УДК 691.32

© А. А. Рябова, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: mamataima@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-164-169

© А. А. Ryabova, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: mamataima@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОФИБРОБЕТОНА С МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ

INVESTIGATION OF LONG-TERM STRENGTH OF GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE WITH ACTIVE MINERAL ADDITIVES

Представлены результаты исследований физико-механических свойств стеклофибробетона во времени при различной дозировке щелочестойкой фибры и метакеолина МКЖЛ-2. Получены данные о пределе прочности на изгиб стеклофибробетона, модифицированного метакеолитом, в возрасте 28 и 180 суток. Показано, что при введении метакеолина в количестве 15 % (от содержания портландцемента) и выше прочность стеклофибробетона при изгибе продолжает оставаться высокой и по истечении 180 суток. Рассмотрено совместное влияние метакеолина и микрокремнезема на прочностные свойства мелкозернистого стеклофибробетона. Полученные данные позволяют говорить о положительном влиянии комплексной добавки, в которой преобладает метакеолит, на деформационные свойства дисперсноармированного бетона.

Ключевые слова: метакеолит МКЖЛ-2, микрокремнезем, стеклофибробетон, стеклофибра, предел прочности при изгибе.

The article describes the research results of physical and mechanical properties of glass fiber reinforced concrete (GFRC), regarding different time periods of hardening, at different dosing of alkali-resistant fiber and MKZhL-2 metakaolin. There were obtained bending strength data of glass fiber reinforced concrete modified by metakaolin at the age of 28 and 180 days. It is shown that at adding metakaolin (in amount of 15% from Portland cement and more) the durability of glass fiber reinforced concrete subjected to bending continues to remain high at the age of over 180 days. The co-effect of metakaolin and microsilica dioxide on strength properties of fine-grained glass fiber reinforced concrete was studied. The obtained data testify a positive effect of complex additive, in which metakaolin prevails, on deformation properties of dispersion glass-fiber reinforced concrete.

Keywords: MKZhL-2 metakaolin, microsilica, glass-fiber reinforced concrete, glass-fiber, bending strength.

В последнее время возрос интерес к использованию различных минеральных модификаторов бетона, обладающих пуццолановой активностью. Наибольшее распространение получили такие добавки, как микрокремнезем, золы уноса, доменный гранулированный шлак, представляющие собой отходы промышленности [1–3]. Принято считать, что пуццолановая реакция зол и шлаков в бетоне отсрочена во времени и начинается не ранее чем через 6–40 дней после затво-

рения раствора [4]. Такая замедленная реакция зачастую связана с качеством золошлаковых отходов.

Микрокремнеземистая пыль является побочным продуктом производства ферросилиция, феррохрома, кристаллического кремния и других ферросплавов. Несмотря на это, высокая пуццолановая активность микрокремнезема позволяет ему проявлять уникальные свойства уже на ранней стадии твердения бетона. Микрокрем-

незем обладает высокой удельной поверхностью (20 000–35 000 см²/г) и представляет собой тончайшую пыль серого цвета с высоким содержанием диоксида кремния (75–95 %). Насыпная плотность микрокремнезема в зависимости от производителя колеблется в пределах 0,15–0,26 т/м³. Сегодня этот отход производства широко используется при получении высококачественных бетонов, применяемых при строительстве дамб, путепроводов, буровых платформ, мостов.

Несмотря на то что кремнеземистые пуццолановые добавки применяются при строительстве уже несколько десятков лет, ученые всего мира продолжают изучение их воздействия на свойства и долговечность бетонов.

Не менее перспективен для изучения высокоактивный метакраолин (ВМК), являющийся продуктом дегидратации краолиновой глины (природного гидроалюмосиликата). Благодаря тому что метакраолин является целевым продуктом производства с тщательным подбором сырья и контролем технологии производства, он имеет более четкие показатели качества, чем побочные продукты производства.

Краолинит — основная составляющая глины белого цвета (краолин), образующихся при разрушении (выветривании) гранитов, гнейсов и других горных пород, содержащих полевые шпаты (первичные краолины) [10]. По внешнему виду метакраолин представляет собой тонкодисперсный порошок бежевого, розоватого, белого цвета. В основном метакраолин содержит 36–45 % оксида алюминия и 50–57 % оксида кремния в химически активной форме. Это обуславливает высокую пуццолановую активность метакраолина (количество извести, нейтрализуемой 1 г ВМК), которая составляет более 1000 мг [6]. По размеру частицы метакраолина, как правило, составляют от 0,5 до 5 микрон в диаметре, что на порядок меньше, чем размер цементного зерна и на порядок больше, чем частицы микрокремнезема [7, 8].

Для получения высококачественных бетонов (High Performance Concrete, HPC) в последние годы применяются комплексные модификаторы на органоминеральной основе, полученные с использованием гиперпластификаторов нового (III–IV) поколения и активных минеральных добавок.

Представляет интерес совокупное влияние метакраолина и микрокремнезема в качестве активных модификаторов для стеклофибробетона.

Для компенсации повышения водопотребности фиброцементных составов при введении высокодисперсных минеральных добавок требуется введение пластифицирующей составляющей. По данным [5, 9] эффективнее всего в композиционных материалах на основе портландцемента работают гиперпластификаторы поликарбоксилатного типа, например Sika Visco Crete, Melflux, Pantarhit, Glenium и другие.

Наиболее распространенным видом фибры является металлическая фибра различных типоразмеров. Тем не менее, существует довольно большое количество научных работ, показывающих, что введение базальтовых, синтетических, углеродных волокон в той или иной степени позволяет уменьшить хрупкость бетона, повысив его деформационные характеристики [11, 12].

Стекловолокно, несмотря на все свои достоинства, имеет и ряд недостатков. Довольно высокая стоимость стекловолокна, а также риски, связанные с высокой щелочностью цементных систем, ограничивают его повсеместное применение. В основном стеклофибробетон в нашей стране применяется для создания декоративных изделий (карнизов, перил, поручней, небольших панелей). Однако существует положительный пример использования стеклофибробетона для создания крупноформатных кессонов и панелей, несущих серьезную нагрузку в условиях работы метрополитена [13]. Следует отметить, что воздействие содержащейся в цементе щелочи в течение длительного времени на стеклофибру изучено недостаточно.

Цель работы — исследование влияния активных минеральных добавок на сохранение прочностных характеристик бетона во времени. Для изучения поставленной задачи была выбрана модель двухфакторного эксперимента.

В качестве модифицирующих добавок применялся отечественный метакраолин МКЖЛ-2 месторождения Журавлиный Лог и микрокремнезем МК-85 производства Новолипецкого металлургического комбината. Свойства модификаторов описаны в табл. 1.

В качестве вяжущего использовали ПЦ500 Д0 (Сланцы), в качестве заполнителя — песок фрак-

Таблица 1

Физико-химические свойства активных минеральных добавок

Наименование параметров	Значение	
	МКЖЛ-2	МК-85
Массовая доля оксида алюминия (Al_2O_3), %	41,2	11-14
Массовая доля оксида кремния (SiO_2), %	50,7	86,8
Массовая доля оксида железа (Fe_2O_3), %	0,49	0,4–1,7
Пуццолановая активность, (мг $(CaOH)_2$ / г)	1340	600
Насыпная плотность, кг/м ³ , в пределах	250–350	150–200
Содержание влаги, %	0,15	0,66
Цвет	Розовый	Серый

Рис. 1. Влияние расхода фибры и метакеолина на предел прочности при изгибе стеклофибробетона в возрасте 28 суток

ции 0–2,5 мм, роль пластифицирующей добавки выполнял пластификатор поликарбоксилатного типа Synergy RC 160 Plv. Составы имели одинаковое водоцементное отношение, равное 0,49. Армирующим компонентом фибробетона выступала щелочестойкая фибра марки Cem Fill длиной 10 мм. Диаметр волокон составляет 14 мкм.

Образцы-балки из мелкозернистого стеклофибробетона с вариацией содержания фибры и метакеолина испытывали на изгиб и сжатие. Испытания проводили после 28 и 180 суток хранения в водной среде. Наибольший интерес представляют показатели предела прочности при изгибе армированного бетона. Сводные данные об уровнях варьирования составов отражены в табл. 2, 3.

По результатам испытаний были получены данные о прочностных свойствах стеклофибробетона в зависимости от содержания вводимого стекловолокна и метакеолина (рис. 1).

Трехмерная диаграмма наглядно показывает положительное влияние метакеолина на деформативные свойства фибробетона. В отсутствие

метакеолина, при максимально возможном армировании (3 %масс.) предел прочности при изгибе составляет порядка 14 МПа. При увеличении доли активной минеральной добавки возрастают и деформативные свойства стеклофибробетона. Так, при таком же проценте армирования, но с добавкой метакеолина 30 % от ПЦ предел прочности при сжатии возрастает до 24 МПа. Прирост прочности составил 71 %.

Через 180 суток хранения в водной среде наблюдается крайне незначительный спад прочностных параметров, характерный для составов с низким расходом метакеолина (менее 15 % от ПЦ) (рис. 2). Вероятнее всего, это объясняется недостаточным содержанием высокоактивной минеральной добавки в фибробетоне, что не позволило в значительной степени связать свободный СаО. Для составов с высокой степенью армирования и содержанием метакеолина более 15 % от ПЦ падения предела прочности при изгибе не наблюдается, что свидетельствует о важной роли пуццолановой добавки в составе стеклофибробетона.

Таблица 2

Матрица планирования двухфакторного эксперимента

Наименование факторов	Коды	Уровни варьирования			Шаг варьирования
		–1	0	1	
Расход метакеолина, % от ПЦ	X1	0	15	30	15
Расход фибры, %масс.	X2	1	2	3	1

Рис. 2. Влияние расхода фибры и метакаолина на предел прочности при изгибе стеклофибробетона в возрасте 180 суток

Проведенные ранее исследования физико-механических свойств стеклофибробетона с добавкой микрокремнезема показывают, что в возрасте 28 суток прочностные параметры у таких составов выше, чем у составов с добавкой метакаолина. Однако уже к 90 суткам происходит спад предела прочности при изгибе на 15–20 %. Вероятно, морфология микрокремнезема способствует уплотнению структуры цементного камня, следовательно, степень сцепления волокна с цементной матрицей возрастает. Но вследствие возможной деструкции волокон происходит потеря прочности стеклофибробетона.

Таким образом, необходимо исследовать совместное влияние микрокремнезема и метакаолина на свойства стеклофибробетона.

Таблица 3

Содержание компонентов в комплексных составах СФБ

№	Компонент	Состав 1	Состав 2	Состав 3
1	ПЦ 500 Д0, %	38,0	38,0	38,0
2	Synergy RC 160 Plv, %	0,1	0,1	0,1
3	Волокно 10 мм, %	3,0	3,0	3,0
4	Метакаолин, %	2,0	5,0	8,0
5	Микрокремнезем, %	8,0	5,0	2,0
6	Песок фракции 0–2,5 мм, %	48,9	48,9	48,9

Рис. 3. Совместное влияние микрокремнезема и метакаолина на предел прочности при изгибе во времени

Были исследованы три состава с различным содержанием МКЖЛ-2 и МК-85. Количественное содержание компонентов отражено в табл. 3.

Водоцементное отношение равнялось 0,5 для всех составов. В результате длительных испытаний были получены зависимости, показанные на рис. 3.

Графические зависимости показывают положительный эффект от совместного использования метакеолина и микрокремнезема. Наименьшие показатели предела прочности при изгибе наблюдаются у состава 1, содержащего 2 % МКЖЛ-2 и 8 % МК-85. Максимальные значения предела прочности при изгибе в возрасте 90 и 180 суток наблюдались у состава 3. К 180 суткам прочность при изгибе достигла 23,5 МПа.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- введение метакеолина МКЖЛ-2 в состав фибробетонной смеси приводит к повышению деформативных свойств стеклофибробетона;
- положительный эффект от введения высокоактивной минеральной добавки становится заметен при его дозировке не менее 15 % от ПЦ;
- по прошествии 180 суток хранения в воде дисперсно-армированный бетон, модифицированный метакеолитом, не утратил или незначительно утратил свои прочностные характеристики;
- совместное применение двух добавок пуццоланового типа (микрокремнезема и метакеолина) положительно сказывается на пределе прочности при изгибе стеклофибробетона;
- оптимальный расход микрокремнезема составляет 2 % масс., метакеолина — 8 % масс.

Библиографический список

1. Кононова О. В., Анисимов С. Н., Смирнов А. О., Лешканов А. Ю. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбоксилатного эфира // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6–2. С. 259–263.
2. Русина В. В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учеб. пособие. Братск: БрГУ, 2007. 226 с.
3. Алексеенко А. А., Москвин Е. И., Птичников В. А. Улучшение характеристик бетонов путем ввода активной минеральной добавки — молотого доменного шлака // Молодой ученый. 2015. № 24. С. 80–85.

4. Егорова Е. В. Самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональным модификатором на основе отходов промышленности: дис. ... канд. техн. наук. Макевка, 2016. 161 с.

5. Кирсанова А. А., Ионов Ю. В., Крамар Л. Я. К вопросу о долговечности бетонов с комплексными добавками, включающими метакеолин // Материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Омск: СибАДИ, 2015. С. 198–203.

6. Захаров С. А., Калачик Б. С. Высокоактивный метакеолин — современный активный минеральный модификатор цементных систем // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 56–57.

7. Голубева О. А., Потапова Е. Н. Влияние метакеолина на свойства белого портландцемента // Успехи в химии и химической технологии. 2014. № 8. Т. XXVIII. С. 28–31.

8. Красникова Н. М., Степанов С. В., Искандарова А. Ф. Исследование влияния метакеолина на прочность бетона // Инновационная наука. 2015. № 7. С. 41–43.

9. Низина Т. А., Балбалин А. В. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов // Вестник Томского государственного строительного-архитектурного университета. 2012. № 2. С. 148–153.

10. Пустовгар А. П., Бурьянов А. Ф., Васильев Е. В. Применение метакеолина в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2010. № 10. С. 78–81.

11. Сарайкина К. А., Голубев В. А., Яковлев Г. И., Сычугов С. В., Первушин Г. Н. Повышение коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных бетонах // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 27–31.

12. Смирнова О. М., Андреева Е. В. Свойства тяжелого бетона дисперсно-армированного синтетическим волокном // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 11–20.

13. Шангина Н. Н., Харитонов А. М. Опыт применения стеклофибробетона для реставрации декорированного подвесного потолка станции метрополитена // Материалы семинара «Проблемы реставрации и обеспечения сохранности памятников культуры и истории». СПб., 2012. С. 18–27.

References

1. Kononova O. V., Anisimov S. N., Smirnov A. O., Leshkanov A. Yu. *Ehffektivnost' primeneniya domennogo granulirovannogo shhlaka v betonakh s dobavkoy na osnove polikarboksilatnogo ehfira* [Application efficiency of blast-furnace granulated slag in concrete with polycarboxylate ether-based additive]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, 2016, no. 6 (2), pp. 259–263.

2. Rusina V. V. *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva na osnove mnogotonnazhnykh promyshlennykh otkhodov. Ucheb. posobie* [Mineral adhesives on the basis of large-tonnage industrial waste. Teaching manual]. Bratsk, BrSU Publ., 2007, 226 p.
3. Alekseenko A. A., Moskvina E. I., Ptichnikov V. A. *Uluchshenie kharakteristik betonov putem vvoda aktivnoy mineral'noy dobavki — molotogo domennogo shlakha* [Improvement of concrete characteristics by injecting active mineral additive (ground blast-furnace slag)]. *Molodoy uchenyy — Young Scientist*, 2015, no. 24, pp. 80–85.
4. Egorova E. V. *Samouplotnyayushchiesya betony s polifunktsional'nym modifikatorom na osnove otkhodov promyshlennosti. Diss. kand. tekhn. nauk* [Self-compacting concrete with multifunctional modifier on the basis of industry waste. PhD in Sci. Tech. diss.]. Makeevka, 2016, 161 p.
5. Kirsanova A. A., Ionov Yu. V., Kramar L. Ya. *K voprosu o dolgovechnosti betonov s kompleksnymi dobavkami, vklyuchayushchimi metakaolin* [Concerning durability of concrete with complex additives including metakaolin]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. of the Int. sci. pract. conf. of students, post-graduate students and young scientists]. Omsk, SibADI Publ., 2015, pp. 198–203.
6. Zakharov S. A., Kalachik B. S. *Vysokoaktivnyy metakaolin — sovremennyy aktivnyy mineral'nyy modifikator tsementnykh sistem* [Highly active metakaolin as a modern active mineral modifier of cement systems]. *Stroitel'nye materialy — Construction materials*, 2007, no. 5, pp. 56–57.
7. Golubeva O. A., Potapova E. N. *Vliyanie metakaolina na svoystva belogo portlandtsementa* [Effect of metakaolin on white Portland cement properties]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii — Advances in chemistry and technology*, 2014, no. 8, vol. XXVIII, pp. 28–31.
8. Krasnikova N. M., Stepanov S. V., Iskandarova A. F. *Issledovanie vliyaniya metakaolina na prochnost' betona* [Research on metakaolin effect on concrete strength]. *Innovatsionnaya nauka — Innovative Science*, 2015, no. 7, pp. 41–43.
9. Nizina T. A., Balbalin A. V. *Vliyanie mineral'nykh dobavok na reologicheskie i prochnostnye kharakteristiki tsementnykh kompozitov* [Effect of mineral additives on rheological and strength properties of cement compounds]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo stroitel'no-arkhitekturnogo universiteta — Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2012, no. 2, pp. 148–153.
10. Pustovgar A. P., Bur'yanov A. F., Vasil'ev E. V. *Primenenie metakaolina v sukhikh stroitel'nykh smesyakh* [Application of metakaolin in dry construction mixtures]. *Stroitel'nye materialy — Construction materials*, 2010, no. 10, pp. 78–81.
11. Saraykina K. A., et al. *Povyshenie korrozionnoy stoykosti bazal'tovogo volokna v tsementnykh betonakh* [Increase in corrosion resistance of basalt fiber in cement concrete]. *Stroitel'nye materialy — Construction materials*, 2016, no. 1 (2), pp. 27–31.
12. Smirnova O. M., Andreeva E. V. *Svoystva tyazhelogo betona dispersno-armirovannogo sinteticheskimi voloknom* [Properties of dispersion-reinforced with synthetic fiber heavy concrete]. *Stroitel'nye materialy — Construction materials*, 2016, no. 11, pp. 11–20.
13. Shangina N. N., Kharitonov A. M. *Opyt primeneniya steklofibrobetona dlya restavratsii dekorirovannogo podvesnogo potolka stantsii metropolitena* [Experience of application of GFRC for restoration of the subway station ceiling decoration]. *Trudy seminarov «Problemy restavratsii i obespecheniya sokhrannosti pamyatnikov kul'tury i istorii»* [Proc. of the workshop "Problems of restoration and preservation of monuments of culture and history"]. St. Petersburg, 2012, pp. 18–27.