

Ирина Анатольевна ЛЕОНОВИЧ, кандидат технических наук,  
доцент кафедры "Сопротивление материалов"  
Белорусско-Российского университета

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ, доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой "Технология бетона  
и строительные материалы"  
Белорусского национального технического университета

## ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ПРЕССОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА, ПОРИЗОВАННОГО МИКРОСФЕРАМИ ЗОЛ УНОСА, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФАСАДНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЯХ

### OPTIMIZING THE PROPERTIES OF PRESSED FIBER CONCRETE POROUSSED BY FLY-ASHES MICROSPHERES FOR USE IN THIN-WALLED FACADE PRODUCTS

*В статье обобщены результаты исследований фибробетона на заполнителе из микросфер зол уноса, позволившие подобрать оптимальный состав и режимы безвибрационного прессования для производства из него тонкостенных (не более 10 мм) фасадных элементов высокой долговечности.*

*The paper summarizes the research results of fiber concrete on the fly-ashes microsphere filler, for the best composition and modes of vibration-free pressing for the production of thin-walled (no more than 10 mm) facade elements of high durability.*

#### ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике фасадостроения широко используются фиброцементные плиты толщиной 6–10 мм, изготовленные на основе белого или цветного цемента, армируемого неметаллическим волокном, с заполнителем, позволяющим снизить плотность материала до 1200–1600 кг/м<sup>3</sup>, что в совокупности с высокой прочностью на растяжение при изгибе и ударное воздействие обеспечивает значительный эффект в плане снижения материалоемкости и веса всей конструкции. Аналогичные изделия из отечественных материалов и по более доступной цене могут быть востребованы в больших объемах для реконструкции жилого фонда старой постройки, который составляет по Республике Беларусь около 170 млн м<sup>2</sup> [1]. Эстетическая и тепловая реабилитация фасадов этих зданий может проводиться модульными панелями или малоразмерными плитами, обладающими, по возможности, малым весом, архитектурной выразительностью внешнего вида и долговечностью, соизмеримой со сроком службы здания. В Беларуси ведутся (помимо авторских) научно-исследовательские работы по означенному направлению, например [2, 3], но с другими подходами к технологии и составу фибробетона.

Применение тонкостенных фибробетонных элементов для облицовки фасадов тормозится в частности существующей нормативной базой. Отечественным производителям приходится опираться на соответствующие стандарты, согласно которым для трехслойной стеновой панели номинальная толщина наружного слоя из тяжелого (легкого) бетона должна быть не менее 50 (60) мм для ненесущего слоя и 65 (80) мм — для несущего [4]. Согласно [5], облицовочные однослойные плиты из мелкозернистого бетона должны выполняться толщиной не менее 20 мм, что не учитывает возможность снижения толщины за счет применения современных материалов на основе дисперсного или сеточного (регулярного) армирования синтетическим волокном.

В статье приводятся результаты исследований фибробетона на заполнителе из алюмосиликатных микросфер, которые позволили определить рациональное содержание основных компонентов и режимы прессования материала, обеспечивающие требуемый спектр его эксплуатационных свойств для применения в фасадных тонкостенных изделиях.

#### СОСТАВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА

Отработка состава легкого фибробетона, предназначенного для использования в тонких наружных слоях ограждающих конструкций, решалась на основе следующих предпосылок: вяжущее — бездобавочный цемент, заполнитель должен быть поризованной структуры с высокими прочностными свойствами, модификация структуры обеспечивается за счет использования полимерных пластифицирующих добавок и дисперсного армирования синтетическим волокном.

В исследованиях использовали портландцемент ПЦ 500-Д0 активностью  $R_{ц} - (50 \pm 1,5)$  МПа, коэффициентом нормальной густоты  $K_{нр} \sim 0,27$ , плотностью  $\rho - 3100$  кг/м<sup>3</sup>. Для затворения бетона использовали водопроводную воду, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114-98 "Вода для бетонов и растворов. Технические условия".

В качестве заполнителя применяли алюмосиликатные микросферы зол уноса производства РФ, размерами 30–500 мкм, толщиной оболочки в 10 % от диаметра микросфер (0,1D), прочностью на сжатие в цилиндре 15–28 МПа. Насыпная плотность микросфер составляет 320–450 кг/м<sup>3</sup>, они характеризуются радиопрозрачностью, термостойкостью (температура плавления не ниже 1300 °С), химической стойкостью к растворителям, кислотам и щелочам. Благодаря этому при использовании микросфер в качестве заполнителя можно существенно повысить химическую и термическую стойкость бетона [6, 7].

Для дисперсного армирования использовали полиакрилонитриловую фибру Rісет, длиной 8 мм и диаметром 15–17 мкм, которая по отношению к легкому бетону

является среднемодульной, что способствует более однородному распределению напряжений в материале при знакопеременных деформациях под воздействием среды. Сцепление поверхности полиакриловой фибры с цементным камнем — удовлетворительное. Рассматривали также возможность использования полипропиленовой и стеклянной фибры.

В качестве пластифицирующей добавки применяли суперпластификатор Peramin (SMФ-10), который представляет собой порошок сульфоната меламина, не содержит хлорид-ионов, способствует снижению содержания воды на 15–20 % и равномерному распределению волокон фибры, придавая однородность смеси [8].

Для повышения прочности сцепления цементного камня с поверхностью заполнителя и фибры в состав исследуемого бетона вводили добавку "Виннапас" (RL 551Z), которая по химической природе является тройным сополимером этилена, виниллаурата и винилхлорида [9]. Она также способствует росту прочности бетона на растяжение при изгибе, повышает деформативность (в том числе и при низких температурах), снижает проницаемость бетона за счет колыматации пор, что особенно существенно для фасадных материалов.

Твердофазные компоненты, включая фибру и добавку Peramin FP, перемешивали, после чего добавляли воду в количестве, соответствующем способу изготовления образцов. Перемешивание осуществляли на лабораторном смесителе принудительного принципа действия. Из полученной смеси изготавливали образцы, которые (вначале в форме, а потом после распалубки) твердели в условиях герметизации полиэтиленовой пленкой до 28-суточного возраста.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИБРОБЕТОНА НА ЗАПОЛНИТЕЛЕ ИЗ МИКРОСФЕР ЗОЛ УНОСА

Выбор технологии прессования для изготовления фасадных тонкостенных плит или внешних слоев стеновых конструкций связан с необходимостью получения четкого отпечатка лицевой поверхности, манипуляторной прочности свежеотформованного бетона, достаточной для бездефектной немедленной распалубки изделий, что предполагает использование жестких бетонных смесей. Требуемая удобоукладываемость бетона достигалась применением высокоэффективных пластифицирующих добавок, что позволило отказаться от энергоемкого вибрационного воздействия.

Учитывая особенность заполнителя (полые сферы), требовалось решить задачу определения допустимого и достаточного усилий прессования для получения оптимальной структуры материала: цельные сферы, упакованные в плотной среде цементного камня. В результате проведенных исследований [10, 11] разработана теоретическая модель прочности оболочки сферы в условиях всестороннего сжатия, возникающего при прессовании, адекватно отражающая взаимосвязь между действующим усилием прессования и свойствами микросфер: прочностью материала их стенок  $\sigma_v$  и отношением толщины стенки  $\delta$  к внешнему диаметру микросферы  $D$

$$p_v = 2\sigma_v \cdot \ln\left(1 - 2\frac{\delta}{D}\right)^{-1} \quad (1)$$

Полученная зависимость позволила доказать возможность использования характеристики "прочность

микросфер на сжатие в цилиндре" в качестве верхней границы давления при прессовании бетона, поризованного микросферами: для толстостенных микросфер — с фактически имеющимся запасом прочности; для тонкостенных микросфер — с введением коэффициента запаса прочности. Установлено, что для бетонов с заполнителем из алюмосиликатных микросфер верхняя граница рабочего давления прессования бетона находится в пределах 15–28 МПа в зависимости от прочности применяемых микросфер. Минимальное давление, которое обеспечивает формирование качественной структуры уплотняемого бетона, определенное экспериментально, составило 2,0–2,4 МПа. В дальнейшем, образцы фибробетона для испытаний и облицовочные плиты опытной партии изготавливали при давлении 3,0 МПа (установленном как рациональное значение по результатам экспериментов) и скорости подачи нагрузки ~5,0 кН/с из смеси жесткостью 10–15 с.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФИБРОБЕТОНА

Исследуемый фибробетон предназначен для использования в наружном слое облицовочных плит и стеновых панелей, который находится под воздействием изменяющихся погодных условий (механических, температурных, влажностных, химически и радиоактивно агрессивных сред) и силовым воздействием статического и ударного характера при транспортировании, монтаже и эксплуатации. Большинство перечисленных воздействий вызывают в материале деформации растяжения и сжатия, возникающие при изгибе панели или плиты. В связи с тем, что для бетонов сопротивление растяжению является критическим свойством, прочность на растяжение при изгибе принята в качестве основного параметра оптимизации механических свойств [11].

#### Сопротивление механическому воздействию (прочностные свойства)

Определение прочности фибробетона на растяжение при изгибе осуществляли на образцах размерами 10×40×160 мм, вырезанных из прессованной плиты, по схеме нагружения [12] на установке, обеспечивающей приложение нагрузки до 1000 Н с погрешностью ±1 %.

Для выявления основных закономерностей, связывающих состав многокомпонентного фибробетона с прочностью на растяжение при изгибе, применяли методы математического планирования эксперимента, давшие адекватный результат в условиях трехфакторного эксперимента второго порядка. Получено уравнение регрессии, отражающее взаимосвязь и взаимозависимость прочности поризованного микросферами фибробетона на растяжение при изгибе ( $Y$ , МПа) от содержания его компонентов (по сухому веществу) в заданных условиях планирования трехфакторного эксперимента:  $X_1$  — фибра/цемент (1–2 %),  $X_2$  — "Виннапас"/цемент (6–10 %),  $X_3$  — заполнитель/цемент (33–99 %):

$$Y = 4,273 + 0,348X_1 + 0,35X_2 - 2,444X_3 + 1,36X_3^2 - 0,2X_1 \cdot X_2 \quad (2)$$

Для остальных факторов соблюдали условие их постоянства, в частности образцы изготавливали с удельным давлением прессования 3 МПа. В состав смеси добавляли суперпластификатор Peramin FP (SMФ-10)

в количестве 0,5 % от массы цемента (по сухому веществу); жесткость бетонной смеси поддерживали постоянной (10–15 с), что, учитывая варьирование содержания микросфер в довольно больших пределах, вызывало соответствующие изменения в расходе воды.

Диаграмма, показанная на рис. 1, отражает общую закономерность изменения прочности на растяжение при изгибе по модели (2) в зависимости от содержания микросфер и полиакрилонитриловой фибры при "среднем" расходе добавки "Виннапас" (8 %) в соответствии с областью планирования эксперимента. С увеличением содержания микросфер (в качестве пористого заполнителя) прочность фибробетона закономерно снижается. Для обеспечения требуемой прочности на растяжение при изгибе ( $\geq 7,5$  МПа [5]) следует ограничиться соотношением  $З/Ц \leq 33-40$  % при соответствующем выборе расходов фибры и адгезива с одновременным обеспечением условий формирования плотной структуры бетона, качества его лицевой поверхности и достигнутым требуемых эксплуатационных свойств для фасадных элементов. Дальнейшие исследования прочностных свойств бетона проводили для состава, содержащего по отношению к массе цемента (100 %) сухих компонентов: 33,0 % микросфер, 1,0 % фибры, 6,0 % добавки "Виннапас" и 0,5 % суперпластификатора Peramin FP. Учитывая высокую адсорбционную способность поверхности волоконной фибры и заполнителя из алюмосиликатных микросфер, требовалось определить оптимальное общее водоцементное отношение, обеспечивающее максимальную прочность фибробетона.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить квадратичные уравнения регрессии, по которым построены графики зависимо-

стей от общего водоцементного отношения: *A* — прочности на растяжение при изгибе; *B* — ударной вязкости (рис. 2).

Максимальная прочность на растяжение при изгибе для исследуемого состава достигала значений 7,5–8,4 МПа при общем водоцементном отношении  $(В/Ц)_{общ} \sim 0,4-0,5$ , которое могло бы считаться оптимальным. Однако для фибробетонов ограждающих конструкций особо ценным является свойство сохранения целостности изделий благодаря "остаточной" прочности после появления магистральной трещины, которой образцы из такого бетона не обладали, так как разрушение происходило стремительно — по хрупкому типу. В отличие от этого, часть образцов, изготовленных при  $(В/Ц)_{общ} \sim 0,50-0,55$ , показали на момент образования первоначальной трещины прочность 7,6–7,5 МПа соответственно, но не разрушились окончательно. То есть после появления трещины целостность образца сохранялась за счет натянутого в его просвете армирующего волокна, а при снятии нагрузки на образец трещина закрывалась. Для отделения частей образца друг от друга требовалось приложить дополнительное изгибающее усилие, необходимое для разрыва волокон фибры или вытягивания их из матрицы. Фибробетон при таком "вязком" (пластичном) разрушении способен длительное время сохранять свою функциональность, обеспечивая дальнейшую эксплуатацию изделий, например облицовочных плит и стеновых панелей. Следует отметить, что по отечественным стандартам величина остаточной прочности не определяется, хотя в зарубежных нормативах по фибробетону (BS EN 14651:2005, BS EN 14488, ASTM C 1399, ASTM C 1609, DIN 1048 (58) и др.) предлагаются разные методики для ее оценки.

Испытания по определению ударной вязкости проводили на образцах размерами 10×25×70 мм по методике, применяемой при испытаниях образцов листового асбестоцемента [13]. Использовали модернизированный для этих исследований маятниковый копр 2083KM-04, позволяющий регистрировать работу разрушения менее 2 Дж. Модернизация заключалась в снабжении копра механическим устройством для точной фиксации угла подъема маятника после разрушения образца.

Результаты испытаний образцов бетона (в каждой серии — по три образца) подтвердили положительное влияние фибры на ударную вязкость, значение которой для бетона без фибры находилось в пределах от 540 до 700 Дж/м<sup>2</sup>, а для фибробетона — от 750 до 2400 Дж/м<sup>2</sup>.

Для указанного ранее состава зафиксированы минимальные значения ударной вязкости (750–1000 Дж/м<sup>2</sup>) при общем водоцементном отношении 0,25–0,45 (см. рис. 2). Причем с меньшим начальным водосодержанием бетона величина ударной вязкости была несколько больше, но структура материала не отвечала требованиям по плотности и качеству лицевой поверхности. Стабильный рост ударной вязкости (от 1000 до 2400 Дж/м<sup>2</sup>) зафиксирован при изменении общего водоцементного отношения от 0,45 до 0,62, что доказывает необходимость обеспечения соответствующих "условий работы" фибры в бетонной матрице целенаправленным формированием оптимальной структуры материала во взаимосвязи с качеством сцепления поверхности фибры с цементным камнем [14–16].

Установлено, что жесткая связь (сцепление) фибры с матрицей, способствуя росту прочности фибробетона, одновременно противодействует развитию

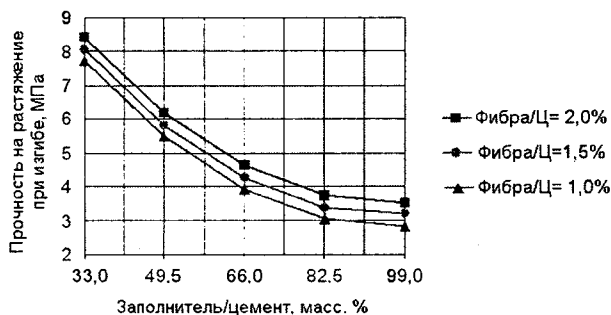
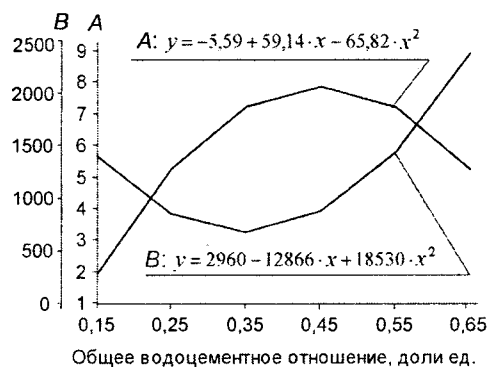


Рис. 1. Характер изменения прочности фибробетона в зависимости от содержания микросфер и фибры ("Виннапас")/Ц = 8 %



*A* — прочность на растяжение при изгибе, МПа;  
*B* — ударная вязкость, Дж/м<sup>2</sup>

Рис. 2. Взаимосвязь между прочностными характеристиками фибробетона и водоцементным отношением

упругопластических деформаций в зоне образования трещин и придает разрушению бетона хрупкий характер. Регулируя свойства контактной зоны "матрица — волокно" увеличением расхода добавки-адгезива или подбором водоцементного отношения (с целью уменьшения сил сцепления в контактной зоне), можно обеспечить условия для растяжения фибры и частичного ее "проскальзывания" по поверхности контакта в зоне образования трещины, что обеспечивает сохранение целостности волокон фибры и придает разрушению "пластичный" характер, а в результате повышает ударную вязкость материала. Для указанного ранее состава фибробетона оптимальным с этих позиций является  $(В/Ц)_{\text{общ}} \sim 0,50-0,55$ , при котором материал обладает достаточными прочностными свойствами в совокупности с рассмотренным "пластичным" характером разрушения, обеспечивая повышение эксплуатационной надежности фасадных элементов ограждающих конструкций.

*Начальный модуль упругости* фибробетона оценивали по соотношению "нагрузка — деформация" при испытаниях образцов на статический изгиб. Была выявлена его зависимость от основных факторов: собственных модулей упругости входящих компонентов, процентного содержания "Виннапаса" и алюмосиликатных микросфер, водоцементного отношения и прочности цементной матрицы. Оказалось, что полиакрилонитриловая фибра (ее расход) существенно не влияет на модульность поризованного микросферами бетона, так как характеризуется соизмеримыми с ним модулем упругости и плотностью.

Определение *прочности фибробетона на сжатие* проводили на литых образцах размерами  $40 \times 40 \times 160$  мм по методике стандартных испытаний [12]. Результаты экспериментальных исследований подтвердили прямую зависимость роста прочности бетона на сжатие от его средней плотности и эффективность применения дисперсного армирования полиакрилонитриловой фиброй. Причем увеличение содержания фибры более чем на 1 % от массы цемента оказалось нецелесообразным. Для ранее указанного состава фибробетона прочность на сжатие соответствовала 27–28 МПа, что удовлетворяет требованиям стандарта [5], согласно которым материал плит, предназначенных для облицовки наружных поверхностей зданий и сооружений, должен обладать классом прочности на сжатие В20 ( $C^{16}/_{20}$ ).

#### Сопротивление температурно-влажностному воздействию (физические свойства)

С учетом планируемого использования разрабатываемого фибробетона в фасадных облицовочных плитах исследовали возможность минимизации *водопоглощения* этого материала, а также его *деформативность* при многократном увлажнении-высушивании, от которых зависят эксплуатационная надежность и долговечность изготавливаемых изделий. Исследования показали, что при средней плотности  $\rho^0 \sim 850$  кг/м<sup>3</sup> и максимальном содержании микросфер ( $З/Ц = 100$  %) водопоглощение по массе без введения химических добавок может достигать 15 %, а деформации набухания при увлажнении — 1,6 мм/м, что не удовлетворяет требованиям для наружных облицовочных бетонных плит [5]. С целью уменьшения водопоглощения и, как следствие, повышения морозостойкости и долговечности бетона использовали добавку-пластификатор Peramin FP

(SMФ-10) в дозировке 0,5 % от массы цемента по сухому веществу (снижая начальное водосодержание бетона) и добавку "Виннапас".

Влияние добавки "Виннапас" иллюстрируют экспериментальные данные (рис. 3) об изменении водопоглощения (по массе) поризованного микросферами фибробетона в зависимости от степени поризации (содержания алюмосиликатных микросфер) и расхода адгезива в прессованных образцах. Установлено, что обеспечение нормативных показателей [5], соответствующих  $W_m \leq 6-8$  % для бетона внешних слоев наружных стен, достигается при дозировке добавки "Виннапас" 4–8 % в бетонах с рекомендуемым соотношением микросфер и цемента  $З/Ц = 33$  %. Дальнейшее снижение водопоглощения такого бетона (до  $W_m \sim 2,5$  %) может быть обеспечено нанесением на поверхность наружных стен гидрофобизирующих составов. Одновременно было установлено, что увеличение размеров образцов исследуемого фибробетона с добавками пластификатора и адгезива при водонасыщении составило 0,10–0,08 %. Это соизмеримо с показателями мелкозернистого цементобетона, а в случае обработки поверхности образцов бетона гидрофобизатором водонасыщение снизилось до 0,06 % [11].

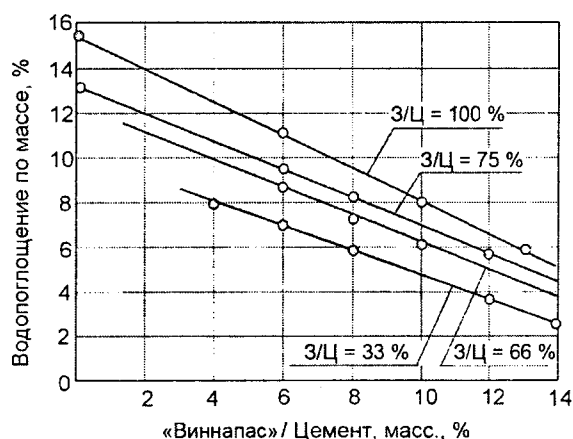


Рис. 3. Водопоглощение прессованных образцов в зависимости от содержания добавки "Виннапас" (RI 551Z) и заполнителя (микросфер)

Оценку *морозостойкости* фибробетона, поризованного микросферами зол уноса, осуществили по методике базового метода для бетонов общестроительного назначения действующих стандартов [17, 18], используя прессованные образцы размерами  $10 \times 40 \times 160$  мм с содержанием микросфер 33 % от массы цемента. Через 150 циклов замораживания-оттаивания в бетоне не наблюдались признаков разрушения и снижения прочности на растяжение при изгибе, а вес образцов увеличился на 2,3–4,0 %. После этого испытания были прекращены, так как по требованиям [5] показатель морозостойкости для плит, предназначенных для облицовки наружных поверхностей зданий, должен быть не менее F150; по требованиям [4] для мелкозернистых бетонов наружного основного слоя многослойных панелей — не менее F100 (для легкого бетона — не менее F50), что ниже определенного в испытаниях.

В процессе испытаний на морозостойкость был оценен ИК-спектр ряда образцов поризованного микросферами фибробетона. В результате обнаружено присутствие аморфного кремнезема и в образцах, ис-

питанных на морозостойкость (после 100 циклов), и в образцах, твердевших в течение года в нормально-влажностных условиях:  $t \sim (20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ,  $\varphi \geq 90\%$  (рис. 4). Это свидетельствует, с одной стороны, о продолжении процесса гидратации цемента, что способствует уплотнению и упрочнению структуры бетона, а с другой — соответствие ИК-спектра образцов, нормально твердеющих и прошедших 100 циклов замораживания-оттаивания, отражает отсутствие существенной разницы в развитии гидратационного процесса в обоих случаях [11].

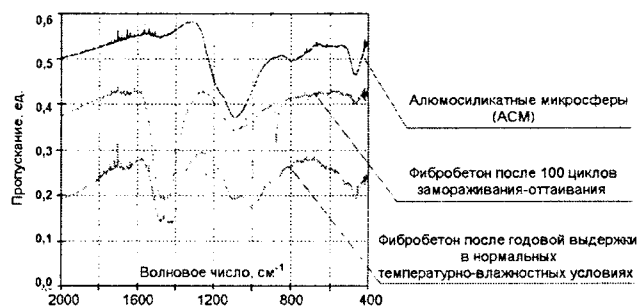


Рис. 4. ИК-спектры фибробетонов и алюмосиликатных микросфер

В целом полученные данные свидетельствуют о достаточной устойчивости структуры поризованного микросферами прессованного фибробетона при циклических испытаниях на морозостойкость и позволяют рассчитывать на его достаточную долговечность при эксплуатации ограждающих конструкций.

По результатам исследования и оптимизации свойств фибробетона на заполнителе из алюмосиликатных микросфер для практического использования может быть рекомендован состав с расходом компонентов на  $1\text{ м}^3$  бетона: цемента — 720 кг, микросфер — 240 кг, добавки "Виннапас" — 43 кг, фибры — 7,2 кг, пластификатора Peramin F — 3,6 кг; воды — 360–380 кг. Свойства фибробетона данного состава соответствуют нормативным и общестроительным требованиям для облицовочных плит и фасадных слоев в многослойных панелях: водопоглощение по массе — менее 6–7 %, морозостойкость — более 150 циклов; деформативность при водонасыщении-высушивании — 0,10–0,08 % без обработки поверхности гидрофобизатором, коэффициент паропроницаемости — 0,08–0,09 мг/(м·ч·Па), коэффициент теплопроводности — 0,40–0,55 Вт/(м·°C), прочность на растяжение при изгибе — 7,5–8,4 МПа, прочность на сжатие — 27–28 МПа, модуль упругости — 10,0–12,5 ГПа, ударная вязкость — 1000–1900 Дж/м<sup>2</sup>, средняя плотность — 1370–1420 кг/м<sup>3</sup>.

### ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ТОЛЩИНЫ ОБЛИЦОВОЧНОЙ ПАНЕЛИ ИЗ ФИБРОБЕТОНА

Для определения минимальной толщины облицовочной плиты из исследуемого фибробетона воспользовались известными формулами теории изгиба жестких тонких пластин [19, 20].

Наиболее характерными силовыми воздействиями на облицовочную плиту являются ветровая нагрузка, собственный вес, сила, распределенная по малой площади (брошенный камень или нагрузка от приставленной лестницы). Рассматривали квадратную плиту под действием равномерно распределенной

(ветровой) нагрузки и сосредоточенной силы, приложенной в центре пластины, в двух полярных вариантах закрепления кромок: при свободном опирании по контуру и при жестком закреплении контура. Для тонкой плиты из легкого бетона действием собственного веса можно пренебречь.

Для расчетов использовали аналитические выражения и справочные данные для квадратной пластины, выполненной из материала со значением коэффициента Пуассона  $\nu = 0,167$  [20]. Действие сосредоточенной силы приравнено действию распределенной нагрузки, сосредоточенной на ограниченной площади в центре пластины [11].

По результатам анализа напряженно-деформированного состояния однослойной плиты получены графические зависимости, позволяющие определять ее минимально допустимую толщину исходя из характеристической прочности материала и допустимого прогиба. Так, для квадратной плиты со стороной 1 м из поризованного микросферами фибробетона, испытывающей одновременно сочетание ветровой нагрузки и действие сосредоточенной силы 100 Н, приложенной по центру (то есть в наиболее неблагоприятном варианте нагружения), значение толщины должно быть не менее 6,5 мм. Для плит других размеров и соотношений между сторонами минимальную толщину следует корректировать по предложенной методике расчета.

Полученные результаты исследований апробированы при изготовлении прессованием опытной партии облицовочных плит из поризованного микросферами фибробетона, имитирующих кирпичную кладку. При размерах плиты 520×430 мм "основная" ее толщина составила 10 мм (без учета ребер жесткости) с уточнением на 1–2 мм в местах, имитирующих швы между кирпичами. Масса такой плиты при плотности материала 1400 кг/м<sup>3</sup> составила 2,8 кг (плоская плита) и 3,8 кг (плита с ребрами жесткости).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Разработана технология безвибрационного прессования легкого фибробетона на заполнителе из алюмосиликатных микросфер, содержащего полиакрилонитриловую фибру и полимерные пластифицирующие и адгезирующие добавки и предназначенного для использования в фасадостроении. На основе установленных закономерностей влияния режимов прессования на структуру и прочность бетона обоснованы минимально необходимое и максимально допустимое значения давления прессования, обеспечивающие надлежащее качество лицевой поверхности изделий и однородность структуры бетона с сохранением целостности микросфер. Для исследуемого бетона верхняя граница рабочего давления прессования определена в пределах 15,0–28,0 МПа, что соответствует заявленной прочности микросфер при сдавливании в цилиндре; нижняя граница установлена экспериментально и составляет 2,0–2,4 МПа.
- 2 Предложен алгоритм оптимизации состава и свойств фибробетона на основе анализа требуемых свойств и условий эксплуатации фасадных элементов. В качестве первоначального параметра оптимизации свойств принята прочность на растяжение при изгибе. Требуемый уровень других нормативных характеристик фибробетона

- достигался (при необходимости) путем корректировки состава.
- 3 На основе математической зависимости, адекватно отражающей взаимосвязь прочности фибробетона на растяжение при изгибе с содержанием компонентов в указанных условиях планирования многофакторного эксперимента, дано обоснование оптимального содержания микросфер зол уноса в фибробетоне. Опираясь на минимально требуемую стандартом для облицовочных панелей прочность в 7,5 МПа, рекомендовано ограничить содержание микросфер до 33–40 % от массы цемента, что в объемном отношении микросфер к цементу составляет приблизительно 1:1. Для практического внедрения рекомендован состав, характеризующийся соотношениями расходов материалов в процентах от массы цемента: микросфер — 33,0 %; добавки "Виннапас" — 6,0 %; фибры Ricem 8 — 1,0 %; пластификатора Peramin — 0,5 %, эксплуатационные свойства которого соответствуют требованиям [4, 5].
  - 4 Для рекомендуемого состава фибробетона оптимальным является  $(V/C)_{\text{общ}} \sim 0,50-0,55$ , при котором материал обладает достаточными прочностными свойствами в совокупности со способностью к пластичному, вязкому разрушению благодаря формированию такой структуры материала, при которой фибра обладает возможностью деформироваться, частично "проскальзывая" по поверхности контакта в зоне образования трещины, что способствует сохранению целостности изделия и возможности его дальнейшей эксплуатации.
  - 5 Результаты исследований подтверждены выпуском опытной партии плит, имитирующих кирпичную кладку, из поризованного микросферами фибробетона толщиной 10 мм (без учета ребер жесткости). На основе анализа напряженно-деформированного состояния таких плит, испытывающих сочетание ветровой нагрузки и действие сосредоточенной силы, приложенной по центру, показана возможность уменьшения толщины изделия до 6,5 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергоэффективный крупнопанельный жилой дом — от проекта к реализации // Строительный рынок. — 2009. — № 1. — С. 9–13.
2. Мордич, М. М. Новые материалы и технологии для строительства зданий из легких энергоэффективных конструкций / М. М. Мордич, И. О. Лыгач // Архитектура и строительство. — 2009. — № 3. — С. 48–53.
3. Пенобетон с пористыми заполнителями для монолитного строительства в несъемной опалубке / Г. С. Галузо [и др.] // Материалы XVI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 28–30 мая 2009 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, БрГТУ; редкол.: А. А. Борисевич (гл. ред.) [и др.]. — Брест: БрГТУ, 2009. — Ч. 2. — С. 55–59.
4. Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для зданий и сооружений. Общие технические условия: СТБ 1185-99. — Введ. 01.01.01. — Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2000. — 26 с.
5. Плиты облицовочные бетонные. Технические условия: СТБ 1374-2003. — Введ. 01.07.03. — Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2003. — 8 с.
6. Микросферы зол уноса // Вибротехцентр [Электронный ресурс]. — 2007. — Режим доступа: <http://www.vtcenter.ru/production/production.htm>. — Дата доступа: 10.05.2007.
7. Микросфера алюмосиликатная полая (ценосфера) [Электронный ресурс]. — 2009. — Режим доступа: <http://www.t-h-t.ru/microsfera.html>. — Дата доступа: 10.02.2012.
8. Касторных, Л. И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учебно-справочное пособие / Л. И. Касторных. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. — 221 с.
9. Сухие строительные смеси / Е. К. Карапузов [и др.]. — Киев: Техніка, 2000. — 225 с.
10. Леонович, И. А. Формирование структуры прессованного бетона, поризованного микросферами / И. А. Леонович, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. — 2011. — № 2. — С. 47–52.
11. Леонович, И. А. Технология, структура и свойства мелкозернистого и поризованного микросферами зол уноса фибробетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. А. Леонович; БНТУ. — Минск, 2012. — 172 с.: ил.
12. Методы испытания цемента. Часть 1. Определение прочности: СТБ ЕН 196-1-2000. — Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2001. — 17 с.
13. Изделия асбестоцементные листовые. Методы испытаний: ГОСТ 8747-88. — Введ. 01.07.89 — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 23 с.
14. Леонович, И. А. Прочностные свойства фибробетонов с заполнителем из микросфер при ударном нагружении / И. А. Леонович // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2008. — № 2. — С. 129–136.
15. Леонович, И. А. Механизм разрушения фибробетонов на заполнителе из микросфер зол уноса / И. А. Леонович, А. А. Леонович // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2009. — № 4. — С. 149–158.
16. Леонович, И. А. Влияние дисперсного армирования на прочность бетона с заполнителем из микросфер зол уноса / И. А. Леонович // Строительная наука и техника. — 2010. — № 1–2. — С. 12–22.
17. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования: ГОСТ 10060.0-95. — Введ. 01.09.96. — М.: МНТКС, 1996. — 5 с.
18. Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости: ГОСТ 10060.1-95. — Введ. 01.09.96. — М.: МНТКС, 1996. — 21 с.
19. Окопный, Ю. А. Механика материалов и конструкций: учебник для вузов. — 2-е изд. доп. / Ю. А. Окопный, В. П. Радин, В. П. Чирков. — М.: Машиностроение, 2002. — 436 с.
20. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин. — 2-е изд., перераб. и доп. / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. — Киев: Будивельник, 1970. — 436 с.

Статья поступила в редакцию 21.10.2013.