**СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫЙ САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ ФИБРОБЕТОН ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Семен Суренович Каприелов**

НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, заведующий лабораторией, д. т. н., проф.

**Игорь Анатольевич Чилин**

Предприятие Мастер Бетон, инженер

Возрастающие объемы и удачные примеры [1] применения новых модифицированных бетонов с уникальными прочностными, деформативными и технологическими характеристиками, являются хорошей основой для исследований в целях дальнейшего развития и оптимизации как технологии, так и свойств материала. Одним из перспективных ориентиров для движения в этом направлении представляется высокопрочный фибробетон. Хотя бы потому, что благодаря дисперсному армированию можно решить проблему хрупкого разрушения высокопрочного бетона.

Высокопрочный (как и сверхвысокопрочный – Ultra High-Strength) сталефибробетон – известный и достаточно исследованный материал. Имеющаяся информация касается, в основном, бетона, полученного из сравнительно жестких (малоподвижных) смесей. Тем не менее, данные о дисперсноармированных бетонах из высокоподвижных или самоуплоняющихся смесей имеются, связаны они с использованием металлической фибры и относятся к бетонам классов по прочности на сжатие ниже В100 [2]. Нами решались задачи получения и исследования свойств сверхвысокопрочного самоуплотняющегося фибробетона классов выше В100 для использования при возведении монолитных конструкций и сооружений.

В основе технологии получения такого материала лежит совмещение сверхвысокопрочной матрицы, основной объем которой представляет собой аналог Reactive Powder Concrete [3] – «порошкового бетона» – и стальной фибры.

***Методика эксперимента***

Основные компоненты смесей и их характеристики приводятся ниже.

1. Портландцемент марки ПЦ 600 Д0, средней активностью при пропаривании 48,9 МПа, соответствующий ГОСТ 10178.

2. Заполнитель – песок кварцевый с включениями известняка, состоящий из набора стандартных фракций от 0 до 5 мм, в котором доля частиц фракций не более 0,63 мм составляла 50 – 65%.

3. Органоминеральный модификатор МБ 50К – порошкообразный продукт насыпной плотностью 850 кг/м3, содержащий микрокремнезем, золу-унос, суперпластификатор на основе поликарбоксилатов.

4. Стальная фибра волнового профиля (временное сопротивление разрыву не менее 1200 МПа, модуль упругости 200 ГПа).

Пределы прочности определяли в соответствии с ГОСТ 10180: при сжатии (R) – испытанием образцов-кубов размером 100×100×100 мм, при осевом растяжении (Rbt) – испытанием образцов-призм («восьмерок») высотой 490 мм с сечением в зоне предполагаемого разрыва 70×70 мм, при изгибе (Rtt) – испытанием призм 100×100×400 мм.

Модули упругости и призменную прочность (Rb) определяли на призмах размером 100×100×400 мм: начальный модуль – в соответствии с ГОСТ 24452 , динамический – путем измерения резонансной частоты вынужденных колебаний.

Все образцы выдерживались в нормальных температурно-влажностных условиях (относительная влажность 95–98%, температура 18–22 ˚С).

В табл. 1 приведены составы смесей с указанием содержания основных компонентов и свойства бетонов. В составах №№ 1, 2, 3 постоянным был общий объем активных компонентов матрицы, т.е. «смешанного вяжущего» (цемент + модификатор), воды и заполнителя фракций меньше 0,63 мм, но варьировалось соотношение между вяжущим и заполнителем. В составах №№ 4–8 при стабильном количестве цемента, модификатора, заполнителя и воды, варьировалось содержание фибры.

**Результаты испытаний**

*О свойствах смесей*. Все образцы бетонных смесей (матрицы и армированные фиброй) имели высокую подвижность – расплыв стандартного конуса – в диапазоне 70–75 см и отличались повышенной связностью-нерасслаиваемостью, что приравнивает их к категории самоуплотняющихся. Исключение составил образец № 8 (табл.1), который, вероятно, в связи повышенной дозировкой фибры, имел подвижность – расплыв конуса 62 см. Замещение до 12% «смешанного вяжущего» заполнителем мелких фракций практически не повлияло на реологические свойства смесей.

*О свойствах бетонов*. На рис.1 показаны тенденции изменения прочности на осевое сжатие и растяжение при изгибе в зависимости от количества фибры в бетонной смеси.

Таблица 1

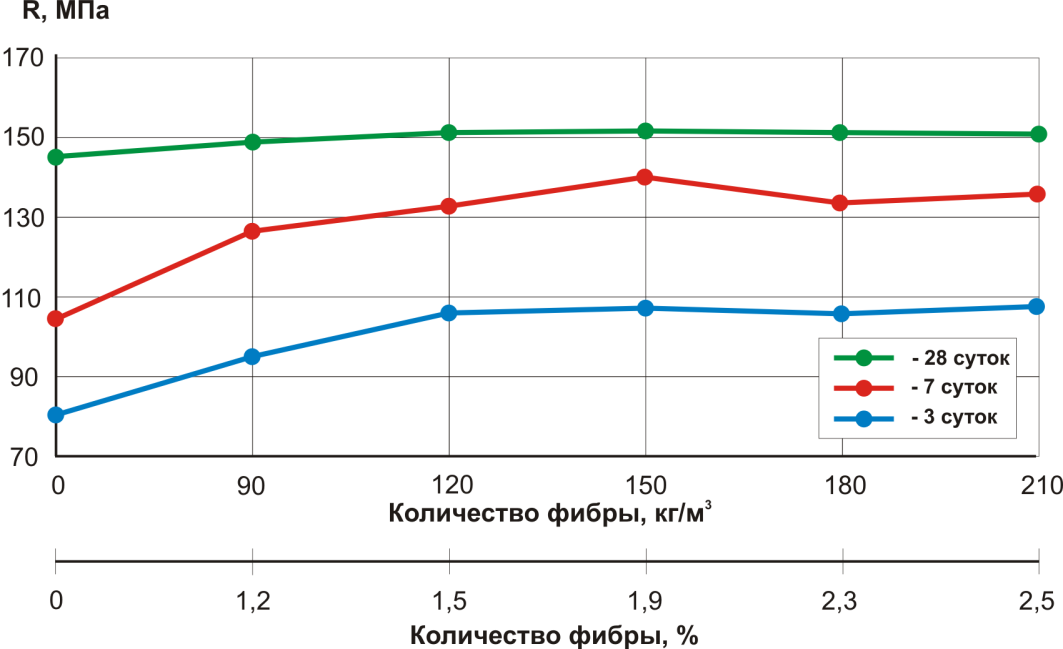
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | Основные компоненты смесей, кг/м3 | | | | | | В/Ц | Объем  АКМ,  м3/м3 | РК,  см | Прочность бетона в 28 сут, МПа | |
| Цемент | МБ-50К | Заполнитель\*) | | Фибра | Вода | R | Rtt |
| Матрица | | | | | | | | | | | |
| 1 | 900 | 360 | 870/430 | - | | 200 | 0,22 | 0,82 | 75 | 145,0 | 13,8 |
| 2 | 800 | 275 | 1010/590 | - | | 205 | 0,26 | 0,81 | 75 | 130,6 | 12,1 |
| 3 | 710 | 190 | 1160/750 | - | | 205 | 0,29 | 0,80 | 75 | 112,0 | 10,5 |
| Фибробетон | | | | | | | | | | | |
| 4 | 880 | 355 | 855/425 | 90 | | 195 | 0,22 | 0,80 | 75 | 148,7 | 18,4 |
| 5 | 875 | 355 | 850/425 | 120 | | 195 | 0,22 | 0,80 | 75 | 150,8 | 19,4 |
| 6 | 865 | 355 | 845/420 | 150 | | 193 | 0,22 | 0,79 | 70 | 151,3 | 21,8 |
| 7 | 860 | 355 | 840/420 | 180 | | 190 | 0,22 | 0,79 | 70 | 150,8 | 23,0 |
| 8 | 860 | 355 | 840/420 | 210 | | 190 | 0,22 | 0,79 | 62 | 151,0 | 21,8 |

----------------------------------------------

\*) Перед чертой указана общая масса заполнителя, за чертой – содержание в нем фракций не более 0,63 мм

Как видно из рис. 1, наибольшие значения прочности на растяжение при изгибе, достигаются при дозировках фибры 150–180 кг/м3, что составляет 2,0–2,3% от объема бетона. Это – своеобразный «порог эффективности» выбранной нами фибры, при котором достигаются лучшие показатели по подвижности смесей и прочности бетона. При меньших дозировках фибры достигается требуемая подвижность смесей, но меньше прочность на растяжение при изгибе, соответственно на осевое растяжение. Превышение этих дозировок приводит к снижению подвижности смесей (см. табл. 1) и практически не способствует приросту прочности.

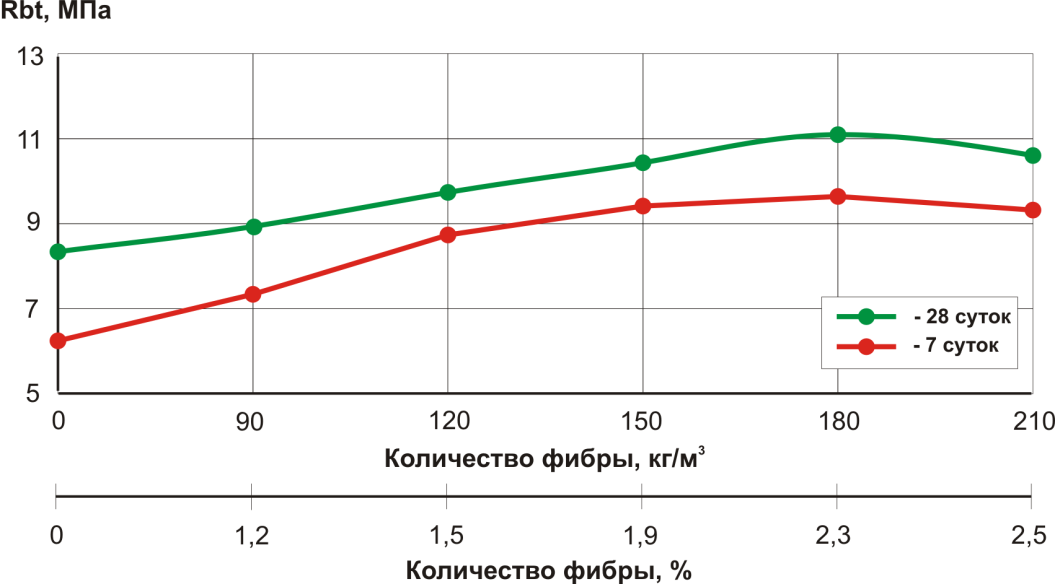
**а) Влияние дозировки фибры на прочность при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток**

****

**б) Влияние дозировки фибры на растяжение при изгибе в возрасте 3, 7 и 28 суток**

****

**в) Влияние дозировки фибры на прочность при растяжении в возрасте 3, 7 и 28 суток**

****

**Рис. 1. Влияние дозировки фибры на пределы прочности при сжатии (а),**

**изгибе (б) и осевом растяжении (в)**

Отметим, что при дозировках фибры на уровне порога эффективности (180 кг/м3) ранее [4] были получены подобные результаты по прочности на сжатие и при изгибе, но другие (заниженные) значения прочности на осевое растяжение. Последнее оказалось следствием специфических особенностей приготовленных для испытаний образцов, которые отличаясь от принятой в ГОСТ 10180, привели к некорректным результатам.

На основании полученных данных, с учетом выявленных зависимостей свойств бетонов от состава смесей приготовлены два образца сталефибробетона для определения деформативных характеристик. Один из них – класса В130, другой – сравнительно экономичный – класса В100 из самоуплотняющейся смеси. Особенностями их составов являлось разное количество смешанного вяжущего, соответственно мелких фракций заполнителя, и равные дозировки фибры и воды. Выбор таких бетонов обоснован необходимостью обеспечить максимальное значение предела прочности при осевом растяжении (9-10 МПа) при минимизированной, за счет сокращения расхода цемента и модификатора, стоимости бетонных смесей.

В табл. 2 приведены основные параметры смесей, прочностные и деформативные свойства указанных бетонов в возрасте 28 сут.

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | | Вид  бетона | Основные компоненты смесей, кг/м3 | | | | | В/Ц | РК,  см | Прочность бетона в 28 сут., МПа | | | | Модуль упругости,  ГПа | | Фактический класс  бетона при коэффи-  циенте вариации 10% |
| Цемент | Фибра | МБ-50К | Заполнители | Вода | R | Rb | Rbt | Rtt | Еb | Един |
| Сверхвысокопрочный бетон | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Матрица | | 900 | - | 360 | 870 | 195 | 0,21 | 75 | 141,2 | 125,6 | 5,5 | 12,0 | 45,3 | 49,3 | В124 |
| 2 | Фибробетон | | 870 | 180 | 350 | 850 | 185 | 0,21 | 75 | 145,8 | 132,5 | 10,1 | 21,0 | 49,0 | 54,6 | В128 |
| Высокопрочный бетон | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Матрица | | 710 | - | 190 | 1160 | 205 | 0,29 | 70 | 112,0 | 101,6 | 4,2 | 10,5 | 42,8 | 44,1 | В98 |
| 4 | Фибробетон | | 700 | 180 | 190 | 1150 | 200 | 0,29 | 70 | 125,0 | 115,4 | 9,7 | 20,2 | 44,2 | 46,5 | В110 |

Как видно, три показателя качества армированных фиброй бетонов, существенно отличающихся между собой расходом цемента и модификатора, практически одинаковы. Подвижность смесей – расплыв стандартного конуса – остается в диапазоне 70–75 см, что соответствует понятию самоуплотняющийся бетон [5], на одном уровне находятся и значения предела прочности на осевое растяжение (диапазон 9,7–10,1 МПа). Незначительно (менее 5%) различаются прочности на растяжение при изгибе (20,2–21,0 МПа). Более существенно (на 12–18%) отличаются значения пределов прочности при сжатии, начального и динамического модулей упругости. Такие результаты связаны с характеристиками матриц, по-разному воспринимающих сжимающие нагрузки, и положительной ролью дисперсного армирования, которое уменьшает различия между двумя неравнопрочными матрицами, повышая сопротивление материала растягивающим напряжениям и нивелируя значения прочностей на растяжение.

Уместно отметить, что значения прочностей и деформативных характеристик получены в возрасте бетонов 28 суток и со временем повышаются. Данные о кинетике изменения характеристик бетонов с органо-минеральным модификатором МБ-50С показывают, что в период от 28 до 180 суток пределы прочности на осевое растяжение и изгиб могут увеличиваться на 28–35% [1, 6].

*Производственный и экономический аспект.* Производство дисперсноармированного бетона с представленными выше характеристиками может осуществляться с использованием доступных материалов (цемента, органо-минеральных модификаторов, стальной фибры, песка оптимизированной гранулометрии) на традиционном для заводов технологическом оборудовании (смесителях принудительного действия), в дополнение к которому должен быть приспособлен дозатор фибры с трактом подачи.

Стоимость бетонов ориентировочно может быть определена по прямым затратам на его производство, т.е. на основании расхода материалов и сложившихся цен на них. В сравнении с высокопрочными тяжелыми бетонами класса В100, которые уже применяются при возведении каркаса высотного здания на одной из площадок «Москва-Сити», стоимость сверхвысокопрочного сталефибробетона классов В110 – В130 из-за присутствия фибры будет в 1,8–2,2 раза выше. Однако целесообразность применения таких бетонов следует оценивать не путем сопоставления стоимости бетонных смесей, а приняв во внимание побочные технические эффекты, позволяющие возводить высокопрочные конструкции и повышать эксплуатационную надежность сооружений.

***Выводы***

1. Строительному производству и проектированию может быть предоставлен сверхвысокопрочный самоуплотняющийся сталефибробетон классов от В100 до В130, отличающийся повышенной удобоукладываемостью и технологичностью, со следующими характеристиками:

* прочность при осевом растяжении(Rbt) не ниже 10 МПа,
* начальный модуль упругости (Еb) в диапазоне 44–50 ГПа при значениях динамического модуля упругости (Един) 46–55 ГПа.

1. Ориентировочная стоимость таких сверхвысокопрочных дисперсноармированных бетонов может превышать стоимость тяжелого бетона класса В100 в 1,8 -2,2 раза. Однако, экономическая целесообразность их применения должна быть основана не на прямом сравнении затрат на производство бетонных смесей, а на получении следующих эффектов:

* повышении надежности( несущей способности) констукций и сооружений, подвергаемых экстремальным динамическим и ударным нагрузкам;
* повышении производительности бетонных работ за счет использования высокоподвижных смесей;
* замещения массивных несущих конструкций из тяжелого бетона со стержневой арматурой на ажурные дисперсноармированные конструкции из сверхвысокопрочного с соответствующим снижением массы сооружений, увеличением полезных площадей на одной и той же площади застройки.

**Библиографический список**

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. // М., ООО «Типография Парадиз», 2010, 258 с.
2. Ambroise J., Rols S., Pera J. Properties of self-leveling concrete reinforced by steel fibers. Proceedings of the 3-d International RILEM Workshop on Reinforced Cement Composites, HPFRCC3, Mainz, 1999, pp.9–17.
3. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. // Бетон и железобетон № 6, 1999, стр.6–10.
4. Мишина А.В., Чилин И.А., Андрианов А.А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона. // Вестник МГСУ № 3, 2011, стр.159–165.
5. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. BIBM, CEMBUREU, ERMCO, EFCA, EFNARC. – May 2005. – 63p.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками. // Бетон и железобетон, № 2, 2006, с.2–7.