

УДК 691.32

## ПРОЧНОСТНЫЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ МИКРОСФЕР ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

**И.А. ЛЕОНОВИЧ**, канд. техн. наук, доц. **И.М. КУЗМЕНКО**, **Е.С. ПАВЛЮК**  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

*Приведены результаты испытаний легкого бетона с заполнителем из алюмосиликатных микросфер, содержащего стеклянную или органическую фибру, пластифицирующие и адгезирующие добавки, придающие материалу повышенную прочность при сжимающей и растягивающей нагрузке. Испытания проводились на стандартных и тонкостенных призмах, изготовленных литьем, набивкой и прессованием. Определена плотность материала при различном содержании микросфер и ее влияние на прочность при сжатии и растяжении. Выявлены особенности диаграммы деформирования, определены границы изменения модуля продольной упругости фибробетона с заполнителем из алюмосиликатных микросфер. Проанализированы особенности разрушения фибробетона при различной прочности матрицы. Для бетона со стеклянной фиброй показана диаграмма удельной прочности и удельного модуля упругости в зависимости от содержания фибры. Определены области использования фибробетона на алюмосиликатных микросферах в строительстве.*

**Введение.** Большинство легких бетонов имеют ограниченное применение в качестве конструктивных материалов из-за недостаточной прочности или из-за невозможности эксплуатации в атмосферных условиях без специальной защиты наружных поверхностей. Использование для производства строительных материалов заполнителей в виде полых сфер, фибры из неметаллических материалов, современных добавок на основе органических соединений создает широкие возможности для получения строительных изделий с заданными свойствами, уровень которых превышает свойства легких бетонов других видов [1 – 3]. В данной работе особое внимание уделялось преодолению этих недостатков легких бетонов за счет управления составом, структурой и свойствами фибробетонов с заполнителем из алюмосиликатных микросфер (АСМ-фибробетоны).

Целью работы являлось количественное определение следующих показателей: плотности, прочности при сжатии и изгибе, модуля продольной упругости. Дополнительно исследовались декоративные свойства лицевых поверхностей образцов из фибробетона с заполнителем из микросфер и возможности окраски в массе.

Управление структурой и свойствами материала осуществлялось изменением рецептуры и технологии изготовления смеси. Применялись три метода изготовления образцов: литье, прессование и набивка. Соответственно водоцементное отношение изменялось в пределах от 0,15 до 0,70 в зависимости от необходимой вязкости и текучести смеси.

Гидравлическим вяжущим являлся портландцемент 500 Д 2,0. В качестве заполнителя использовались алюмосиликатные микросферы размером 30...500 мкм. Они позволяют формировать структуру бетона с зернистостью, соответствующей размеру сфер. Свойства такого материала зависят от концентрации микросфер в смеси и от плотности их упаковки. Содержание заполнителя по отношению к цементу варьировалось в пределах от 0,2 до 1,2 долей по массе.

Алюмосиликатные микросферы (АСМ), извлекаемые из зол уноса теплоэлектростанций, сжигающих твердое топливо, являются отходами производства [3]. Они составляют до 1 % от массы гидрозолоудаления, представляют опасность для окружающей среды из-за повышенной летучести после высыхания и засорения окружающей территории в виде отвалов, поэтому их утилизация позволит улучшить экологическую обстановку.

Насыпная плотность микросфер составляет 0,32...0,45 г/см<sup>3</sup>, плотность материала стенок частиц – 2,5 г/см<sup>3</sup>. При толщине оболочки сферы в 10 % от диаметра с учетом состава газовой фазы внутри сфер (СО<sub>2</sub> – 70; N<sub>2</sub> – 30 %), истинная плотность микросфер составляет 0,6...0,8 г/см<sup>3</sup>. Предел прочности при сжатии микросфер – 15...28 МПа; твердость по шкале Мооса – 5...6 единиц. Микросферы обладают низкой теплопроводностью, составляющей 0,08 Вт/м·К при 20 °С, что дает возможность создавать бетоны с повышенными теплоизолирующими свойствами. Максимальная поверхностная влажность микросфер достигает 0,3 %. Благодаря химической стойкости микросферы не взаимодействуют с растворителями, органическими растворами, водой, кислотами или щелочами. Температура плавления материала микросфер – не ниже 1300 °С. Эти качества микросфер как заполнителей улучшают химическую стойкость

и термостойкость бетонов. При относительно большой легкости микросферы от трех до десяти раз более прочные, чем большинство полых стеклянных сфер, и на 50...200 % их дешевле.

Использовались волокна марок: полиакрилонитриловые (ПАН) Ricem 8; стеклянные длиной 12 мм.

Часть образцов выполнялась без добавления фибры для определения свойств матричного состава.

В состав смеси вводились пластификаторы. В составе для литья использовался суперпластификатор Перамин SMФ-10, в составах для прессования и набивки с малым водоцементным отношением (ВЦ = 0,15...0,25) – пластификаторы Sica Visco Crete-20 HE Rus или Starvis-3003 F. Для повышения прочности сцепления цементного камня с поверхностью микросфер и фибры в часть исследуемых смесей вводились адгезивы, типа Виннапаса RL 551 Z.

Все компоненты, включая фибру, перемешивались, после чего постепенно добавлялась вода в заданном водоцементном отношении, и вся смесь доводилась до соответствующего способу изготовления образцов вязкого состояния. Из полученной смеси изготавливались (литьем, прессованием или набивкой) образцы, которые помещались в полиэтиленовую пленку для набора контролируемой прочности в 28-суточном возрасте.

Образцы изготавливались двух видов: стандартные призмы размером 40×40×160 мм и тонкостенные призмы размером 10×10×160 мм. Изготовление нестандартных образцов было связано с необходимостью выявления отклонений в свойствах материала, если таковые имелись, из-за особенностей распределения фибры в тонкостенных ограждающих и теплоизолирующих элементах, для которых предполагалось практическое применение АСМ-фибробетона. Стандартные призмы изготавливались литьем с виброуплотнением при ВЦ = 0,5; тонкостенные призмы нарезались из пластин, выполненных набивкой или прессованием при ВЦ = 0,15...0,7. После набора 28-суточной прочности и уточнения размеров образцы взвешивались на электронных весах, рассчитывалась их плотность.

Стандартные призмы испытывались на статический изгиб и сжатие согласно СТБ ЕН 196-1-2000 «Методы испытания цемента. Часть 1. Определение прочности». Предел прочности на растяжение при изгибе и модуль продольной упругости для тонкостенных призм определялись при трехточечном изгибе, опираясь на СТБ 1374-2003 «Плиты облицовочные бетонные. Технические условия».

Испытательная установка, обеспечивающая приложение нагрузки до 1000 Н с погрешностью ± 1 %, содержала раму, на которой крепился динамометр типа ДОРМ-0,1, связанный с нагружающим винтом и изгибающими приспособлениями. При вращении гайки винта общая длина резьбовой пары уменьшалась, образец изгибался под действием верхнего ролика, индикатор динамометра фиксировал нагрузку, а закрепленный на раме в контакте с образцом индикатор регистрировал прогиб на расстоянии 40 мм от левой опоры. Образцы нагружали (начиная с 30 Н и до разрушения) со скоростью 10 Н/с. Показания индикаторов снимали при условной стабилизации результатов, когда скорость деформации не превышала 0,01 мм/мин. Вычисления производились с точностью до 0,01 МПа как среднее арифметическое значений результатов испытаний трех образцов.

Механические свойства исследуемого композитного материала зависят во многом от его плотности  $\rho$ , которая в свою очередь зависит от содержания микросфер в смеси и от способа изготовления образцов, т.е. от плотности упаковки заполнителя (рис. 1).

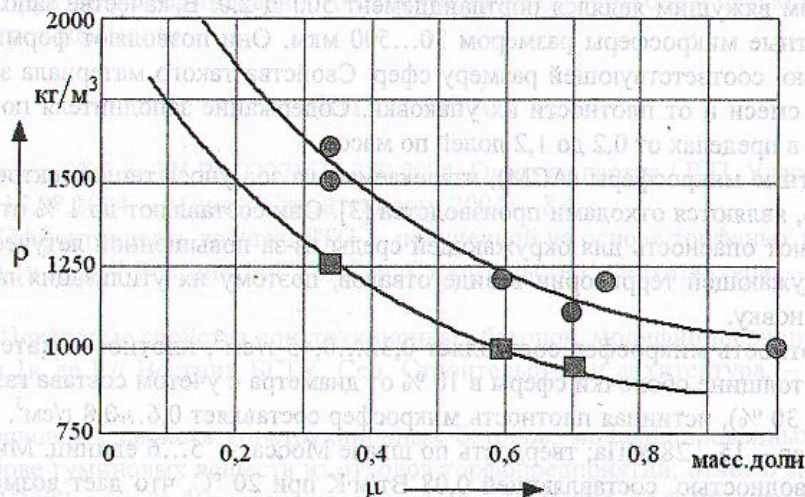


Рис. 1. Влияние содержания заполнителя из микросфер на плотность бетона  $\rho$ :

$\mu$  – отношение массы микросфер к массе цемента;

■ – образцы, выполненные литьем; ● – образцы, выполненные прессованием

Содержание микросфер по отношению к цементу по массе  $\mu$  варьировалось от 0,33 до 0,75 для литых образцов, и от 0,33 до 1,00 – для прессованных образцов. Плотность при этом изменялась в пределах от 850 до 1700 кг/м<sup>3</sup>, причем плотность образцов, выполненных прессованием, оказалась на 18...25 % выше, чем у образцов, выполненных литьем.

Известна линейная зависимость между плотностью и теплопроводностью легких бетонов, согласно которой ожидаемая теплопроводность АСМ-фибробетона составит 0,2...0,55 Вт/м·К. По приведенным показателям АСМ-фибробетон можно отнести к теплоизоляционно-конструкционным легким бетонам.

Для фибробетона с заполнителем из алумосиликатных микросфер зависимость прочности на сжатие от плотности оказалась такой же, как для других видов легких бетонов, при более высоком уровне разрушающих напряжений (рис. 2) [4]. Разница связана, по-видимому, с высокой прочностью оболочек микросфер, соизмеримой с прочностью цементной матрицы, и наличием в составе АСМ-бетона высокоэффективных полимерных добавок. В образцах, содержащих полиакриловую фибру (0,66 % от массы сухой смеси), предел прочности на сжатие составил 26,6 МПа, что соответствует классу прочности В22,5 и относит АСМ-фибробетон к разряду конструкционных бетонов.

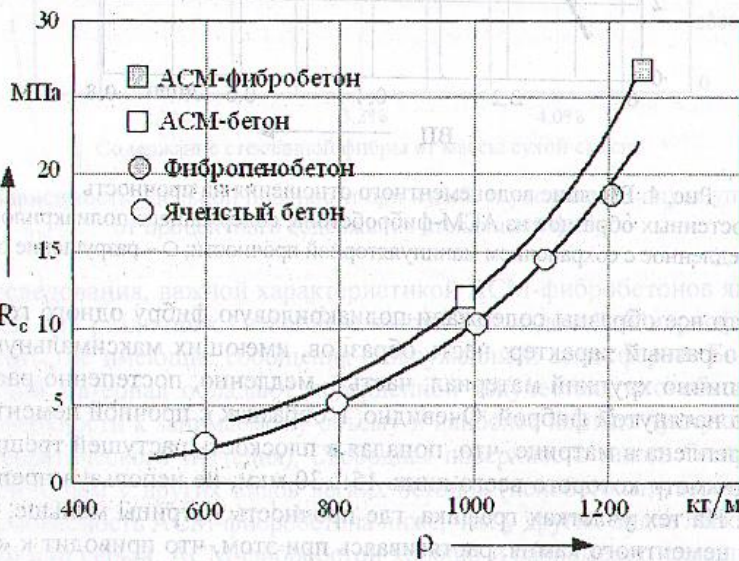


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие  $R_c$  от плотности  $\rho$  для нескольких видов легких бетонов.

Указанная на рисунке 2 зависимость соблюдается, если содержание фибры не превышает 1,5 % и распущенная объемная фибра не приводит к технологическим трудностям при замесе и неравномерной структуре бетона, что отрицательно сказывается на его прочности.

Влияние плотности АСМ-фибробетона на его прочность при статическом изгибе, полученное для тонкостенных призм, показано на рисунке 3.

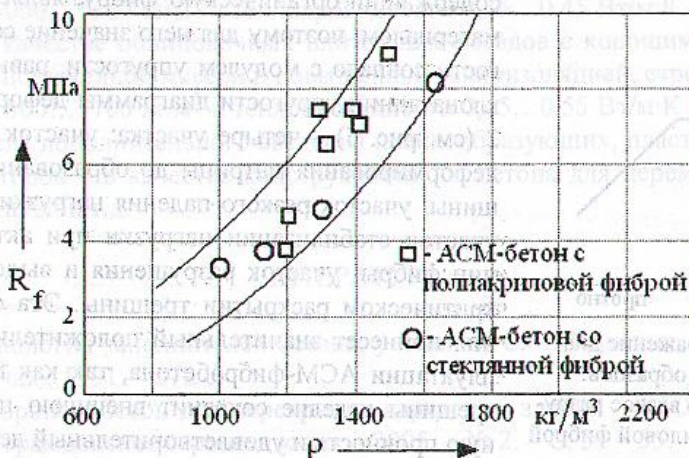


Рис. 3. Зависимость прочности на растяжение  $R_f$  от плотности  $\rho$  в образцах из АСМ-фибробетона

При указанной плотности фибробетон на алумосиликатных микросферах имеет довольно высокий предел прочности на растяжение при изгибе с довольно большим разбросом значений для аналогичных по составу образцов, что связано со многими другими факторами, влияющими на прочность материала.

Прочность исследуемых тонкостенных образцов при трехточечном изгибе оказалась в пределах от 3 до 8,9 МПа для различных серий образцов, сформированных в зависимости от изменения того или иного параметра. Классической оказалась зависимость между прочностью и водоцементным отношением, показанная на рисунке 4. Максимальная прочность при изгибе была достигнута при ВЦ = 0,4...0,5 единиц.

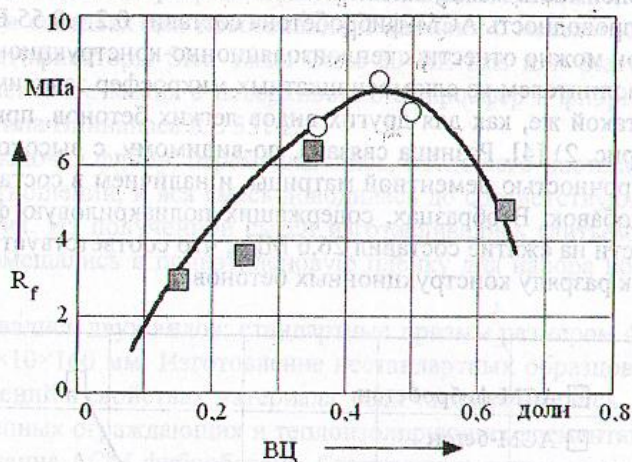


Рис. 4. Влияние водоцементного отношения на прочность при изгибе тонкостенных образцов из АСМ-фибробетона, содержащего полиакриловую фибру:

■ – разрушение образцов медленное с сохранением манипуляторной прочности; ○ – разрушение стремительное, хрупкое

Несмотря на то, что все образцы содержали полиакриловую фибру одного геометрического параметра, разрушение имело разный характер: часть образцов, имеющих максимальную прочность, разрушалась внезапно, как типично хрупкий материал; часть – медленно, постепенно раскрывая магистральную трещину, связанную натянутой фиброй. Очевидно, в образцах с прочной цементной матрицей фибра настолько сильно закреплена в матрице, что, попадая в плоскость растущей трещины, разрывается по поперечному сечению, диаметр которого всего лишь 15...30 мкм, не используя преимущества своей высокой деформативности. На тех участках графика, где прочность матрицы меньше, фибра может постепенно освобождаться из цементного камня, растягиваясь при этом, что приводит к «мягкому» характеру разрушения. Более того, эти образцы до конца не разрушились при испытаниях, а сохранили еще достаточно высокую манипуляторную прочность. Поэтому для таких образцов следует говорить об условной прочности при изгибе.

Иллюстрацией разного характера разрушения образцов является диаграмма деформирования в координатах нагрузка – прогиб (рис. 5). Линия 1 (см. рис. 5) имеет один участок, причём нами замечено, что бетон на алюмосиликатных микросферах без фибры является нелинейно-упругим материалом, как и пескобетон; АСМ-бетон, содержащий органическую фибру, является линейно-упругим материалом, поэтому для него значение секущего модуля упругости совпало с модулем упругости, равным тангенсу угла наклона линии упругости диаграммы деформирования. На линии 2 (см. рис. 5) – четыре участка: участок упругопластического деформирования матрицы до образования магистральной трещины, участок резкого падения нагрузки (примерно на 40 %); участок стабилизации нагрузки при активном деформировании фибры; участок разрушения и выдергивания фибры при критическом раскрытии трещины. Эта особенность разрушения принесет значительный положительный эффект при эксплуатации АСМ-фибробетона, так как при малом раскрытии трещины изделие сохранит внешнюю целостность, достаточную прочность и удовлетворительный декоративный вид.

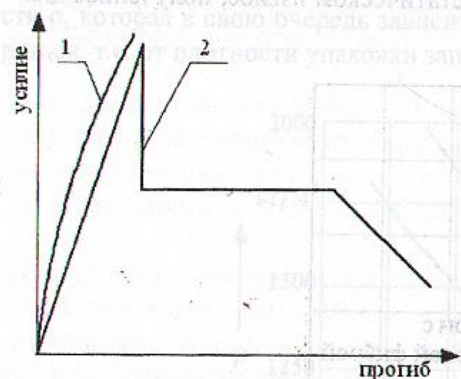


Рис. 5. Схематичное изображение диаграмм деформирования образцов:

1 – хрупкое разрушение; 2 – вязкое разрушение в образцах с полиакриловой фиброй

В ходе проведения испытаний на трехточечный изгиб определялся начальный модуль упругости АСМ-фибробетона, который зависит от нескольких факторов: от собственных модулей упругости входящих компонентов; процентного содержания фибры и алюмосиликатных микросфер; водоцементного отношения и прочности цементной матрицы и т.д. [4]. Значение модуля упругости для бетона плотностью 1240 кг/м<sup>3</sup> с содержанием полиакриловой фибры 0,66 % при разном ВЦ получилось в промежутке от 6,7 до 13 ГПа. Для бетона со

стеклянной фиброй построена диаграмма, отражающая зависимость удельной прочности при изгибе и удельного модуля упругости от процентного содержания фибры по массе (рис. 6).

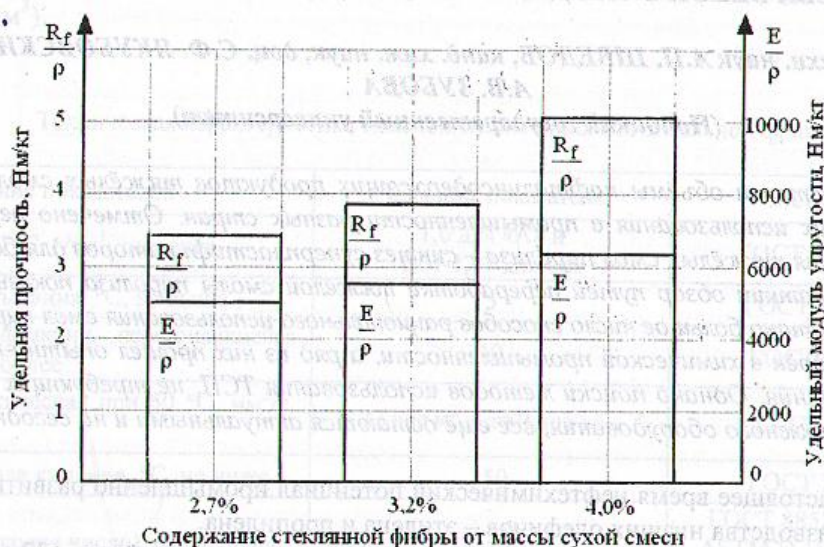


Рис. 6. Зависимость удельной прочности при изгибе и удельного модуля упругости от процентного содержания стеклянной фибры

Как показали исследования, важной характеристикой АСМ-фибробетонов является формирование свободных поверхностей при различных способах изготовления изделий. Микросферы в фибробетоне образуют замкнутые пустоты, не имеющие сообщения с окружающей атмосферой. Благодаря форме частиц, микросферы как сыпучий материал обладают повышенной текучестью, что обеспечивает минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактную укладку (коэффициент укладки – 60...80 % от теоретического значения). Свободная поверхность такого бетона является достаточно плотной и менее пористой, чем у других видов легких бетонов (пенобетоны, газосиликатные бетоны). Это приводит к тому, что намокаемость АСМ-фибробетона ниже, чем у других видов легких бетонов. Природный цвет микросфер – белый или серый. АСМ-фибробетон хорошо и равномерно окрашивается светостойкими неорганическими красителями железистого типа, оксидами хрома и марганца в светлые и темные тона. Изделия из такого материала могут эксплуатироваться без какой-либо дополнительной обработки.

**Заключение.** Полученные в результате исследований свойств АСМ-фибробетона сведения позволили определить целесообразные сферы использования этого уникального материала:

- при плотности 850...1000 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводности 0,2...0,35 Вт/м·К с гарантированной прочностью до 12 МПа – как легкого бетона для огнестойких и теплоизоляционных перегородок без устройства специальных теплоизоляционных слоев;
- при плотности 1000...1300 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводности 0,35...0,45 Вт/м·К с гарантированной прочностью до 25 МПа – в качестве облицовочных плиток для фасадов с хорошими свойствами наружной поверхности, кирпича с пониженной массой и повышенной теплоизоляцией, строительных блоков;
- при плотности 1300...1700 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводности 0,45...0,55 Вт/м·К с гарантированной прочностью до 35 МПа – после дополнительного введения пленкообразующих, пластифицирующих, клеящих добавок и гидрофобизаторов – в качестве конструкционного бетона для перемычек, плит перекрытий, литых строительных деталей и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович, С.М. Технология заполнителей бетона: учебник / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженков. – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.
2. Богатина, А.Ю. Фибропенобетон для перекрытия каркасных зданий / А.Ю. Богатина, Л.В. Моргунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 2. – С. 34 – 35.
3. Золы-уносы тепловых электростанций для бетонов. Технические условия: ГОСТ 25818-91. – Введ. 01.07.91. – М.: Госстрой СССР, 1991. – 14 с.
4. Леонович, И.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона / И.А. Леонович, А.А. Леонович // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2007. – № 3. – С. 148 – 155.

Поступила 30.10.2007