

Ю.С. ФИЛИМОНОВА¹, Е.Г. ВЕЛИЧКО¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДИФИКАЦИИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Аннотация. Рассмотрена модификация состава и структуры тяжелого бетона с применением комплексной химико-минеральной добавки, состоящей из золы-уноса ТЭС, суперпластификатора, высоковалентного ускорителя твердения АС и тонкодисперсного клинкерного компонента. Модифицированный бетон характеризуется повышением прочности на сжатие в марочном возрасте на 67%, снижением водосодержания бетонной смеси на 13,6% и улучшением ее удобоукладываемости на 11-12 см. При комплексном использовании суперпластификатора и высоковалентного ускорителя твердения АС наблюдается значимый синергетический эффект в формате усиления их пластифицирующего действия. Установлена высокая эффективность применения разнодисперсного клинкерного компонента.

Ключевые слова: дисперсный состав, зола-уноса ТЭС, клинкерный компонент, плотность, суперпластификатор, ускоритель твердения, структура, удобоукладываемость, прочность.

YU.S. FILIMONOVA¹, E.G. VELICHKO¹

¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

RESEARCH OF COMPLEX MODIFICATION OF HEAVY CONCRETE

Abstract. Modification of the composition and structure of heavy concrete with the use of a complex chemical-mineral additive consisting of fly ash from thermal power plants, a superplasticizer, a high-valence hardening accelerator AC and a fine-dispersed clinker component is considered. Modified concrete is characterized by an increase in compressive strength at a brand age by 67%, a decrease in the water content of a concrete mixture by 13.6% and an improvement in its workability by 11-12 cm. With the combined use of a superplasticizer and a high-valence hardening accelerator AC a significant synergistic effect is observed in the format of enhancing their plasticizing effect. The high efficiency of the application of the mixed-dispersed clinker component has been established.

Keywords: dispersed composition, TPP fly ash, clinker component, density, superplasticizer, hardening accelerator, structure, workability, strength.

Введение

Поиск путей ресурсо- и энергосбережения при обеспечении заданного уровня комплекса показателей качества бетона, а также снижения трудозатрат при производстве бетонных работ, требуют внедрения новых высокоэффективных технологий железобетонных изделий заводского производства. Одним из наиболее эффективных направлений производства бетонов высокого качества является использование самоуплотняющихся бетонных смесей (self-compacting concrete – SCC), снижающих трудоёмкость производства, обеспечивающих высокое качество поверхности готовой продукции и не требующих высококвалифицированной рабочей силы [1-4]. Такие смеси должны характеризоваться низким предельным напряжением сдвига (текучестью) и высоким значением вязкости,

предотвращающим расслоение, водоотделение, седиментационные процессы, т.е. повышающими их однородность и прочность бетона. Оптимальное сочетание означенных противоречивых реологических свойств бетонной смеси облегчает выход вовлеченного в процессе приготовления воздуха, и способствует ее качественному уплотнению. Повышение качества означенных реологических свойств бетонной смеси может обеспечиваться использованием в составе бетона высокодисперсных минеральных модификаторов различного происхождения (микрокремнезем, тонкодисперсный шлак, зола-уноса ТЭС и др.), суперпластифицирующих - суперводоредуцирующих добавок поликарбоксилатного типа [5, 6], других видов химических модификаторов, регулирующих вязкость и текучесть бетонной смеси, а также ускорителей и замедлителей схватывания и твердения [3]. Очевидно, что применение золы-уноса ТЭС в составе бетона для замещения части вяжущего вещества и/или мелкого заполнителя, и одновременного улучшения реологических и технологических свойств бетонной смеси представляет собой перспективное направление эффективного экологического и экономического применения такого вида дешевого техногенного отхода [7-12].

Кроме того, для качественного самоуплотнения бетонной смеси необходимо использовать такие технологические приемы, как снижение расхода крупного заполнителя и максимальной крупности его зерен (наиболее предпочтительный размер 5(3)-10 мм), низкое водовязущее отношение [12-13]. Максимальная текучесть бетонной смеси, и ее качественное самоуплотнение обеспечивается в этом случае практически исключением контактных взаимодействий между зернами заполнителей за счет повышенных расхода цемента и доли песка в смеси заполнителей. Однако бетоны с повышенным содержанием цемента характеризуются высоким тепловыделением, значимо увеличивающим кинетическую энергию в начальный период их твердения, что является негативным фактором. По этой причине фиксация частиц гидратных фаз при структурообразовании может происходить в основном в положении дальней (10-7 – 10-8 м) коагуляции, обеспечивая при этом ее нежелательные значимо высокую микропористость, дефектность и снижение физико-механических свойств бетона [14-16]. Очевидно, что требуемые реологические свойства бетонной смеси обеспечиваются только при сохранении высокого содержания дисперсной фазы, и наиболее технически эффективно, экологично и экономически выгодно применением золы – уноса ТЭС [7,8, 17-19]. В частности, положительные качества золы-уноса ТЭС заключаются в том, что она представляет собой добавки-техногенные отходы, образующиеся в дисперсном состоянии, и поэтому не требуют значительного потребления энергии для придания им свойств необходимого потребительского качества. Большинство зол-уноса вне зависимости от вида сжигаемого угля (антрацит, каменный, бурый) характеризуются высоким содержанием SiO_2 (49-67%) и Al_2O_3 (20-36%), обеспечивающим высокую их пуццоланическую активность [7-12].

Использование золы-уноса при приготовлении бетонной смеси дает возможность экономии цемента вплоть до 30% без ущерба для качества бетона. Помимо этого, зола в бетоне может выступать в роли микрозаполнителя, улучшающего гранулометрический состав песка и оказывающего активное влияние на реологические и технологические свойства бетонной смеси и процессы структурообразования цементного камня. Бетонные смеси с оптимальным содержанием золы обладают довольно высокой сохраняемостью свойств, обеспечивая при этом транспортирование ее на дальние расстояния [7-12].

Однако, в реальных цементных структурах имеется вероятность того, что две или большее количество дисперсных частиц минеральных модификаторов, в частности, золы, могут объединиться, и будут представлять собой отдельный агрегат [6,20,21]. В таких микрообъемах цементных систем пуццолановая реакция практически не протекает, и они представляют собой псевдопоры размером 5-7 мкм (случай трех частиц) и 0,5-1,5 мкм (двух частиц). При большем количестве и незначительно малом размере частиц, и образовании крупных агрегатов они могут распределяться в межчастичных пустотах элементарных ячеек матричного клинкерного компонента, разуплотняя их еще в большей степени снижать

прочность бетона. Предотвратить означенный негативный эффект от использования золы ТЭС представляется возможным за счет применения тонкодисперсной фракции клинкерного компонента с удельной поверхностью 950-1000 м²/кг. Функциональная необходимость ее применения заключается в следующем. Во-первых – обеспечение однородного протекания реакции между портландитом и диоксидом кремния золы ТЭС во всех микрообъемах цементного теста и камня. Такой механизм действия обеспечивает более однородную структуру распределения новообразований гидросиликатных фаз в каждом микрообъеме цементного камня, значимо меньшую его дефектность и высокую прочность бетона. Во - вторых – заполнение межчастичных пустот с целью повышения концентрации твердой фазы в единице объема. В - третьих - уменьшение степени гидратации частиц относительно грубодисперсной фракции клинкерного компонента, крупные прочные реликты которых внесут значимый вклад в повышение прочности цементного камня и долговечности бетона. Таким образом, целью настоящего исследования является определение комплексного влияния золы-уноса ТЭС, суперпластификатора поликарбоксилатного типа, тонкодисперсной фракции клинкерного компонента и высоковалентного ускорителя твердения с учетом правила Шульце-Гарди на технологические (удобоукладываемость, водоотделение, раствооротделение) и физико-механические свойства бетона. Высокая дисперсность многокомпонентного вяжущего вещества требует обязательного применения современных суперпластификаторов поликарбоксилатного типа.

Особенностью проектирования состава бетона с поликарбоксилатами суперпластификаторами является необходимость увеличения доли песка в смеси заполнителей и особые требования к гранулометрическому составу заполнителей в целом, ввиду повышенного их воздухововлечения. Воздух в бетон вовлекается раствором и в основном зернами песка размером 0,2-1 мм. Если содержание в песке зерен более мелких чем 0,3 мм увеличивается, то объем вовлеченного воздуха уменьшается. При этом известняковые пески благодаря пористости и поверхностным свойствам вовлекают меньшее количество воздуха, чем кварцевые. В связи с этим при необходимости получения плотной структуры бетона с минимальным содержанием воздуха следует ограничивать относительную долю мелкозернистого песка с верхней границей 0,4 мм, что было использовано в настоящей работе. Цемент действует аналогично - увеличение его содержания снижает объем вовлеченного воздуха.

Модели и методы

Свойства и структура бетона изучались с использованием двух фракций мелкого заполнителя размером 0,315 и 0,16 мм соответственно в количестве 80 и 20%, гранитно-гравового щебня фр. 5-10 мм, портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н с удельной поверхностью 253 м²/кг, зола-уноса ТЭС в количестве 114 кг/м³ (20% массы цемента), высокодисперсный портландцемент в количестве 3,9% массы многокомпонентного цемента с дисперсностью 950-1000 м²/кг [16], обеспечивающий однородное протекание пуццолановой реакции во всех микрообъемах, содержащих золу – уноса ТЭС и препятствующий образованию агрегатов ее частиц. Расход цемента принимался равным 570 кг/м³ бетона. В качестве суперпластификатора применялся Melflux 5581 F (ООО «БАСФ-Строительные системы») в количестве 0,54 % массы цемента и высоковалентный ускоритель твердения АС в количестве 0,07% в соответствии с правилом Шульце – Гарди [16]. Применялись следующие методы исследований: форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись лазерным анализатором, подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181-2014, прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012.

При приготовлении бетонной смеси раствор суперпластификатора вводился в бетоносмеситель в два этапа. Первая часть в количестве 30% с водой затворения, а оставшаяся – за 20 с до окончания приготовления бетонной смеси. Ускоритель твердения АС вводился за 10 с до окончания перемешивания смеси. Адсорбция ускорителя твердения в этом случае

происходит на привитых боковых цепях поликарбоксилатного суперпластификатора, обеспечивает синергетический эффект, значимо усиливая его пластифицирующую способность (таблица 1). Результаты выполненных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристика бетонной смеси и бетона с золой-уноса ТЭС

Многокомпонентное вяжущее, кг/м ³ %		Тонкодисперсный Ц, кг/м ³ %	В, л	Melflux 5581 F, кг/%	Ускоритель АС, кг/%	Распływ конуса, см	Прочность на сжатие, МПа/%, в возрасте, сут.	
Ц	Зола ТЭС						1	28
570 100	-	-	176 100	3,08 0,54	-	76	38,2 47	82,1 100
570 100	-	-	153 86,9	3,08 0,54	0,399 0,07	87	55 67	103,6 126
456 80	114 20	-	148 84,6	3,08 0,54	0,399 0,07	88	51,1 62	115,8 141
456 80	114 20	22,2 3,9	152 86,4	3,08 0,54	0,399 0,07	88	59,9 73	137,1 167

Использование ускорителя твердения обеспечивает редуцирование водосодержания относительно контрольного состава на 13,1%, увеличение распływ конуса на 13 см и прочности бетона на сжатие на 20 и 26%, соответственно в возрасте 1 и 28 суток после твердения в нормальных условиях (НУ). Полученные результаты свидетельствуют о синергетическом эффекте комплексного применения суперпластификатора и высоковалентного ускорителя твердения АС (таблица 1), а повышение удобоукладываемости бетонной смеси без водо- и раствороотделения способствует ее более качественному уплотнению.

Применение золы – уноса ТЭС взамен эквивалентной части (20%) цемента незначительно (на 5%) замедлило твердение бетона относительно состава с комплексным (суперпластификатором + ускоритель) химическим модификатором в возрасте 1 суток, а в возрасте 28 суток его прочность превысила прочность контрольного состава на 41%, что эквивалентно дополнительной экономии цемента в количестве 20,5%.

Особенно высокая эффективность наблюдается при использовании тонкодисперсного портландцемента в незначительном (3,9%) количестве. Прочность бетона на сжатие в этом случае повысилась на 26 и 67%, при очень высоком качестве бетонной смеси. Практически не наблюдалось расслоения, водо- и раствороотделения.

Выводы

Эффективным направлением в технологии производства бетонов высокого качества является использование самоуплотняющихся бетонных смесей и их модификация комплексной химико-минеральной добавкой, состоящей из золы-уноса ТЭС, суперпластификатора, высоковалентного ускорителя твердения АС и тонкодисперсного клинкерного компонента. Модифицированный бетон характеризуется повышением прочности на сжатие в марочном возрасте на 67% и снижением водосодержания бетонной смеси на 13,6%. При комплексном использовании суперпластификатора и высоковалентного ускорителя твердения АС наблюдается значимый синергетический эффект в усилении их пластифицирующего действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Величко Е.Г., Попова Ю.Б. Технологические аспекты повышения тепло щиты ограждающих конструкций // Международный сборник научных трудов «Модернизация инвестиционно-строительного и жилищно-коммунального комплекса под ред. проф. В.О. Чулкова. М.: МГАКХиС, 2011. С.180-199.
2. Collepardi M. Self-Compacting Concrete: What is New, Proceedings of Seventh CANMET, ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 1-16 (2003).
3. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // *Строительные материалы*, **10**, 4-6 (2008).
4. Шестернин А.И., Коровкин М.О., Ерошкина Н.А. Основы технологий самоуплотняющихся бетонов, *Молодой ученый*, **6**, 226-228(2015).
5. Тарасеева Н.И. Роль безотходных технологий в расширении сырьевой базы для получения эффективных модифицирующих добавок и активных наполнителей в цементных растворах и бетонах, *New university. Technical sciences*, **10(32)**, 90-93(2014).
6. Mohammad A.K. Recycling of Fly Ash as an Energy Efficient Building Material: A Sustainable Approach. *Key Engineering Materials*. **692**, 54-65(2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.692.54.
7. Ahmad H., Wahid N., Rahman M.F.A., Karim N.A. Influence of Fly Ash on the Compressive Strength of Foamed Concrete at Elevated Temperature. *MATEC Web of Conferences*, **15**, (2014). DOI:10.1051/mateconf/20141501003.
8. Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash. *Applied Mechanics and Materials*, **459**, 82-86(2013) DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82
9. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash. *Key Engineering Materials*. **302-303**, (470-478)2006. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.470
10. Nai-Qian Feng, Gai-Fei Peng A Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash. *Key Engineering Materials*. **302-302**, 26-34(2006). DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156.
11. Reiterman Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes. *Advanced Materials Research*. **1054**, 154-161(2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154
12. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и бедующее бетонов, *Construction Materials*, **3**, 20-23(2008)
13. Суздальцев О.В. Новые высокоэффективные бетоны, *New university. Technical sciences*, **7-8(29-30)**, 44-47(2014).
14. Melihov I.V. Physicochemical Evolution of Solid, (Binomial. Knowledge laboratory, Moscow, 2009).
15. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы, (Chemistry, Moscow, 1980).
16. Dykin I., Velichko E.G., Eremin A.V., Multilevel-modified cement systems, *Bulletin of Civil Engineers*, **4 (57)**, 111-114(2016).
17. YU.V. Isaeva, E.G. Velichko, A.SH. Kasumov Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components, *Construction Materials*, **8**, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
18. Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Полянских И.С., Токарев Ю.В., Первушин Г.Н., Салтыков А.А., Бекмансуров М.Р. Направленное управление структурой и свойствами гипсовых композиций, *Promising materials in construction and engineering*, 60-67 (2014).
19. YAkovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinieyevich O., Kizinieyevich V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics, *Construction Materials*, **8**, 20-29(2016)
20. Энтин З.Б., Юдович Б.Э. Многокомпонентные цементы. Научн. тр. // НИИцемент, вып 107. 1994. С. 3-76. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-740-8-25-29.
21. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона// *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

REFERENCES

1. Velichko E.G., Popova YU.B. Tekhnologicheskie aspekty povysheniya teplo shchity ograzhdayushchih konstrukcij // *Mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov «Modernizaciya investicionno-stroitel'nogo i zhilishchno-kommunal'nogo kompleksa pod red. prof. V.O. CHulkova. - M: MGAKKHiS, 2011. p. 180-199.*
2. Collepardi M. Self-Compacting Concrete: What is New, Proceedings of Seventh CANMET, ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 1-16(2003).
3. Kalashnikov V.I. Raschet sostavov vysokoprochnnyh samouplotnyayushchihsya betonov, *Construction Materials*, **10**, 4-6(2008).
4. Shesternin A.I., Korovkin M.O., Eroshkina N.A. Osnovy tekhnologii samouplotnyayushchihsya betonov, *Young scientist*, **6**, 226-228(2015).

5. Taraseeva N.I. Rol' bezothodnykh tekhnologij v rasshirenii sr'evoy bazy dlya polucheniya effektivnykh modificiruyushchih dobavok i aktivnykh napolnitelej v cementnye rastvory i betony, *New university. Technical sciences*, **10(32)**, 90-93(2014).
6. Mohammad A.K. Recycling of Fly Ash as an Energy Efficient Building Material: A Sustainable Approach. *Key Engineering Materials*. **692**, 54-65(2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.692.54.
7. Ahmad H., Wahid N., Rahman M.F.A., Karim N.A. Influence of Fly Ash on the Compressive Strength of Foamed Concrete at Elevated Temperature. *MATEC Web of Conferences*, **15**, (2014). DOI:10.1051/mateconf/20141501003.
8. Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash. *Applied Mechanics and Materials*, **459**, 82-86(2013) DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82
9. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash. *Key Engineering Materials*. **302-303**, (470-478)2006. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.470
10. Nai-Qian Feng, Gai-Fei Peng A Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash. *Key Engineering Materials*. **302-303**, 26-34(2006). DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156.
11. Reiterman Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes. *Advanced Materials Research*. **1054**, 154-161(2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154
12. Kalashnikov V.I. Promyshlennost' nerudnykh stroitel'nykh materialov i budushchee betonov, *Construction Materials*, **3**, 20-23(2008)
13. Suzdal'cev O.V. Novye vysokeffektivnye betony, *New university. Technical sciences*, **7-8(29-30)**, 44-47(2014).
14. Melihov. I.V. Physicochemical Evolution of Solid, (Binomial. Knowledge laboratory, Moscow, 2009).
15. Ur'ev N.B. Vysokokoncentrirovannye dispersnye sistemy, (Chemistry, Moscow, 1980).
16. Dykin V., Velichko E.G., Eremin A.V., Multilevel-modified cement systems, *Bulletin of Civil Engineers*, **4(57)**, 111-114(2016).
17. YU.V. Isaeva, E.G. Velichko, A.SH. Kasumov Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components, *Construction Materials*, **8**, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
18. YAKovlev G.I., Gordina A.F., Polyanskiy I.S., Tokarev YU.V., Pervushin G.N., Saltykov A.A., Bekmansurov M.R. Napravlennoe upravlenie strukturoj i svojstvami gipsovykh kompozicij, *Promising materials in construction and engineering*, 60-67 (2014).
19. YAKovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinievykh O., Kizinievykh V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics, *Construction Materials*, **8**, 20-29(2016)
20. Entin Z.B., YUdovich B.E. Mnogokomponentnye cementy. - Nauchn. tr. // NIICement, **107**. 1994. pp. 3-76. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-740-8-25-29.
21. Velichko E.G., SHumilina YU.S. K probleme formirovaniya dispersnogo sostava i svojstv vysoko-prochnogo betona// *Vestnik MGSU*. 2020. T. 15. **2**. pp. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

Информация об авторах:

Филимонова Юлия Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, преподаватель кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: JuliaS06@mail.ru

Величко Евгений Георгиевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: pct44@yandex.ru

Information about authors:

Filimonova Yulia S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, lecturer of the department of building materials and materials science.
E-mail: JuliaS06@mail.ru

Velichko Evgeniy G.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, doctor of technical sciences, professor, professor of the department building materials and materials science.
E-mail: pct44@yandex.ru