРОЧНЫЙ САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЕБНЯ ФРАКЦИИ 5 – 10**

*А. П. Приходько, д. т. н., проф., Н. В. Шпирько, д. т. н., проф.,*

*Т. В. Ульченко\*, к. т. н., доц., Ю. Г. Берегий, асп., Д. Н. Шпирько, инж.*

*\* Днепропетровский государственный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*

**Ключевые слова:** высокопрочный бетон, самоуплотняющийся бетон, микрокремнезем, активные добавки для бетона, рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия

**Введение.** В настоящее время за рубежом и в Украине широко ведется разработка высококачественных самоуплотняющихся реакционно-порошковых и т. д. бетонов и их внедрению в производство строительных изделий и конструкций. Несмотря на большое содержание в таких бетонах цемента и реакционно-способных микронаполнителей, конструкции из них требуют меньшего расхода материалов и характеризуются высокой прочностью, трещиностойкостью, износостойкостью и морозостойкостью. Конструкции из таких бетонов применяются для ответственных и уникальных сооружений. Изготовление приведенных бетонов и конструкций из них требует высокой производственной культуры и чистых заполнителей. Такие бетоны могут изготавливаться как без крупного заполнителя, так и с ним. В качестве крупного заполнителя применяется щебень фракции 3 – 12 мм, а в качестве мелкого заполнителя – песок с размером частиц до 0,5 – 0,6 мм, при этом для обеспечения текучести содержание в них песка и щебня в сумме значительно меньше, чем в традиционных бетонах, и составляет  $1\ 200 - 1\ 300\ \text{кг/м}^3$ , а цемента и реакционно способных микронаполнителей вместе  $1\ 000 - 1\ 100\ \text{кг/м}^3$ .

**Анализ публикаций.** Вопросами применения высокодисперсных реакционно-активных наполнителей с целью улучшения физико-химических показателей бетонов занимались ряд авторов, в том числе Е. В. Сахошко, Н. М. Зайченко показали, что, применяя пуццоланизирующие добавки совместно с высокоэффективными пластификаторами нового поколения, можно получить высокоэффективные высокопрочные бетоны [1]. О влиянии аморфизованного микрокремнезема на формирование микропористой уплотненной структуры цементного камня посвящены работы Р. Фельдмана [2; 3], где показано, что при введении в состав бетона микрокремнезема происходит сдвиг радиуса пор в область  $50 - 100 \times 10 - 10\ \text{нм}$ . В работе [4] подтверждается влияние пуццолановых заполнителей на структурообразование цементного камня. Утверждается, что пористость в раннем возрасте у таких смесей выше, чем у смесей на обычном портландцементе, но с возрастом пористость уменьшается с тенденцией образования микропористой структуры за счет реакции пуццоланового наполнителя с продуктами гидратации цемента. Снижение проницаемости цементного камня свидетельствует о том, что увеличивается количество замкнутых пор. Делается вывод, что можно управлять

процессом порообразования путем введения микронаполнителей. Вопросом определения плотности упаковки зерен заполнителей занимался исследователь I. Marković, в своей работе [5] он показал модель сжимаемой упаковки, которая достаточно достоверным образом описывает процесс упаковки заполнителей с разным размером зерен.

В течение последних десятилетий микрокремнезем занял уверенное место в качестве высокотехнологичной добавки, которая использовалась в ряде крупных проектов, таких как мост Цин Ма в Гонконге, Саут-Уокер-драйв, 311, в Чикаго, мост Сторебелт в Дании [6].

**Цель статьи.** Путем проведения комплекса физико-механических исследований получить эффективный состав для высокопрочного самоуплотняющегося бетона, пригодного для использования в качестве верхнего слоя двухслойных бетонных полов.

**Материалы и методы.** При разработке бетонных смесей для высокопрочного бетона нами применялся мытый щебень фракции 5 – 10 Любимовского карьера с плотностью зерен  $2,67 \text{ г/см}^3$  и днепровский речной песок с модулем крупности 1,45 и плотностью зерен  $2,62 \text{ г/см}^3$ . Структура самоуплотняющейся смеси и бетона из нее, как правило, «плавающая», т. е. с определенной прослойкой связи из цемента и микронаполнителей между зернами песка и щебня. В качестве микронаполнителей для этих бетонных смесей, в основном, применяется микрокремнезем и мука из молотых горных пород. Так как затраты на помол значительны, то при разработке самоуплотняющейся бетонной смеси для высокопрочного бетона из ее состава нами была исключена мука из горных пород и использован только микрокремнезем, являющийся побочным продуктом Стахановского завода ферросплавов.

Для получения высокой однородности структуры и прочности бетонов необходима плотная упаковка зернового состава заполнителей, поэтому нами вначале определялась наиболее плотная упаковка щебня и песка. Для выявления зависимости плотности упаковки щебня и песка проводили исследование влияния доли песка на плотность смеси заполнителей. Для этого варьировали содержание песка от 0 до 100 % в смеси и щебня от 100 до 0 %. Щебень с песком смешивались в определенных количествах и смесь помещалась в стальной цилиндр диаметром 124 мм, высотой 120 мм, а затем проводилось виброуплотнение с пригрузом. Масса пригруза составляла 3 – 5 кг, время виброуплотнения – 60 секунд.

Удобоукладываемость и прочность высокопрочных бетонов достигается за счет применения цемента, микрокремнезема, суперпластификатора и воды. Для приготовления бетонной смеси использовался портландцемент ПЦ I 500 Балаклевского цементного завода с активностью  $330 \text{ кг/м}^3$ . В качестве суперпластификатора – Sika 20 HE. Для определения оптимального состава бетонной смеси применялось планирование эксперимента на симплексе. Варьировали расход цемента, смешанного заполнителя при отношении щебень / песок = 1,5 и микрокремнезема при постоянном расходе воды 190 л и суперпластификатора 12 кг. Цемент варьировался в пределах 600 – 800 кг, микрокремнезем от 0 до 200 кг, смешанный заполнитель  $1\ 437 - 1\ 637 \text{ кг/м}^3$ .

**Результаты и их обсуждение.** Проведенные исследования по определению плотности упаковки зерен песка показали, что масса пригруза и время виброуплотнения не оказывают влияния на характер зависимости плотности упаковки смеси заполнителей от количества песка. При этом плотность упаковки повышается с увеличением пригруза и наибольшая плотность упаковки достигается при 40 % содержании песка (рис. 1).

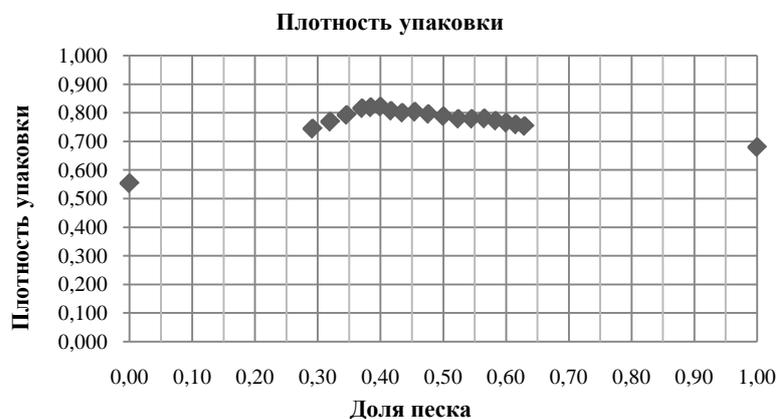


Рис. 1. Диаграмма плотности упаковки

По результатам эксперимента по определению оптимального состава бетонной смеси была получена математическая модель, описанная полиномом третьей степени,

$$\bar{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3,$$

$$\beta_1 = Y_1; \beta_2 = Y_2; \beta_3 = Y_3;$$

где:

$$\beta_{12} = 4Y_{12} - 2Y_1 - 2Y_2; \beta_{13} = 4Y_{13} - 2Y_1 - 2Y_3; \beta_{23} = 4Y_{23} - 2Y_2 - 2Y_3;$$

$$\beta_{123} = 27Y_{123} - 12(Y_{12} + Y_{13} + Y_{23}) + 3(Y_1 + Y_2 + Y_3),$$

которая адекватно отображает экспериментальные результаты.

По математической модели построена диаграмма «Состав бетонной смеси – прочность», приведенная на рисунке 2.

Наибольшая прочность бетона, более 90,63 МПа, достигается при содержании смешанного заполнителя 1 435 кг, цемента 600 кг/м<sup>3</sup> и микрокремнезема 150 кг. Таким образом, при использовании цемента активностью 330 кг прочность бетона по сравнению с прочностью цемента была повышена в 2,74 раза, что достигнуто за счет применения смешанного вяжущего и суперпластифицирующей добавки.

Данная бетонная смесь соответствовала подвижности S5 по осадке конуса, F4 по расплыву конуса, а бетон из нее соответствовал классу прочности C70/85 (ДСТУ БВ.2.7-176:2008).

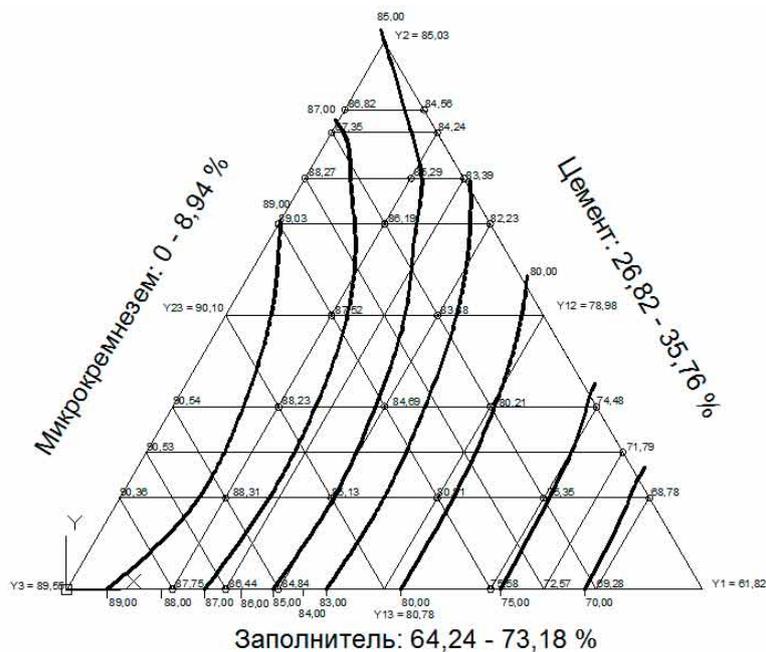


Рис. 2. Состав бетонной смеси – прочность

Анализ диаграммы «состав – прочность» показывает, что с увеличением содержания цемента и микрокремнезема, а также в результате действия суперпластифицирующей добавки прочность бетона увеличивается. Для объяснения данного явления нами было проведено исследование фазового состава вяжущего рентгенофазовым, термическим и электронно-микроскопическим анализами. Для проведения рентгенофазового и термического анализов образцы бетона раскалывались и производилось отделение вяжущего от заполнителей путем соскабливания с последующим растиранием в порошок. Для проведения электронно-микроскопического исследования образцы бетона раскалывались на мелкие кусочки, которые подвергались электронномикроскопическому исследованию.

Дифрактограмма вяжущего из цемента представлена на рисунке 3, а дифрактограмма смешанного вяжущего с микрокремнеземом оптимального состава – на рисунке 4.

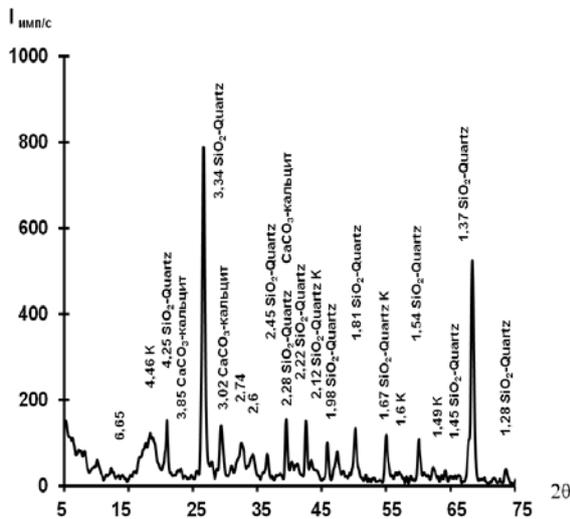


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма цементного камня оптимального состава из цемента ПЦ I 500 и воды

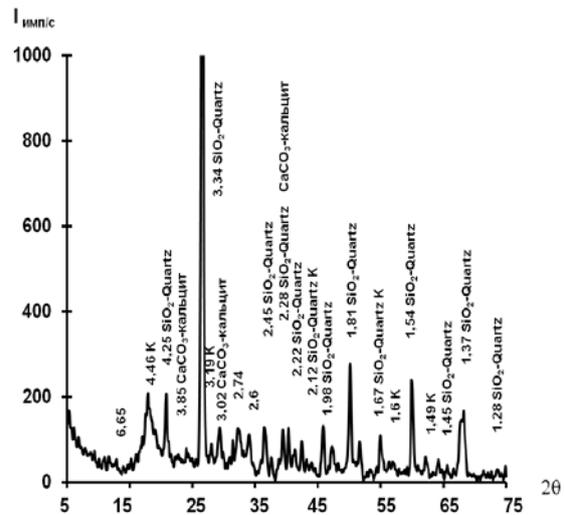


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма цементного камня оптимального состава из цемента ПЦ I 500, микрокремнезема и воды

Термограммы цементного камня из цемента и воды представлены на рисунке 5, а цементного камня оптимального состава из цемента, микрокремнезема и воды – на рисунке 6.

Рентгенофазовым анализом выявлено, что, как в бетоне с цементным камнем только из цемента, так и в бетоне с цементным камнем из цемента и микрокремнезема присутствует  $C - S - H - I$  ( $d = 1,262$  нм,  $0,303$  нм,  $0,307$  нм,  $0,2788$  нм,  $1,81$  нм). Из большей интенсивности относительного максимума с  $d = 1,262$  (являющегося характерным для  $C - S - H - I$ ) у вяжущего, содержащего микрокремнезем, следует, что в цементном камне, включающем цемент и микрокремнезем, содержится больше  $C - S - H - I$ .

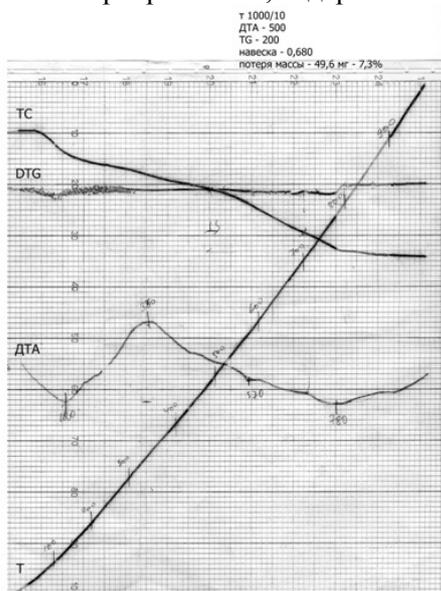


Рис. 5. Термограммы цементного камня из цемента и воды

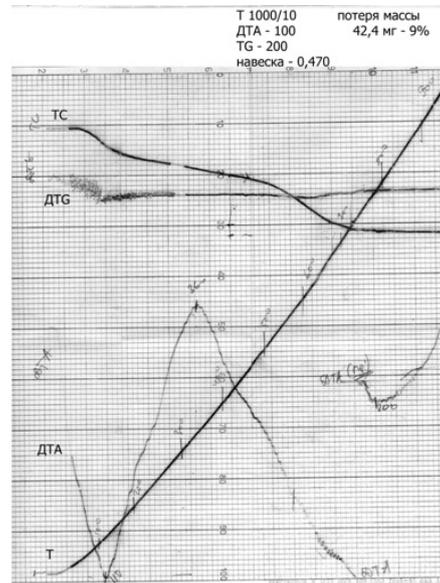


Рис. 6. Термограммы цементного камня оптимального состава из цемента, микрокремнезема и воды

В цементном камне как из цемента, так и из смешанного вяжущего, присутствует  $Ca(OH)_2$  ( $d = 0,493$  нм,  $0,263$  нм,  $0,193$  нм). Исходя из интенсивности дифракционных максимумов ( $d = 0,263$  нм), в цементном камне, содержащем микрокремнезем,  $Ca(OH)_2$  присутствует в меньшем количестве. В цементном камне также присутствует  $CaCO_3$  ( $d = 0,303$  нм,  $0,208$  нм,  $0,191$  нм). Однако из-за накладывающихся дифракционных максимумов с  $d = 0,303$  нм, принадлежащих как  $3CaO \cdot SiO_2$ , так и  $CaCO_3$ , оценить их содержание в цементном камне бетона невозможно. Поэтому содержание  $CaCO_3$  определяли по термогравиметрической кривой.

В цементном камне также содержится трехкальциевый силикат ( $d = 0,303$  нм,  $0,278$  нм,  $0,218$  нм,  $0,187$  нм,  $0,175$  нм) и двукальциевый силикат ( $d = 0,278$  нм,  $0,274$  нм,  $0,261$  нм,  $0,218$  нм). В камне из смешанного вяжущего не содержится  $C_3S$ , а остаток  $C_2S$  меньше, что определено по более интенсивному максимуму ( $d = 0,274$  нм) в цементном камне, не содержащем микрокремнезем. На рентгенограммах цементного камня, приведенных на рисунках 3 и 4, присутствуют дифракционные максимумы, принадлежащие кварцу  $SiO_2$ . Это связано с тем, что при подготовке образцов вяжущих в них попали частицы песка.

По приведенным на рисунках 5 и 6 термограммам цементного камня, не содержащего и содержащего микрокремнезем, определено, что как в камне, содержащем микрокремнезем, так и без него присутствуют:

- гель гидросиликатов кальция, определенный по эндоэффекту при  $110$  и  $120^\circ C$  и потере массы в интервале  $100 - 200^\circ C$ ;
- $Ca(OH)_2$ , определенный на кривых ДТА по эндоэффекту при температуре  $500^\circ C$  и потере массы в интервале  $490 - 550^\circ C$ ;
- $CaCO_3$ , определенный по эндоэффектам при температурах  $780$  и  $800^\circ C$  и потере массы в интервале  $780 - 890^\circ C$ .

В результате обработки термогравиметрических кривых определено, что в цементном камне, не содержащем микрокремнезем, присутствует  $10\%$   $Ca(OH)_2$ , а в цементном камне, содержащем цемент и микрокремнезем, содержится  $6\%$   $Ca(OH)_2$ . В цементном камне, содержащем микрокремнезем, присутствует меньшее количество  $CaCO_3$ , чем в цементном камне, не содержащем микрокремнезем, что приводит к меньшей усадке.

Микроструктура цементного камня из смешанного вяжущего приведена на рисунках 7, 8.

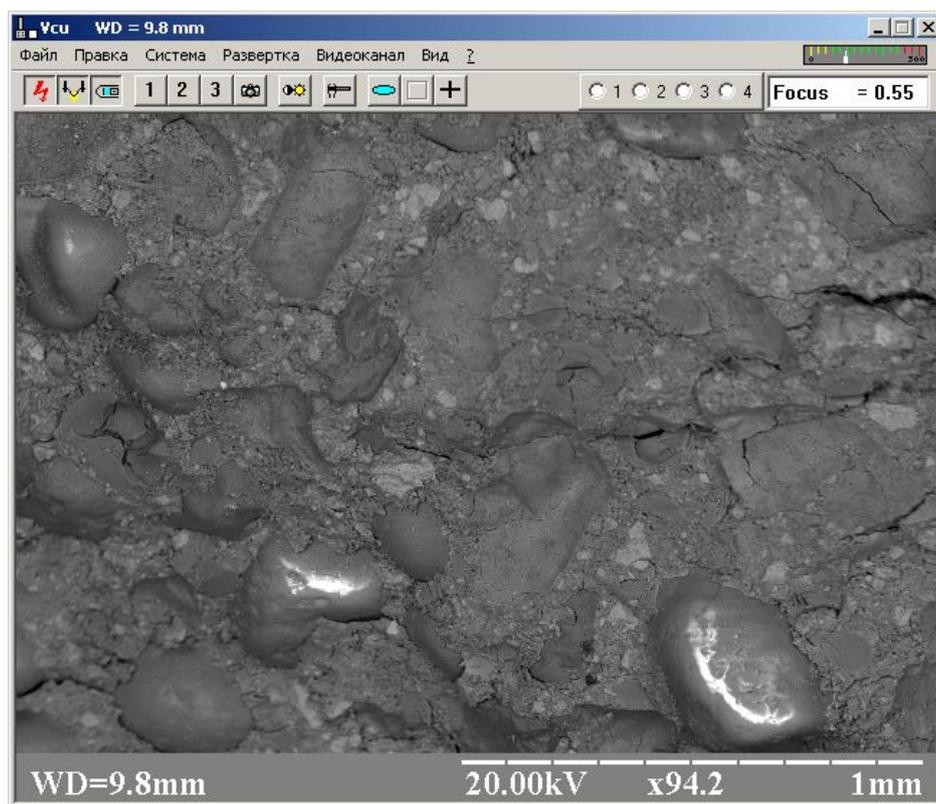


Рис. 7. Мезоструктура бетона, длина масштабной полоски 1 мм

На рисунке 7 видно, что мезоструктура бетона представлена зернами песка, непрореагировавшего цемента, гидросиликатами кальция и имеет трещины, образовавшиеся в результате микропластической усадки шириной  $1,5$  мкм. На рисунке 8 приведена микроструктура цементного камня, представленная гидросиликатами кальция.

Несмотря на то, что цементный камень имеет трещиноватую микроструктуру, достигнута повышенная прочность бетона. С целью повышения трещиностойкости цементного камня следует ввести в бетонную смесь стальную микрофибру.

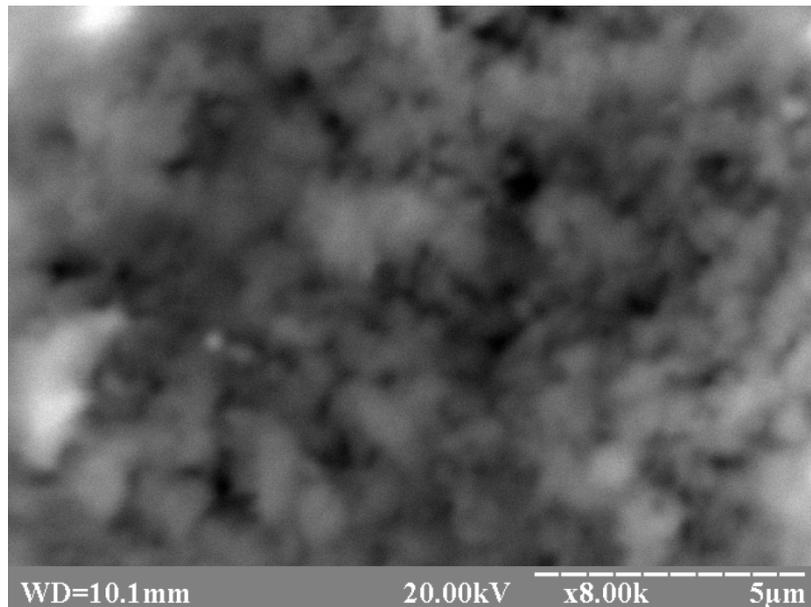


Рис. 8. Микроструктура цементного камня, длина масштабной полоски 5 мкм

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенных исследований разработан высокопрочный самоуплотняющийся бетон, содержащий крупный заполнитель фракции 5 – 10, который может быть применен в качестве верхнего слоя двухслойных бетонных полов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сахошко Е. В., Зайченко Н. М. Самоуплотняющийся бетон в современном монолитном домостроении // Вісник Донбас. держ. акад. будівниц. і архітект.: Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка, 2009. – Вип. 1 (75). – С. 112 – 116.
2. Feldman R. F. Influence of Condensed Silica Fume and Sand/Cement Ratio on Pore Structure and Frost Resistance of Portland Cement Mortar / reprinted from «Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Poulans in Concrete» Proceedings Second International Conference Madrid, Spain, 1986, ACI, SP – 91 – 47.– Vol. 2. – P. 973 – 989 (IRC Paper No. 1397).
3. Feldman R. F. Pore Structure, Permeability and Diffusivity as Related to Durability / 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil, September 22 – 27, 1986. – P. 1 – 21.
4. Guang Ye, Klaas van Breugel. Simulation of connectivity of capillary porosity in hardening cement-based systems made of blended materials / HERON, 2009. – Vol. 54. – № 2/3. – P. 163 – 184.
5. I. Markovic. High-Performance Hybrid-Fiber Concrete – Development and Utilisation. DUP Science. The Netherlands. 2006. ISBN 90 – 407 – 2621 – 3
6. Coppola L., Cerulli T., Troli R. and Collepari M. «The Influence of Raw Materials on Performance of Reactive Powder Concrete», International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianopolis, 1996. – P. 502 – 513.

УДК 539.3

#### ВАРИАНТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ИТЕРАЦИОННОЙ ТЕОРИИ СЛОИСТЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

*А. В. Плеханов, д. т. н., проф.*

**Ключевые слова:** пологая оболочка, итерационная теория, уравнения

**Анализ исследований. Цель работы.** В работе [1], используя для реализации вариационного уравнения Рейсснера метод варьирования по определяемому состоянию, получили двумерные уравнения итерационной теории слоистых пологих оболочек. Как показали исследования [3], сходимость решений на основе этих уравнений ухудшается при