

Ирина Анатольевна ЛЕОНОВИЧ,
старший преподаватель кафедры
"Сопротивление материалов"
Белорусско-Российского университета,
г. Могилев

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

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ФАСАДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

THEORETICAL AND PRACTICAL MODELING OF ELASTIC AND PROPERTIES OF THE FINE-GRAINED FIBER-REINFORCED CONCRETE FOR THE THIN-WALLED FRONT ELEMENTS

В статье рассматриваются теоретико-практические аспекты технологии мелкозернистого фибробетона для тонких конструктивных слоев наружных стен зданий. Предложена математическая модель прогнозирования упругих свойств фибробетона, учитывающая объемное содержание фибры и ее геометрические параметры, а также модель зависимости его прочности на растяжение при изгибе, отражающая взаимосвязь с содержанием компонентов и величиной общего водоцементного отношения.

The article deals with theoretical and practical aspects of the technology of fiber-reinforced fine-structural layers for thin exterior walls of buildings. We propose a mathematical model predicting the elastic properties of fiber-reinforced concrete, which takes into account the volume content of fibers and its geometrical parameters, as well as a mathematical function of its tensile strength in bending, which reflects the relationship with the content of the components and the magnitude of the total water-cement ratios.

ВВЕДЕНИЕ

Применение в многослойных ограждающих конструкциях тонкостенных фибробетонных элементов толщиной не более 10 мм позволяет существенно снизить вес конструкции, увеличить толщину внутреннего теплоизолирующего слоя, обеспечить требуемую паро- и воздухопроницаемость, отказаться от дополнительной внешней отделки в построчных условиях [1–4].

Физико-технические свойства традиционных мелкозернистых бетонов недостаточны для обеспечения нормативных требований к материалу тонкостенных элементов, а рекомендуемые строительными нормами Беларуси толщины облицовочных слоев постепенно приходят в противоречие с мировой общей строительной практикой устройства (возведения) наружных стен. Так, согласно [5], для трехслойной стеновой панели номинальная толщина наружного слоя из тяжелого бетона должна быть не менее 50 мм для несущего и 65 мм для несущего слоя. Более того, на трехслойную панель наносится защитно-декоративный слой раствора или бетона толщиной не менее 15 мм. Согласно стандарту [6], облицовочные однослойные плиты из мелкозернистого бетона должны выполняться толщиной не менее 20,0 мм; прочность бетона на сжатие должна быть не менее 26,0 МПа, на растяжение при изгибе — не менее 7,5 МПа. Такие толщины слоев бетона многослойных конструкций обоснованы для крупногабаритных изделий, изготавливаемых с использованием традиционных конструктивных бетонов.

В настоящей статье приведены результаты исследований по разработке состава и технологии получения мелкозернистого фибробетона в тонких конструктивных слоях, формуемых по литевой технологии на поверхности слоя утеплителя. При минимальной толщине слоя (6–8 мм) бетон должен обладать достаточными прочно-

стными свойствами для восприятия монтажных и эксплуатационных нагрузок и воздействий. С этой целью в состав бетона вводили фибру, а также химические добавки как для обеспечения требуемых свойств бетона (включая качественное сцепление с материалом утеплителя), так и для получения бетонной смеси требуемой формемости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ФИБРЫ И БЕТОНА

Волокнистая фибра для дисперсного армирования бетона должна обладать химической стойкостью в щелочной среде, способствовать улучшению определяющих физико-технических свойств бетона, не снижать качество наружной поверхности изделий, быть безопасной и технологичной как в процессе приготовления бетона, так и при изготовлении и эксплуатации изделий.

С целью обоснования вида фибры для исследований оценивали изменение модуля упругости мелкозернистого бетона при дисперсном армировании фиброй разных видов и модульности (стальной, стеклянной, полиакрилонитриловой и полипропиленовой).

Известны математические зависимости для определения начального модуля упругости бетона, систематизация которых дана в [7, 8]. В основу расчета структурных моделей, содержащих две фазы (матрица из цементного камня и заполнитель), положены жесткость и объемная концентрация фаз (например, в моделях Войта, Реусса, Хашина-Хоббса). При их разработке ограничивались простыми зависимостями, присущими области упругих деформаций с учетом идеального сцепления между фиброй и матричным материалом.

Оценим возможность применения отдельных моделей для фибробетонов, в которых одной фазой является матрица из мелкозернистого бетона, а второй фазой —

дисперсно распределенное волокно, где E_{fc} , E_c , E_f — модули упругости соответственно фибробетона, бетонной матрицы и фибры; $\mu_{об}$ — объемное содержание фибры.

Для фибробетона с параллельными связями функция модуля упругости по аналогии с моделью Войта будет иметь вид

$$E_{fc} = E_f \cdot \mu_{об} + E_c \cdot (1 - \mu_{об}). \quad (1)$$

Для фибробетона с последовательными связями функция модуля упругости по аналогии с моделью Реуса будет выглядеть следующим образом

$$\frac{1}{E_{fc}} = \frac{1 - \mu_{об}}{E_c} + \frac{\mu_{об}}{E_f}. \quad (2)$$

Двухфазная модель фибробетона по аналогии с моделью Хашина-Хоббса будет записываться формулой

$$E_{fc} = \left[\frac{(E_c + E_f) + (E_f - E_c) \cdot \mu_{об}}{(E_c + E_f) - (E_f - E_c) \cdot \mu_{об}} \right] \cdot E_c. \quad (3)$$

Структурные модели С. М. Ицковича были получены в результате объединения деформаций слоев элементарного кубического объема бетона в форме параллельных и последовательных связей [9]. По аналогии для фибробетона в первом случае слой "бетонная матрица — фиброэлемент" с параллельными связями чередуется со слоями бетонной матрицы последовательно

$$E_{fc} = \frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{об}} \cdot (1 - E_c / (E_c + \sqrt[3]{\mu_{об}}^2 \cdot (E_f - E_c)))}. \quad (4)$$

Во втором случае слой "бетонная матрица — фиброэлемент" с последовательными связями чередуется со слоями бетонной матрицы параллельно по отношению к нагрузке

$$E_{fc} = E_c + \sqrt[3]{\mu_{об}}^2 \cdot \left(\frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{об}} \cdot (1 - E_c / E_f)} - E_c \right). \quad (5)$$

По мнению авторов, недостатком перечисленных зависимостей для оценки модуля упругости фибробетона является то, что они не учитывают геометрический параметр элементов фибры (l/d), который изменяется в широких пределах от единиц до сотен (т. е. на два порядка). Для реализации учета данного фактора необходимо скорректировать форму и размеры выделяемого элементарного объема фибробетона.

Кубический объем бетона со стороной, равной длине волокна в нем, будет содержать n волокон, определяемых из выражения

$$n = \frac{4 \cdot l^2}{\pi \cdot d^2} \cdot \mu_{об}. \quad (6)$$

Модель фибробетона с n однонаправленными волокнами показана на рис. 1а. Механическая замена всех волокон суммарным фиброэлементом с поперечным размером $a \approx d\sqrt{n}$ и продольным размером $A = l$ (рис. 1б) будет некорректной, так как существенно (в \sqrt{n} раз) изменяется площадь контакта между фазами. В частности, для полиакрилонитриловой фибры Ricem 8 ($l = 8$ мм, $d = 16-17$ мкм) в кубическом объеме со стороной 8 мм при объемном содержании фибры 1% будет находиться около 3000 моноволокон, которые должны равномерно располагаться по объему, окруженные бетонной мат-

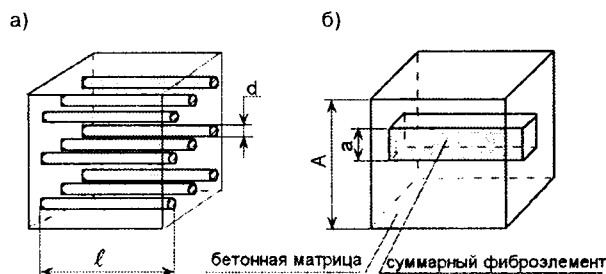


Рис. 1. Кубовидная модель фибробетона

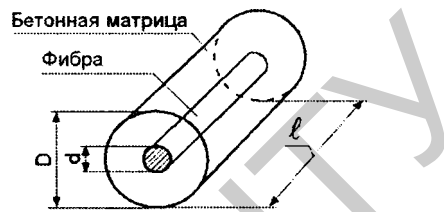


Рис. 2. Цилиндрическая модель фибробетона

рицей при соответствующем сцеплении по границе контакта.

Методически более целесообразно в качестве элементарного выбрать цилиндрический элемент, показанный на рис. 2, диаметр поперечного сечения которого определяется из условия равномерного распределения фибры по формуле

$$D = \frac{d}{\sqrt{\mu_{об}}}. \quad (7)$$

В таком цилиндрическом элементе содержание фибры по поверхности поперечного сечения $\mu_{нов}$ равно объемному содержанию фибры $\mu_{об}$:

$$\mu_{нов} = \frac{A_f}{A_c} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{d^2}{D^2}, \quad (8)$$

$$\mu_{об} = \frac{V_f}{V_c} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot l} = \frac{d^2}{D^2}.$$

Для определения модуля упругости фибробетона в таком случае применим методику С. М. Ицковича, которая отражает совместную работу дисперсного элемента и матрицы по отношению к действующей нагрузке, как сумму двух состояний системы — с параллельными и последовательными связями.

Для цилиндрического элемента с параллельными связями (рис. 3а) функция модуля упругости будет иметь вид

$$E^I = E_f \cdot \mu_{нов} + E_c \cdot (1 - \mu_{нов}) = E_c + \mu_{об} \cdot (E_f - E_c). \quad (9)$$

Для цилиндрического элемента с последовательными связями (рис. 3б) функция модуля упругости запишется следующим образом

$$E^{II} = \frac{E_c \cdot E_f}{E_f + \mu_{нов} \cdot (E_c - E_f)} = \frac{E_c}{1 - \sqrt{\mu_{об}} \cdot \left(1 - \frac{E_c}{E_f} \right)}, \quad (10)$$

где $\mu_{нов}$ — "погонное" содержание фибры в плоскости сечения по длине элементарного цилиндра:

$$\mu_{нов} = \frac{d}{D} = \sqrt{\mu_{об}}. \quad (11)$$

Совместное деформирование элементов (рис. 3в) можно выразить внедрением элемента с параллельными связями E' в поперечное нагружение (формула (12)) или внедрением элемента с последовательными связями E'' в продольное нагружение (формула (13)):

$$E'_{fc} = \frac{E_c}{1 - \sqrt{\mu_{об}} \cdot \left(1 - \frac{E_c}{E'}\right)} \quad (12)$$

$$E''_{fc} = E_c + \mu_{об} \cdot (E'' - E_c) = E_c + \mu_{об} \cdot \left(\frac{E_c}{1 - \sqrt{\mu_{об}} \cdot (1 - E_c/E')} - E_c \right) \quad (13)$$

Сопоставление результатов расчета модуля упругости фибробетона по формулам (12) и (13) показало незначительное расхождение в полученных значениях. Усредняя результаты расчетов по формулам (12) и (13), можно в какой-то степени учесть промежуточное расположение элементов. Тогда начальный модуль упругости фибробетона равен

$$E_{fc} = \frac{1}{2} \cdot (E'_{fc} + E''_{fc}) \quad (14)$$

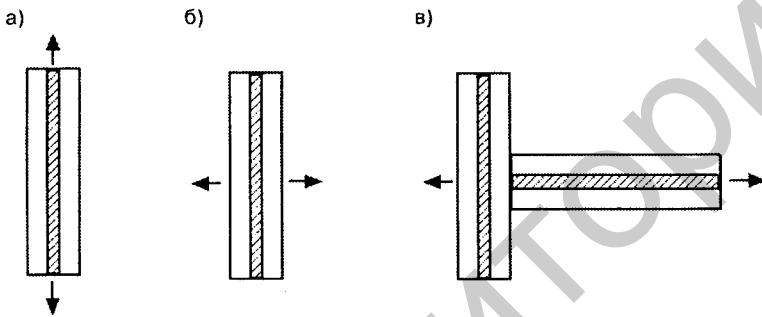


Рис. 3. Схемы для определения модуля упругости: а — E' ; б — E'' ; в — E_{fc}

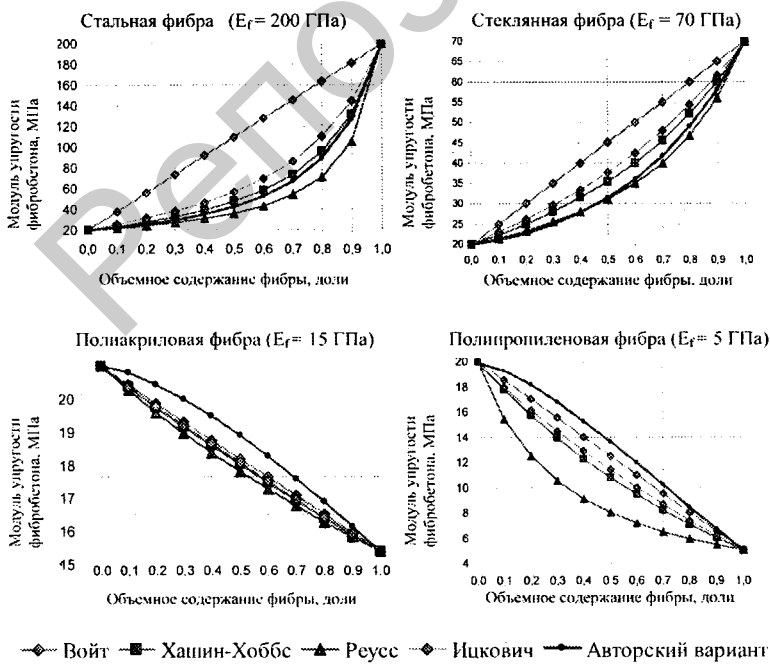


Рис. 4. Сравнительный анализ моделей модуля упругости фибробетона

Определим место предложенной нами модели (формулы (12)–(14)) в ряду названных ранее моделей для расчета модуля упругости такого композитного материала, как фибробетон: формула (1) — модель Войта, формула (2) — модель Реусса, формула (3) — модель Хашина-Хоббса, среднее арифметическое формул (4) и (5) — модель С. М. Ицковича. Результаты сравнительного анализа для фибры разной модульности представлены графиками на рис. 4, демонстрирующие упругие свойства условного композита, в котором объемное содержание фибры по отношению к объемному содержанию бетона изменяется от 0 до 1, т. е. до полного замещения матричного материала. В качестве бетонной матрицы был взят мелкозернистый бетон на заполнителе из песка с модулем упругости $E_c = 20$ ГПа; фибра представлена материалами из разных групп модульности: сталь ($E_f = 200$ ГПа), стекло ($E_f = 70$ ГПа), полиакрилонитрил ($E_f = 15$ ГПа) и полипропилен ($E_f = 5$ ГПа).

По графикам рис. 4 видно, что для высокомодульной фибры (сталь и стекло) изменения модуля упругости фибробетона по всем моделям имеют нелинейный характер. Исключением является модель Войта, выраженная линейной функцией, что не отражает реальную закономерность. Предложенная авторами модель наиболее близка к моделям Реусса и Хашина-Хоббса.

Для среднемодульной фибры (полиакрилонитрил) только авторская модель отражает нелинейную зависимость изменения модуля упругости, остальные модели близки по результату к модели Войта, т. е. к линейной зависимости.

Для низкомодульной фибры (полипропилен) модель Реусса оказалась наименее пригодной, так как полученные по ней значения модуля упругости фибробетона неадекватно резко снижаются при малом содержании фибры.

Авторская модель показала подобный характер изменения модуля упругости фибробетона независимо от модульности вводимой фибры. Технологические и рецептурные факторы, от которых зависят равномерность распределения и качество сцепления поверхности волокна с бетонной матрицей, не учитывались. Поэтому представленная модель совместной работы фибры и бетона использовалась для теоретического обоснования выбора фибры на стадии планирования экспериментов.

Необходимо отметить, что на практике удобнее задавать и использовать расход компонентов смеси в массовых долях от содержания цемента или от сухой смеси всех компонентов. Перевод объемного содержания в содержание по массе произведен с учетом средней плотности материалов, $\text{кг}/\text{м}^3$: сталь — 7800, стекло — 2700, бетон — 2400, полиакрилонитрил — 1180, полипропилен — 910. Сравнительная оценка эффективности введения фибры в зависимости от ее объемного и массового содержания показана на рис. 5.

В случае "идеального" сцепления фибры (объемное содержание $\mu_{об} = 4,00\%$) с бетонной матрицей, стальная фибра по расчету должна

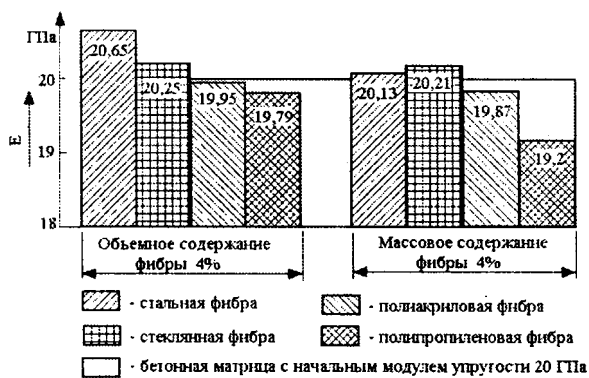


Рис. 5. Модули упругости фибробетонов

увеличивать модуль упругости фибробетона на 3,25 %; стеклянная — на 1,25 %, низко модульная полипропиленовая фибра должна снижать модуль упругости бетона на 1,00 %, а среднемодульная полиакрилонитриловая фибра — на 0,25 %.

После пересчета в массовое содержание (4,00 %) оказалось, что в наибольшей степени (на 1,05 %) повышает модуль упругости фибробетона стеклянная фибра, стальная фибра — только на 0,65 %; понизит модуль упругости фибробетона на 0,65 % полиакрилонитриловая фибра и на 4,00 % — полипропиленовая, которая оказалась наиболее эффективной из исследуемых материалов (см. рис. 2). На практике такое значительное влияние полипропиленовой фибры на упругие свойства фибробетона не наблюдается, так как применяемые расходы синтетической фибры не превышают, как правило, 1,0 % от массы сухой смеси. Однако необходимо учитывать ее интенсивное понижающее влияние на модуль упругости фибробетона.

Для тонкостенных фасадных элементов применение стальной фибры ограничено из-за усложнения процесса формования бетона, утяжеления конструкции, возможной коррозии стали под действием атмосферы и появления пятен ржавчины на фасадных поверхностях.

Из представленных материалов в большей степени для облицовочных слоев подходит полиакрилонитриловая фибра, которая при малых содержаниях (до 1 % от массы смеси) практически не изменяет модуль упругости бетонной матрицы, что приводит к более однородному распределению напряжений в материале при знакопеременных деформациях под воздействием среды. В отличие от стеклянной фибры, сцепление поверхности полиакрилонитриловой фибры с цементным камнем — удовлетворительное, она дешевле и не ухудшает условий труда из-за аллергических реакций.

Изложенный в данном разделе статьи материал получил практическое (экспериментальное и производственные) подтверждение, частично представленное в следующих разделах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый мелкозернистый фибробетон предназначен для наружных слоев облицовочных плит и стеновых панелей, которые находятся под воздействием изменяющихся погодных условий (механических, температурных, влажностных, химических 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 тонкостенного элемента панели или плиты. В связи с тем, что для традиционного бетона сопротивление растяжению является критическим свойством, прочность на растяжение при изгибе принята в качестве основного параметра оптимизации. На последующих этапах исследований иные свойства фибробетона определяли для составов, у которых этот основополагающий параметр был максимален. Необходимая корректировка составов — по необходимости производится с целью достижения требуемых эксплуатационных показателей по всем предъявляемым свойствам материала. При этом предварительно назначаемый запас прочности на изгиб должен обеспечивать возможное его снижение в пределах допустимого по действующим нормативам.

Экспериментальные исследования механических свойств мелкозернистого бетона проводили на балочках размерами 40x40x160 мм, изготовленных из бетонной смеси подвижностью, оцениваемой осадкой конуса ОК ~ 22–25 см. Методика определения прочности бетона на сжатие и на растяжение при изгибе соответствовала стандартным испытаниям [10].

В исследованиях использовали портландцемент ПЦ 500-Д0 активностью $R_d \sim (50 \pm 1,5)$ МПа, с коэффициентом нормальной густоты $K_{nr} \sim 0,27$; плотностью $\rho \sim 3100$ кг/м³. В качестве мелкого заполнителя применяли природный (карьерный) песок средней плотностью в рыхлонасыпном состоянии $\rho_n^o \sim 1560$ кг/м³, модулем крупности $M_x = 2,2$, плотностью зерен $\rho_n^z \sim 2650$ кг/м³. Для затворения бетона использовали водопроводную воду, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114-98.

Особенностью технологии приготовления мелкозернистого фибробетона является увеличение водопотребности (при сохранении равной подвижности смеси) при введении фибры, так как часть воды адсорбируется ее достаточно "развитой" поверхностью. Для увеличения пластичности бетонной смеси при одновременном снижении содержания воды и придания бетону улучшенных прочностных и эксплуатационных характеристик вводили пластифицирующие химические добавки. Для повышения прочности сцепления цементного камня с поверхностью заполнителя и фибры использовали адгезив "Виннапас" (RL 551 Z), который по химической природе является тройным сополимером этилена, виниллаурата и винилхлорида. Он также способствует росту прочности бетона на растяжение при изгибе, повышает деформативность, в том числе и при низких температурах, что особенно существенно для материалов внешних слоев наружных стен.

На основании анализа данных с использованием ранее приведенной модели упругих свойств фибробетона в дальнейших исследованиях в качестве фибры использовали полиакрилонитриловые волокна Ricem длиной 8 мм и диаметром 15–17 мкм. Контрольные образцы изготавливали без добавления фибры для определения свойств матричного состава.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА

В процессе отработки технологии вибрационного и безвибрационного вариантов формования тонко-

стенных конструктивных слоев бетона был установлен эффект ориентации волокон фибры в его объеме при формованной с помощью горизонтально направленных колебаний по оси их приложения, что сопровождается проявлением анизотропии как в формировании структуры, так и прочностных свойств фибробетона и приводит к снижению его качества. Установлена возможность использования безвибрационной литьевой технологии укладки бетонной смеси для формования защитного наружного слоя стеновых панелей, получаемой введением в состав пластификаторов нового поколения, в частности Peramin SMF-10 и Sica Visco Crete — 20 HE Rus. Оценивали также свойства бетона при комбинированном варианте, включавшем вибрационное воздействие разнонаправленными колебаниями с использованием смесей разной подвижности. Во всех случаях использовался один и тот же состав мелкозернистого фибробетона, характеризующийся расходом твердофазных компонентов: "цемент + песок + фибра" в соотношении 1:2:0,01. Пластифицирующие добавки вводили с водой затворения в количествах, рекомендуемых производителями: Peramin SMF-10 — 0,5 % от массы цемента; Sica Visco Crete — 20 HE Rus — 1,5 % от массы цемента, что соответствует 0,5 % в пересчете на сухое вещество.

Общее водоцементное отношение смеси $(B/C)_{\text{общ}}$, соответствующее относительному (выраженному в долях единицы) начальному содержанию воды в фибробетонной смеси (примерно равной подвижности ОК ~ 22–25 см) по отношению к цементу, варьировали в пределах от 0,40 до 0,52.

Установлено, что наиболее равномерное распределение фибры в объеме бетона и наибольшая его прочность получены в случаях использования добавки Peramin SMF-10 с одновременным воздействием разнонаправленной вибрации, а также при использовании высококачественной пластифицирующей добавки 1-й группы Sica Visco Crete — 20 HE Rus, обеспечившей получение литой самоуплотняющейся бетонной смеси. При этом среднее значение прочности образцов на растяжение при изгибе составило ~12,2 МПа при использовании разнонаправленного вибрирования и суперпластификатора Peramin SMF-10, и 12,8 МПа при использовании литьевой технологии, обеспеченной применением гиперпластификатора Sica Visco Crete — 20 HE Rus. Таким образом, обеспечивается возможность отказа от энергозатратного процесса вибрирования, получая равнозначные значения плотности и прочности бетона на растяжение при изгибе (как основного критерия (фактора) оценки его качества) путем модификации состава фибробетонной смеси соответствующими добавками.

Необходимо отметить отличное качество верхней грани образцов, т. е. свободной поверхности литьевого фибробетона. Она получилась гладкой — характерная "шерстистость" от волокон фибры малозаметна, внутри объема бетона волокна распределены произвольно, анизотропия свойств сведена к минимуму.

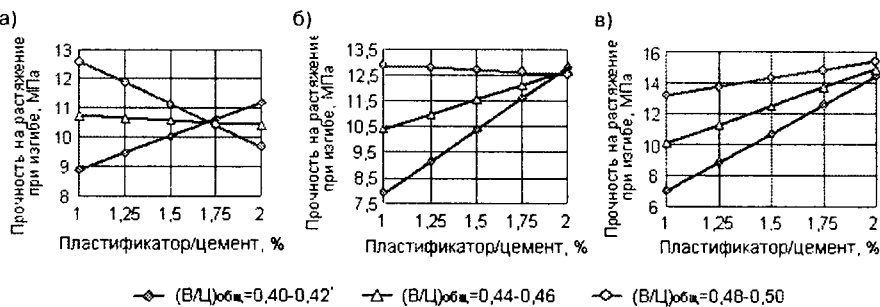


Рис. 6. Зависимость прочности фибробетона на растяжение при изгибе в пределах условий планирования эксперимента: а — фибра/цемент = 0,4 %; "Виннапас"/цемент = 2,0 %; б — фибра/цемент = 0,7 %; "Виннапас"/цемент = 3,5 %; в — фибра/цемент = 1,0 %; "Виннапас"/цемент = 5,0 %

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ФИБРОБЕТОНА

Для выявления закономерностей влияния свойств компонентов в составе на прочность литьевого фибробетона при минимально необходимом количестве опытов применили метод математического планирования эксперимента. Разработана и подтверждена экспериментально математическая модель прочности, выраженная уравнением регрессии (15), адекватно отражающая взаимосвязь и взаимозависимость прочности мелкозернистого фибробетона на растяжение при изгибе (Y) от содержания его компонентов в заданных условиях планирования эксперимента: X_1 — фибра/цемент (0,4 %–1,0 %), X_2 — "Виннапас"/цемент (2,0 %–5,0 %), X_3 — пластификатор/цемент (1,0 %–2,0 %), X_4 — общее водоцементное отношение (0,4–0,5) [11]

$$Y = 11,543 + 0,532 \cdot X_1 + 0,417 \cdot X_2 + 1,136 \cdot X_3 + 1,164 \cdot X_4 + 0,819 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,618 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,474 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,308 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (15)$$

Двухмерные диаграммы (рис. 6) зависимости прочности фибробетона на растяжение при изгибе от содержания гиперпластификатора Sica Visco Crete — 20 HE Rus и общего водоцементного отношения при минимальном (а), среднем (б) и максимальном (в) содержании фибры Riset 8 и "Виннапаса" демонстрируют, что исследуемый интервал варьирования компонентов бетонной смеси включает область оптимума, о чем свидетельствует наличие точек взаимопересечения (а и б), или находится рядом с ней (в).

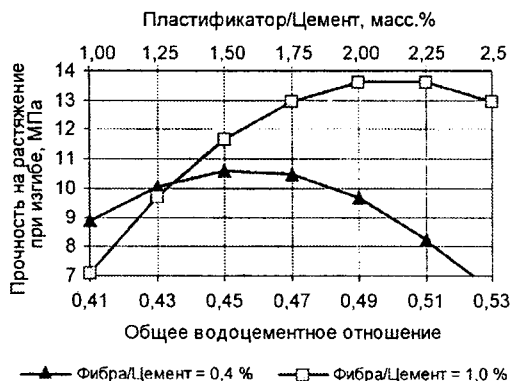


Рис. 7. Область значений прочности фибробетона на растяжение при изгибе в зависимости от его состава ("Виннапас"/цемент = 2 %)

Результаты исследований подтвердили, с одной стороны, прямую зависимость роста прочности фибробетона на растяжение при изгибе от количества введенной фибры при соблюдении условия качественного формования и уплотнения фибробетонной смеси ($(V/C)_{\text{общ}} \sim 0,44-0,50$, что соответствует начальному водосодержанию 250–280 л на 1 м^3 фибробетона при дозировке пластификатора 1,5 %–2,0 % от массы цемента), а с другой стороны — снижение прочности, связанное с недоуплотнением бетона из-за ухудшения формовкости смеси при недостаточном количестве воды и пластификатора для увеличивающегося содержания фибры в бетоне ($(V/C)_{\text{общ}} \sim 0,40-0,42$, что соответствует начальному водосодержанию 230–240 л на 1 м^3 фибробетона при дозировке пластификатора 1,0 % от массы цемента).

Оценка влияния адгезива "Виннапаса" показала его эффективность, возрастающую с увеличением (в пределах оптимального) начального водосодержания. Сущность этого эффекта, по мнению авторов, основывается на противоречивости следствий от увеличения водосодержания фибробетона. С одной стороны, улучшаются условия его формования, а с другой — увеличивающиеся толщины адсорбционных пленок воды на поверхности фибры ухудшают ее сцепление с цементным камнем. Введение адсорбционно-активного вещества "Виннапас" способствует усилению связей между поверхностью фибры и затвердевшим цементным камнем, чем обеспечивается их совместная работа под нагрузкой и рост прочности фибробетона на растяжение при изгибе.

При оценке влияния общего водоцементного отношения фибробетонной смеси на прочность затвердевшего бетона установлено наличие смещающегося оптимума его величины в зависимости от расхода фибры и пластификатора (рис. 7). Отраженная тенденция снижения прочности бетона с более высоким содержанием фибры при минимальных содержаниях пластификатора (1,00 %) и воды затворения ($(V/C)_{\text{общ}} = 0,40-0,42$), связана с высокой адсорбционной способностью фибры, ведущей к образованию слабого контактного слоя цементного камня с поверхностью фибры и недоуплотнению бетона.

При увеличении начального общего водоцементного отношения и расхода пластификатора создаются условия для формирования слитной структуры цементного камня и фибробетона в целом, обеспечивающей совместную работу бетона и фибры, что ведет к росту прочности на растяжение при изгибе до максимальных, из установленных для данного состава бетона, значений.

Дальнейшее увеличение общего водоцементного отношения (начального водосодержания) фибробетона сопровождается закономерным снижением его прочности.

Определены как рациональные расходы фибры (0,7 %–1,0 % от массы цемента или 0,22 %–0,33 % от массы сухой смеси), пластификатора (1,5 %–2,0 % от массы цемента), адгезива (до 5,0 %) и общего водоцементного отношения бетона для литьевой технологии его формования ($(V/C)_{\text{общ}} = 0,48-0,51$ и их сочетания, обеспечивающего прочность мелкозернистого фибробетона на растяжение при изгибе до 14–16 МПа, что значительно превышает нормируемый уровень (7,5 МПа) и позволяет соответствующим образом

уменьшить толщину слоя бетона. Прочность на сжатие этих же образцов фибробетона составила 40–42 МПа.

Подтверждена экспериментально адекватность расчетных (по предложенной зависимости (15)) и экспериментальных данных прочности фибробетона. Отличие в значениях теоретической и полученной на образцах прочности на растяжение при изгибе (аналогичных составов, характеризовавшихся соотношением и расходом компонентов в области рекомендуемых величин) составило менее 6 %.

При подборе состава фибробетона с использованием предлагаемой зависимости (выражение (15)) можно исходить из обеспечения меньшей (достаточной по требованиям нормативов) прочности и варьировать содержание фибры, пластификатора, адгезива и начального водосодержания смеси с учетом всех конкретных обстоятельств, включая оценку их стоимости и себестоимости продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Получена усовершенствованная математическая зависимость для расчета начального модуля упругости фибробетона, отражающая его взаимосвязь с содержанием и упругими свойствами фибры, в которой учитывается дополнительный фактор — вытянутая форма фиброэлементов, что в целом обеспечивает возможность теоретически оценить характер изменений модуля упругости фибробетона при использовании фибры разной модульности, позволяет выбрать требуемый материал для дисперсного армирования на стадии планирования экспериментов.
- 2 Экспериментально оценена эффективность вибрационного (горизонтально и вертикально направленные колебания и их сочетание) и безвибрационного (литые, самоуплотняющиеся смеси) формования тонкостенных конструктивных элементов из фибробетона с позиций формирования его структуры и свойств. Установлен эффект ориентации волокон фибры в объеме бетона, формируемого с помощью горизонтально направленных колебаний по оси их приложения, что сопровождается проявлением анизотропии как в формировании структуры, так и прочностных свойств фибробетона, и приводит к снижению его качества. Выявлено преимущество литьевой технологии (безвибрационной, на основе самоуплотнения) формирования тонкостенных конструктивных элементов из фибробетона, обеспеченной за счет использования высококачественных пластифицирующих добавок эффекта равномерного распределения фибры, что способствовало повышению прочности образцов на растяжение при изгибе до 12,8 МПа, т. е. превышающей уровень прочности вибрированного бетона.
- 3 Разработана и подтверждена экспериментально математическая зависимость, выраженная уравнением регрессии (15), адекватно отражающая взаимосвязь и взаимозависимость прочности фибробетона на растяжение при изгибе от содержания его компонентов и начального водосодержания (общего водоцементного отношения) бетона. Для разработки модели реализован многофакторный эксперимент, основные результаты которого подтверждены экспериментально. Определены рациональные расходы фибры, пластификатора, адгезива и общего

водоцементного отношения бетона и их сочетания для литевой технологии его формирования, обеспечивающие прочность мелкозернистого фибробетона на растяжение при изгибе до 14–16 МПа, что значи-

тельно превышает нормируемый уровень не ниже 7,5 МПа, и является гарантией обеспечения всей совокупности требований, предъявляемых к облицовочным слоям наружных стен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные строительные материалы. Технологии работ. — М.: Стройинформ, 2006. — 720 с.
2. PIZ cladding systems [Electronic resource]. — 2009. — Mode of access: <http://www.piz.it/>. — Date of access: 24.02.2012.
3. Фасадостроение: специальный выпуск // Технологии строительства. — 2005. — № 5 (39).
4. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства / А. И. Вахмистров [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. — 2007. — № 10. — С. 43, 44.
5. Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для зданий и сооружений. Общие технические условия: СТБ 1185-99. — Введ. 01.01.01. — Минск: Минстройархитектуры, 2000. — 26 с.
6. Плиты облицовочные бетонные: ТУ. СТБ 1374-2003. — Введ. 01.07.03. — Минск: Минстройархитектуры, 2003. — 8 с.
7. Блещик, Н. П. Модуль упругости бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Н. П. Блещик, Д. С. Котов // Строительная наука и техника. — 2008. — № 2. — С. 11–18.
8. Блещик, Н. П. Прогнозирование модуля упругости бетона / Н. П. Блещик, В. В. Бабицкий // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2004. — № 1. — С. 38–40.
9. Ицкович, С. М. Технология заполнителей бетона: учеб. для строит. вузов по спец. "Производство строительных изделий и конструкций" / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов. — М.: Высш. шк., 1991. — 272 с.
10. Методы испытания цемента. Часть 1. Определение прочности: СТБ ЕН 196-1-2000. — Минск: Минстройархитектуры, 2001. — 17 с.
11. Батяновский, Э. И. Анализ модели прочностных свойств мелкозернистого фибробетона / Э. И. Батяновский, И. А. Леонович, А. А. Леонович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: матер. Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. Обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Саконов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2010. — Ч. 2. — С. 96, 97.

Статья поступила в редакцию 04.06.2012.