

Мясникова А.А.

ВЛИЯНИЕ МЕТАКАОЛИНА НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СТРУКТУРУ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Актуальной задачей современного строительного производства является ускорение его темпов с одновременным повышением качества и долговечности строительных материалов и конструкций на их основе. К материалам, позволяющим обеспечить высокое качество и долговечность, с одновременным снижением экономических затрат, относят быстротвердеющие, высокопрочные тяжелые бетоны с низкой проницаемостью, стойкие к агрессивному воздействию внешней среды.

Создать такого рода бетоны возможно несколькими методами, наиболее оптимальным из которых является применение комплексных добавок. Метакаолин и микрокремнезем являются активными минеральными добавками, имеющими не только гидравлическую, но и пуццолановую активность. Соответственно применение данных добавок позволит не только ускорить твердение, но и повысить класс и стойкость бетона к агрессивному воздействию внешней среды. Кроме того, введение активных минеральных добавок позволяет снизить проницаемость бетона, что приведет к повышению его долговечности.

В работе представлены исследования по оценке влияния комплексных добавок, включающих метакаолин, микрокремнезем и суперпластификатор на формирование фазового состава и структуры цементного камня.

Исследовано изменение структуры модифицированного цементного камня и установлены зависимости. Проведена сравнительная характеристика двух комплексных добавок для оценки влияния метакаолина на изменение фазового состава цементного камня. Исследована возможность получения высокофункциональных тяжелых бетонов, имеющих низкую пористость, высокую раннюю и марочную прочность, долговечность, путем применения добавок-ускорителей и модификаторов структуры.

Установлено, что применение метакаолина приводит к формированию структуры цементного камня, преимущественно состоящей из метастабильных гидроксидов кальция. Для создания плотной структуры цементного камня с низкой капиллярной пористостью из стабильных низкоосновных слабозакристаллизованных гидратных фаз, стабильных при изменении pH среды, необходимо совместное применение метакаолина с микрокремнеземом и суперпластификатором.

Ключевые слова: метакаолин, микрокремнезем, цементный камень, активные минеральные добавки, строительные материалы, фазообразование.

Myasnikova A.A.

EFFECT OF METAKAOLIN ON THE PHASE FORMATION AND STRUCTURE OF CEMENT STONE

The urgent task of modern construction production is to accelerate its pace while improving the quality and durability of building materials and structures based on them. The materials that allow to ensure high quality and durability, while reducing economic costs, include fast-hardening, high-strength heavy concretes with low permeability, resistant to aggressive environmental influences.

To create this kind of concrete is possible by several methods, the most optimal of which is the use of complex additives. Metakaolin and silica fume are active mineral supplements that have not only hydraulic, but also pozzolan activity. Accordingly, the use of these additives will not only accelerate hardening, but also increase the class and resistance of concrete to the aggressive effects of the external environment. In addition, the introduction of active mineral additives can reduce the permeability of concrete, which will lead to an increase in its durability.

The paper presents studies to assess the effect of complex additives, including metakaolin, silica fume and superplasticizer on the formation of the phase composition and structure of cement stone.

The change in the structure of the modified cement stone was investigated and the dependencies were established. A comparative characteristic of two complex additives was carried out to assess the effect of metakaolin on the change in the phase composition of cement stone. The possibility of obtaining highly functional heavy concretes with low porosity, high early and brand strength, durability, through the use of accelerator additives and structure modifiers has been studied.

It has been established that the use of metakaolin leads to the formation of the structure of cement stone, mainly consisting of metastable calcium hydroaluminates. To create a dense structure of cement stone with low capillary porosity from stable low-base weakly crystallized hydrate phases that are stable when the pH of the medium changes, it is necessary to combine the use of metakaolin with silica fume and superplasticizer.

Keywords: *metakaolin, silica fume, cement stone, active mineral additives, building materials, phase formation.*

В настоящее время стандартами России и европейскими нормами активные минеральные добавки (АМД) подразделяют на природные и техногенные, с пуццолановыми или гидравлическими свойствами. В технологии бетона широко применяют комплексные добавки, включающие АМД преимущественно техногенного происхождения, такие как металлургические шлаки, микрокремнезем и др. Однако, характеристики таких добавок, как побочных продуктов промышленности, напрямую зависят от технологии основного производства и не отличаются стабильностью. Для стабилизации свойств и расширения области применения добавок в технологии строительных материалов все чаще используют специально полученные АМД, среди которых особый интерес вызывает метаксаолин [1].

Метаксаолин в соответствии с требованиями EN и ASTM является пуццолановой добавкой, образованной в результате реакции дегидратации каолиновых глин [2,3]. Поскольку метаксаолин имеет аморфную структуру и слабую связь между ионами, можно предположить, что в присутствии воды он в равной степени может как подвергаться диссоциации на алюминатную и силикатную части, так и восстанавливать решетку с присоединением различных элементов.

Согласно исследованиям, основными про-

дуктами протекания пуццолановой реакции клинкерных минералов цемента, в присутствии метаксаолина, могут быть гидроалюминаты и гидросиликаты кальция разной основности и переменного состава, такие как C_2AH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_n , а также гидроалюмосиликаты типа гидрогеленита C_2ASH_8 [3-6].

Гидратация и формирование фазового состава цементного камня, модифицированного метаксаолином, будет в большей степени определяться условиями протекания реакции и в первую очередь концентрацией ионов кальция в жидкой фазе, а также качеством исходного сырья и технологией изготовления метаксаолина [7-13].

Поскольку метаксаолин является алюмосиликатом, то совместно с $nSiO_2$ мы вводим в цемент и nAl_2O_3 , содержание которого строго ограничивают для бетонов с высокими показателями долговечности. Следовательно, дозировку метаксаолина необходимо ограничивать и вводить его совместно с микрокремнеземом для подкисления среды и искусственного создания дефицита ионов кальция. Кроме этого, метаксаолин является мелкодисперсной добавкой, которая обладает повышенной водопотребностью, вследствие чего ее необходимо использовать совместно с водоредуцирующими добавками [14-19].

Таким образом, целью настоящего исследе-

дования является анализ изменения фазообразования и структуры цементного камня, модифицированного комплексными добавками, выявление закономерностей формирования гидратных фаз в присутствии метакрилатов, для оценки возможности использования добавки в производстве высокоэффективных бетонов.

В работе применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства Dyckerhoff соответствующего требованиям ГОСТ 31108-2003, метакрилат (МТК) производства ЗАО «Пласт-Рифей», ТУ 572909551460677.2009 (дозировка 2,5% и 5% от массы цемента); гранулированный микрокремнезем производства г. Новокузнецк Кемеровской обл. (МК), ТУ 574304802495332.96 (дозировка 5%). В качестве пластифицирующей добавки приняли суперпластификатор СП-1 производства г. Новомосковск, в дозировке 0,6% от массы вяжущего.

Исследования проводились с применением стандартных методов исследования и

использованием необходимого количества образцов одной серии, для обеспечения достоверной вероятности не менее 0,95, на поверенном оборудовании в аттестованной лаборатории. Кинетику прочности цементного камня оценивали по ГОСТ 10180 – 2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам», на цементном камне (2x2x-2см). Образцы твердели при температуре $20 \pm 50^{\circ}\text{C}$ и влажности 95-100% (нормальные условия). Для исследований фазового состава цементного камня применяли дифференциально-термический анализ (ДТА) с помощью дериватографа системы «LuxxSTA 409» фирмы «Netsch», рентгенофазовый анализ (РФА) на дифрактометре ДРОН-3, модернизированном приставкой PDWin и растровый электронный микроскоп фирмы Jeol Interactive Corporation, Japan JSM-700 1F [20].

Результаты исследования влияния добавок на кинетику прочности цементного камня представлены на рисунке 1.

Образцы модифицированного цементно-

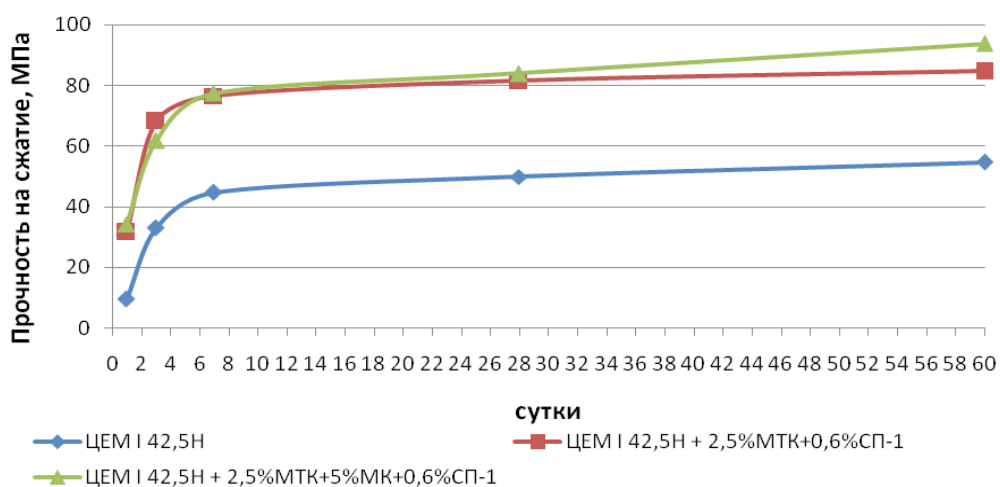


Рис. 1. Влияние добавок на прочность цементного камня

го камня показали повышение прочности на 2 сутки в два раза по сравнению с контрольными, и составили около 80% от марочной, без добавочного состава (рис.1).

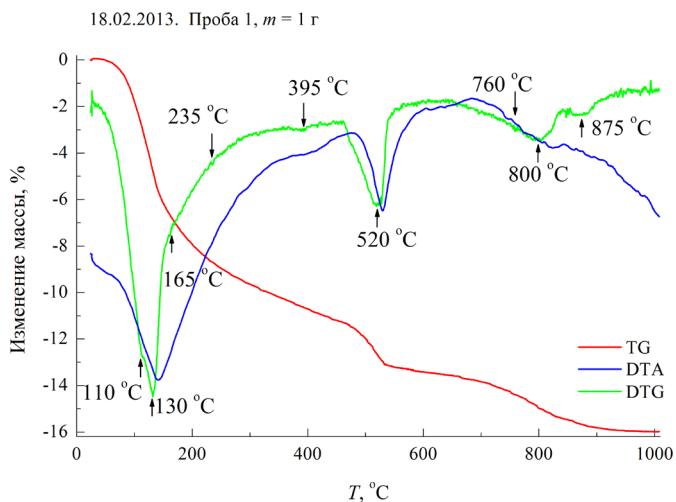
На 28 суток твердения прочность цементного камня при введении комплексных добавок выше на 30% по сравнению с марочной прочностью без добавочного состава (рис.1).

Согласно данным ДТА введение МТК совместно с СП-1 на 28 суток твердения способствует формированию структуры цементного камня с повышенным до 18,5% содержанием общей химически связанной воды (рис.2). Это, прежде всего, связано с формированием высокоосновных высоководных гидроалюминатов кальция. Дополнительное введение

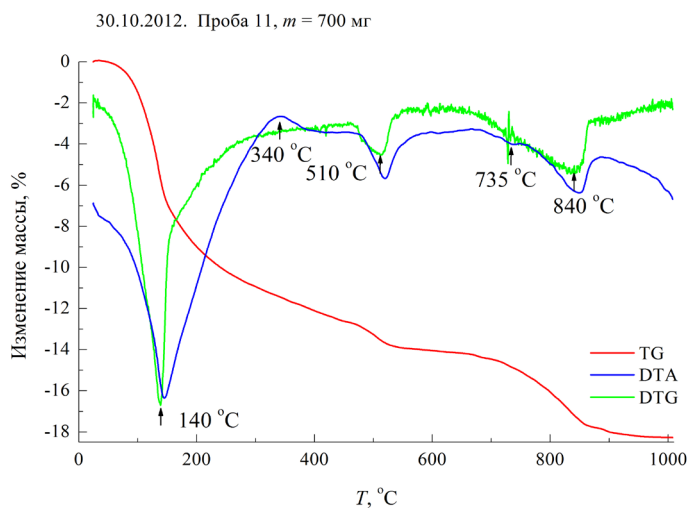
микрокремнезема в комплекс, приводит к снижению общей химически связанной воды до 14%, что, вероятно, связано с образованием низководных гидратных соединений и подтверждается ранее проведенными исследованиями [7, 20-25].

Применение комплекса «2,5%МТК+0,6%СП-1» приводит к снижению содержания гидроксида кальция в структуре цементного камня до 50% по сравнению с бездобавочным составом (рис.2).

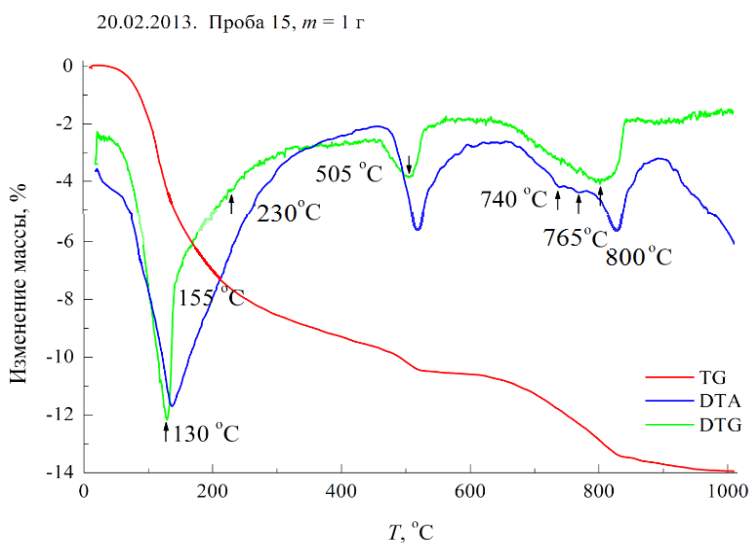
Дополнительное снижение содержания гидроксида кальция с применением комплексов «2,5%МТК+5%МК+0,6%СП-1» до 70 % обусловлено высокой пуццолановой активностью добавок.



а) без добавок



б) с «2,5%МТК+0,6%СП-1»



в) с «2,5%МТК+5%МК+0,6%СП-1»

Рис. 2. ДТА цементного камня на 28 суток твердения

На дериватограммах цементного камня с добавками и без них, к 28 суткам тверде-

ния были зафиксированы эндоэффекты при 110-140° и 670-770°С соответствующие деги-

дратации высокоосновных гидросиликатов кальция (ГСК), что подтверждается наличием пиков соответствующих С-S-H (II) фазе на РФА ($d/n=9,8;3,07;2,8;2,0;1,83\text{Å}$).

Эндоэффект при 140-160°C соответствует потере воды низкоосновных ГСК, а экзоэффект 800-905°C указывает на их кристаллизацию в волластонит, С-S-H (I) ($d/n=3,07;2,81;1,83\text{Å}$). Кроме этого, все дериватограммы имели эндоэффект при 480-510°C, который относится к разложению гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=4,9;2,63;1,93;1,79;1,69;1,49\text{Å}$), (рис. 2). С применением добавки «2,5%МТК+0,6%СП-1» в цементном камне преобладают высокоосновные ГСК и стабильные, закристаллизованные гидроалюминаты кубической сингонии типа СЗАН6, потери при 340°C, эндоэффект при 490°C $d/n = 5,01;4,4;3,37;2,82;2,23;2,07;1,68\text{Å}$, с включениями низкоосновных ГСК типа С-S-H(I) и СЗС6Н6, эндоэффект при 735, 840°C (рис.2.6).

Введение в комплекс «2,5%МТК+0,6%СП-1»

5% МК приводит к изменению фазового состава цементного камня, с формированием структуры в основном из низкоосновных ГСК (экзоэффекты при 800-900°C), формированию гидроалюминатов кальция типа СЗАН6 (эндоэффект при 490°C) и САН10 (эндоэффект при 490°C, $d/n=7,16;3,72;3,56;3,27;2,88;2,69;2,55;1,94;1,64\text{Å}$), гидрогранатов типа C_3ASH_4 и $\text{C}_3\text{AS}_2\text{H}_2$ (эндоэффект при 490°C, $d/n=2,8;2,72\text{Å}$), которые в дальнейшем, с изменением щелочности среды, не подвергаются процессам перекристаллизации и способствуют повышению прочности камня (рис.2,в). Удлинение и повышение фона в области малых углов и снижение интенсивности пиков кристаллических фаз на дериватограммах свидетельствует об аморфизации структуры цементного камня, что подтверждается на рентгенограммах повышенным фоном в области малых углов и снижением интенсивности пиков кристаллических фаз [20].

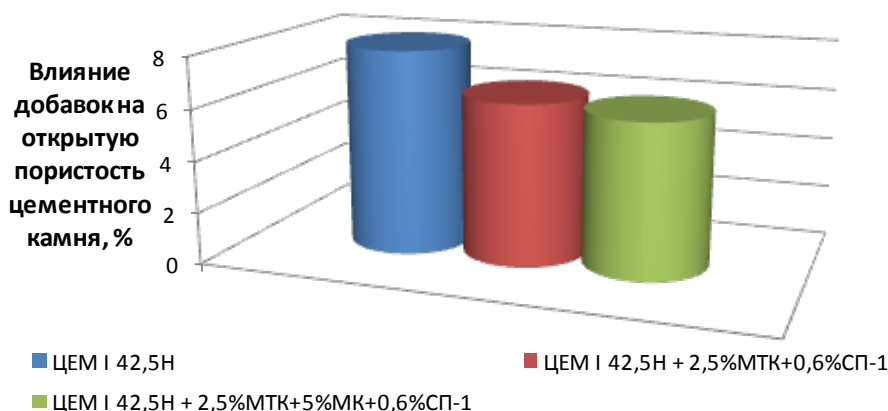


Рис. 3. Влияние добавок на открытую пористость цементного камня, %
($\Gamma_{расч} = 1,29 < \Gamma_{табл} = 3,0$)

Для исследования структуры формирующегося цементного камня, степени и характера ее закристаллизованности, определяли открытую пористость и проводили исследование с помощью электронной растровой микроскопии. Зависимости влияния добавок на изменение открытой пористости цементного камня в возрасте 28 суток представлены на рис.3.

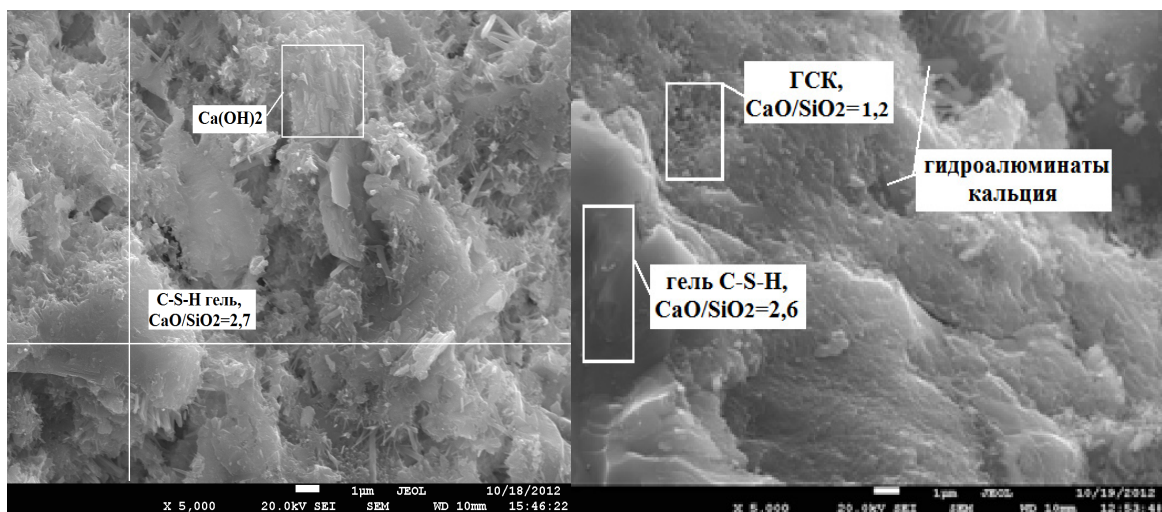
Введение комплексных добавок снижает открытую пористость на 75-78% по сравнению с контрольными образцами бездобавочного цементного камня, что говорит о создании уплотненной структуры и более полном протекании процессов гидратации.

Исследование методом электронной растровой микроскопии и проведение локального химического анализа подтвердили результаты, полученные ранее с помощью ДТА и РФА. Образцы цементного камня без

применения добавок имеют неоднородную структуру, на поверхности скола обнаружены: гидроксид кальция, слабозакристаллизованные высокоосновные ГСК с отношением $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2...2,90$ и аморфная фаза (рис.4,а).

Введение «2,5%МТК+0,6%СП-1» и «2,5%МТК+5%МК+0,6%СП-1» способствует формированию более равномерной и плотной, с занозистым изломом структуры цементного камня, которая предпочтительно включает ГСК и гидроалюминаты разной основности и степени закристаллизованности (рис.4).

Применение комплекса, включающего МК приводит к формированию структуры цементного камня, преимущественно состоящей из гидросиликатов кальция пониженной основности $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2...1,5$. Мелкокристаллический портландит обнаруживает



А) Без добавок
 Б) с «2,5%МТК+5%МК+0,6%СП-1»
 Рис. 4. Микрофотография скола цементного камня в возрасте 28 суток, увеличение $\times 5000$

ся только в замкнутых порах, что говорит о его кристаллизации уже после формирования основной структуры цементного камня (рис. 4,б).

Заключение

Таким образом, для получения высокофункциональных долговечных цементных материалов необходимо направленное формирование плотной, самозащищающейся структуры цементного камня с низкой капиллярной пористостью из стабильных низкоосновных слабозакристаллизованных гидратных фаз и локальной концентрацией

гидроксида кальция в замкнутом поровом пространстве, необходимого для поддержания стабильной рН среды. Добиться такого эффекта возможно только за счет совместного применения метакАОлина с микрокремнеземом и суперпластификатором.

Применение комплексных добавок, включающих метакАОлин и суперпластификатор возможно только для повышения скорости твердения цементного камня, поскольку без искусственного подкисления среды будут формироваться метастабильные алюминаты, склонные к процессам перекристаллизации.

Литература

1. Крамар, Л.Я. Модификаторы цементных бетонов и растворов (Технические характеристики и механизм действия) [Текст] / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий, Т.Н. Черных, В.В. Зимич. – Челябинск: ООО «ИскраПрофи», 2012. – 202 с.
2. Михайлюта, Е.С. Особенности формирования фазового состава метакАОлинов и его влияние на их свойства [Текст] / Е.С. Михайлюта, Е.В. Алексеев, В.В. Коледа, Т.А. Шевченко // Цемент и его применение – № 5, 2012. – С. 66-72.
3. Глекель, Ф.Л. Физико-химические основы применения минеральных добавок [Текст] / Ф.Л. Глекель. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1975. – 198 с.
4. Дворкин, Л.И. МетакАОлин в строительных растворах и бетонах [Текст] / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Издательство КНУБиА, 2007. – 215с.
5. Dubey A., Banthia N. Influence of High Reactivity Metakaolin and Silica Fume on the Flexural Toughness of High Performance Steel Fiber – Reinforced Concrete // ACI Materials Journal. 1998. № 3. P. 284.
6. EN 206-1:2000 DIN EN 206-1 Norm, 2001-07. Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.
7. EN 206-1:2000 DIN EN 206-1 Norm, 2001-07. Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.
7. Крамар, Л.Я. Оптимизация структуры и свойств цементного камня и бетона введением тонкодисперсной добавки аморфного кремнезема: Автореферат дисс. на иск. уч. степ. к.т.н. [Текст] / Л.Я. Крамар. – М., 1989. – 17 с.
8. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1979. – 476с.
9. Сулименко, Л.М. Механохимическая активация вяжущих композиций [Текст]

- / Л.М. Сулименко, Н.И. Шалуненко, Л.А. Урханова // Изв. вузов. Строительство. – 1995. – № 11. – С. 63 – 68.
10. ГОСТ 24640 Добавки для цементов. Классификация [Текст]. – Введ. 1991-07-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2010. – 3с.
11. Кузнецова, Т.В. Активные минеральные добавки и их применение [Текст] / Т.В. Кузнецова, З.Б. Энтин, Б.С. Альбец, Л.Я. Гольдштейн, Н.В. Соколова, Е.Т. Яшина. – М.: Цемент, 1981. – №10. – С. 6-8.
12. Swamy, R. N. Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali-silica reaction / R. N. Swamy // The alkali-silica reaction in concrete. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd, 1992. - P. 144 - 170.
13. Горшков, В.С. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: Справ. Пособие [Текст] / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.
14. Михайлов Н.В., Ребиндер П. А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем [Текст] // Коллоидный журнал, 1955. – Т.17. – С.107
15. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1989. – 383с.
16. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии [Текст]. М.: Стандартинформ. – 2018. – 50 с.
17. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [Текст]. М.: Стандартинформ. – 2017. – 110 с.
18. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжёлые и мелкозернистые. Технические условия [Текст]. М.: Стандартинформ. – 2017. – 12 с.
19. Рояк С.М., Специальные цементы [Текст] / С.М. Рояк, Г.С. Рояк/ М.: Стройиздат. – 1983. – 279 с.
20. Горшков В.С, Методы физико-механического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев / Учеб. Пособие. – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.
21. Рамачандран В.С., Добавки в бетон. Справочное пособие [Текст] / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.И. Колепарди и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
22. Кривобородов Ю.Р. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров [Текст] / Ю.Р. Кривобородов, С.В. Самченко // Аналитический обзор ВНИИЭСМ. – М.: 1991. – Серия 1. Цементная промышленность. – 55 с.
23. Косухин, М.М. Регулирование свойств бетонных смесей и бетонов комплексными добавками с разными гидрофильными группами [Текст] / М.М. Косухин. – Белгород: Изд-во БГТУ им В.Г. Шухова, 2005. – 194 с.
24. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов [Текст] / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 343 с.
25. Швите, Г.Е. Гидроалюминаты и гидроферриты кальция [Текст] / Г.Е. Швите, У. Людвиг // Пятый международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 139-152.

References

1. Kramar, L.Y. Modifiers of cement concretes and mortars (Technical characteristics and mechanism of action) [Text] / L.Y. Kramar, B.Y. Trofimov, E.A. Gamaliy, T.N. Chernykh, V.V. Zimic. – Chelyabinsk: ООО «IskraProfi», 2012. – 202 p.
2. Mikhailyuta, E.S. Features of the formation of the phase composition of metakaolins and its influence on their properties [Text] / E.S. Mikhailyuta, E.V. Alekseev, V.V. Koleda, T.A. Shevchenko // Cement and its application – No 5, 2012. – P. 66-72.
3. Glekel, F.L. Physico-chemical foundations of the application of mineral additives [Text] / F.L. Glekel. – Tashkent: Izd-vo «FAN», 1975. – 198 p.
4. Dvorkin, L.I. Metakaolin in building mortars and concretes [Text] / L.I. Dvorkin, N.V. Lushnikova, R.F. Runova et al. – Kiev: Izdatelstvo KNUBiA, 2007. – 215 p.
5. Dubey A., Banthia N. Influence of High Reactivity Metakaolin and Silica Fume on the Flexural Toughness of High Performance Steel Fiber – Reinforced Concrete// ACI Materials Journal. 1998. № 3. p. 284.
6. EN 206-1:2000 DIN EN 206-1 Norm, 2001-07. Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.

- EN 206-1:2000 DIN EN 206-1 Norm, 2001-07. Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.
7. Kramar, L.Y. Optimization of the structure and properties of cement stone and concrete by the introduction of a finely dispersed additive of amorphous silica: Abstract diss. to the soicle. uch. step. Ph.D. [Text] / L.Y. Kramar. – M., 1989. – 17 p.
 8. Volzhenskii, A.V. Mineralnye vyazhnye filiya [Text] / A.V. Volzhenskii. – M.: Stroyizdat, 1979. – 476 p.
 9. Sulimenko, L.M. Mechanochemical activation of astringent compositions [Text] / L.M. Sulimenko, N.I. Shalunenko, L.A. Urkhanova // Izv. Universities. Construction. –1995. – № 11. – P. 63 – 68.
 10. GOST 24640 Additives for cements. Classification [Text]. - Introduced. 1991-07-01. – M.: Gosstandart Rossii: Izd-vo standartov, 2010. – 3 p.
 11. Kuznetsova, T.V. Active mineral additives and their application [Text] / T.V. Kuznetsova, Z.B. Entin, B.S. Albets, L.Y. Goldstein, N.V. Sokolova, E.T. Yashina. – M.: Cement, 1981. – №10. pp. 6-8.
 12. Swamy, R. N. Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to al-kali-silica reaction / R. N. Swamy // The alkali-silica reaction in concrete. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd, 1992. - P. 144 - 170.
 13. Gorshkov, V.S. Binders, ceramics and glass-crystalline materials: Structure and properties: Sprav. Posobie [Text] / V.S. Gorshkov, V.G. Savelyev, A.V. Abakumov. – M.: Stroyizdat, 1994. – 584 p.
 14. Mikhailov N.V., Rebinder P. A. O struktorno-mechanicheskikh properties dispersed and vysokoemolekularnykh sistemy [Text] // Kolloidnyy zhurnal, 1955. – V.17. p.107
 15. Kuznetsova, T.V. Physical chemistry of astringent materials [Text] / T.V. Kuznetsova, I.V. Kudryashov, V.V. Timashev. – M.: Vysshaya shkola, 1989. – 383 p.
 16. GOST 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion [Text]. M.: Standartinform. – 2018. – 50 p.
 17. SP 28.13330.2017. Protection of building structures from corrosion. Updated version of SNiP 2.03.11-85 [Text]. M.: Standartinform. – 2017. – 110 p.
 18. GOST 26633-2015. Concretes are heavy and fine-grained. Specifications [Text]. M.: Standartinform. – 2017. – 12 p.
 19. Royak S.M., Special cements [Text] / S.M. Royak, G.S. Royak / M.: Stroyizdat. – 1983. – 279 p.
 20. Gorshkov V.S., Methods of physico-mechanical analysis of binders [Text] / V.S. Gorshkov, V.V. Timashev, V.G. Savelyev / Ucheb. Allowance. – M.: Vyssh. shkola, 1981. – 335 p.
 21. Ramachandran V.S., Additives to concrete. Reference manual [Text] / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, M.I. Kolepari et al. – M.: Stroyizdat, 1988. – 575 p.
 22. Krivoborodov Yu.R. Physico-chemical properties of sulfated clinkers [Text] / Yu.R. Krivoborodov, S.V. Samchenko // Analitsitskii obzor VNIIESM. – M.: 1991. - Episode 1. Cement industry. – 55 p.
 23. Kosukhin, M.M. Regulation of the properties of concrete mixtures and concretes with complex additives with different hydrophilic groups [Text] / M.M. Kosukhin. – Belgorod: Izd-vo BSTU im V.G. Shukhova, 2005. – 194 p.
 24. Sheikin, A.E. Structure and properties of cement concretes [Text] / A.E. Sheikin, Yu.V. Chekhovskiy, M.I. Brusser. – M.: Stroyizdat, 1979. – 343 p.
 25. Shvite, G.E. Hydroaluminates and calcium hydroferrites [Text] / G.E. Shvite, U. Ludwig // The Fifth International Congress on Chemistry of Cement. – M.: Stroyizdat, 1973. – P. 139-152.

Мясникова А.А.,

к.т.н., доцент кафедры Архитектура, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: aakirsanova@susu.ru

Myasnikova A.A.,

Ph.D., as. professor of the Department of Architecture, South Urals State University, с. Chelyabinsk, Russia. E-mail: aakirsanova@susu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022