

Леонович Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Сопrotивление материалов» ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», г. Могилев

Батяновский Эдуард Иванович, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы» белорусского национального технического университета, г. Минск

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ФИБРОБЕТОНОВ, ПОРИЗОВАННЫХ МИКРОСФЕРАМИ

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS STRUCTURE FORMATION OF PRESSED CONCRETE CONTAINING MICROSPHERES

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы формирования структуры прессованного фибробетона с заполнителем из полых микросфер. Сформулированы рекомендации для достижения ожидаемого эффекта от применения такого заполнителя и неметаллической фибры, полученные на основе теоретико-экспериментального обоснования режимов прессования и анализа прочности композита.

ABSTRACT

Questions of structure formation of compressed fibrous concrete containing aggregates in the form of hollow microspheres have been considered. On the basis of theoretically and experimentally substantiation of the pressing regime of mixture and strength analysis of composite, recommendations for achieving expected effect from the use of such aggregates and nonmetallic fiber are suggested.

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследовались мелкозернистые бетоны, предназначенные для изготовления прессованием тонкостенных элементов с декоративно-защитными функциями преимущественно наружного применения. Для улучшения сопротивления материала этих

изделий действию растягивающих напряжений при статическом и динамическом воздействии применялось дисперсное армирование полиакриловой фиброй Riset длиной 8 мм и диаметром 15-17 мкм (до 1% от массы цемента), сочетающей сравнительную легкость и высокую прочность. С целью снижения средней плотности и повышения теплозащитной функции бетона в качестве монозаполнителя использовались полые алюмосиликатные микросферы золуноса диаметром 30-500 мкм, производимые «Вибротехцентром» (РФ), которые также могут вводиться в состав мелкозернистого (песчаного) бетона как мелкодисперсный наполнитель. Благодаря малым размерам и шарообразной форме с достаточно гладкой поверхностью микросферы способствует улучшению формуемости бетонной смеси и позволяют достигать высокого качества лицевой поверхности, что важно для изделий предполагаемой области применения исследуемого фибробетона (облицовочные плиты толщиной 7-12 мм, черепица, архитектурные элементы сложной формы, несъемная опалубка и т.д.).

УСЛОВИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ПОРИЗОВАННОГО МИКРОСФЕРАМИ БЕТОНА

Давление прессования бетона должно быть выверено таким образом, чтобы жидкая фаза в смеси создала непрерывную пространственную матрицу, а микросферы не утратили своей целостности, обеспечивающей требуемые показатели композита по плотности, водонепроницаемости, звукоизоляции. При этом желательно применение возможно меньшего давления прессования, которое определяет мощность пресса, а значит стоимость и экономичность технологического процесса. Важнейшей технологической задачей на стадии формирования изделий являются также получение четкого отпечатка (рисунка) лицевой поверхности, что напрямую зависит от скорости прессования и прочности свежесформованного бетона, необходимой для бездефектной немедленной распалубки изделий, что предполагает использование жестких бетонных смесей.

Условие получения оптимальной структуры при прессовании поризованного микросферами бетона можно выразить следующим образом [1]:

$$P_{\min} \leq p < P_u, \quad (1)$$

где p – рабочее давление прессования (область оптимального значения), при котором достигается плотная структура матрицы при целостности микросфер;

p_{\min} – нижняя граница давления прессования, достаточная для получения четкого отпечатка гравюры формы на поверхности изделия с удовлетворительной плотностью цементной матрицы;

p_u – предельное давление, при котором начинается разрушение оболочек микросфер с одновременным увеличением средней плотности бетона и образованием незамкнутых пустот в матрице.

При определении оптимального значения рабочего давления его нижняя граница может быть установлена экспериментально для конкретных условий производства. Верхнюю границу или предельное давление прессования в общем виде можно рассчитать на основе анализа напряженного состояния микросфер, исходя из того, что давление на поверхность микросфер, окруженных прослойками цементного теста, распределяется равномерно. Это предположение базируется на представлении цементного теста, как гелеобразной системы «мицелл», контактирующих между собой внешними диффузионными слоями водных сольватных оболочек. Давление, приложенное к такой системе, в первую очередь передается на жидкость, окружающую частицы цемента (флокулы или отдельные зерна [2]) и микросферы), благодаря чему допущение о равномерном и всестороннем «гидростатическом» сжатии последних при прессовании вполне обосновано.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОСФЕРЫ ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ СЖАТИИ

При выборе модели расчета учитывалось, что полые микросферы могут относиться к разным типам по толщине стен или «толстостенности». По классификации [3,4] для толстостенных сфер соотношение между толщиной стенки δ и внешним диаметром сферы D должно быть $\delta > (0,045 - 0,0476) \cdot D$. Алюмо-силикатные микросферы зол-уноса, применяемые нами, в основном, относятся к толстостенным оболочкам ($\delta \leq 0,1 \cdot D$), при этом возможно наличие некоторого количества тонкостенных сфер. Поэтому при определении верхней границы давления прессования, нами рас-

сматривалась модель толстостенной сферы, частным случаем которой, является тонкостенная оболочка [1].

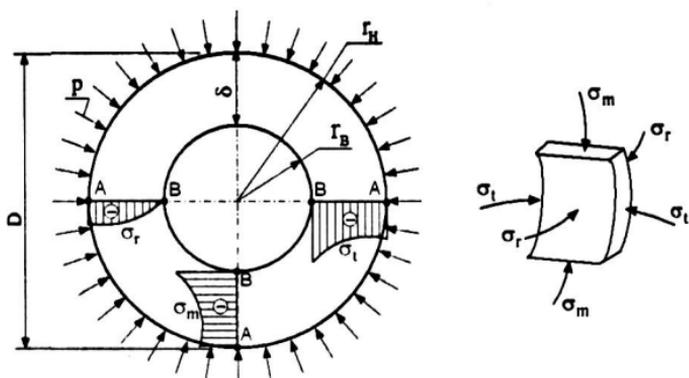


Рис. 1. Модель нагружения сферы и эпюры распределения напряжений по толщине ее стенки

На рисунке 1 показана модель нагружения микросферы и элемент стенки с действующими главными напряжениями по трем направлениям: σ_r – радиальное, σ_t – осевое и σ_m – меридиональное напряжения. Законы распределения этих напряжений в упругой области деформирования в зависимости от радиальной координаты рассматриваемой точки r показаны в виде эпюр.

Величина напряжений для толстостенной оболочки определяется по известным формулам Ламе через наружный r_n и внутренний r_b радиусы в зависимости от действующего усилия p [3,4]. Наиболее нагруженными оказались точки внутренней поверхности сферы (В), в которых при опасном значении давления прессования p_{dan} раньше всего достигается предел прочности материала на сжатие σ_u , с максимальными эквивалентными напряжениями, рассчитанными по III и IV теориям прочности [1]:

$$\sigma_{red}^{max} = \frac{2 \cdot p_{dan}}{\left(1 - \frac{r_b^2}{r_n^2}\right)} = \sigma_u \quad (2)$$

Применение теорий по критерию Треска–Сен-Венана (III теория прочности) и по критерию Губера–Мизеса (IV теория прочности) для хрупких материалов, таких как алюмосиликатное стекло, производится в тех случаях, когда разрушение путем отрыва невоз-

можно, например, при всестороннем сжатии [5]. Использование теории Мора представляется в данном случае невозможным из-за отсутствия растягивающих напряжений.

Опасное значение давления прессования можно выразить через толщину стенки δ и внешний диаметр сферы D следующим образом:

$$p_{\text{дан}} = \frac{\sigma_u}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_{\text{в}}^2}{r_{\text{н}}^2}\right) = 2 \cdot \sigma_u \cdot \frac{\delta}{D} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{D}\right). \quad (3)$$

При дальнейшем увеличении давления прессования, предельное состояние в материале наступает, когда напряжения по всей толщине стенки сферы становятся равными пределу прочности материала при сжатии σ_u . В этом случае разрушение сферы произойдет от сдвиговых деформаций.

Для определения предельного давления воспользуемся математическими выводами плоской осесимметричной задачи теории упругости, согласно которой напряжения и деформации сферического тела зависят только от координаты r [6]. В предельном состоянии главные напряжения становятся равны пределу прочности и уравнение равновесия, полученное проектированием всех сил на нормаль к элементу сферы, приобретает вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{2 \cdot \sigma_u}{r}. \quad (4)$$

В результате интегрирования уравнения (4) с учетом граничных условий: $\sigma_r(r_{\text{н}}) = -p$ и $\sigma_r(r_{\text{в}}) = 0$, получена формула для расчета предельного внешнего давления [1]:

$$p_u = 2 \cdot \sigma_u \cdot \ln\left(1 - 2 \cdot \frac{\delta}{D}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Для сфер сплошного сечения при $\delta/D = 0,5$ выражение (5) не имеет решения. Разложив натуральный логарифм в ряд до первого члена, получим приближенную формулу для расчета величины предельного давления:

$$p_u = 4 \cdot \sigma_u \cdot \frac{\delta}{D} \left(1 - \frac{\delta}{D}\right)^{-1}. \quad (6)$$

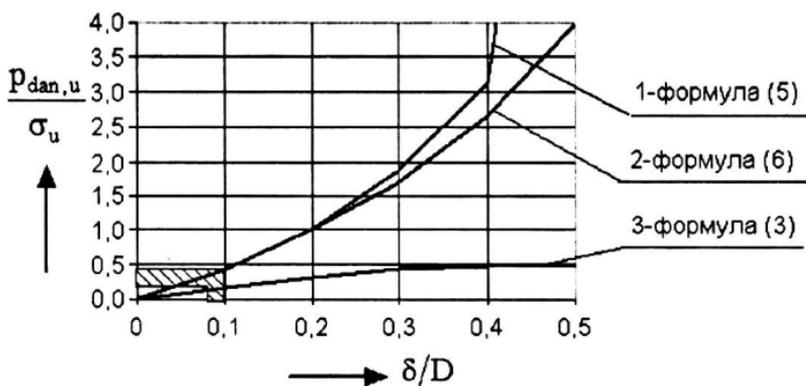


Рис. 2. Зависимость предельного давления прессования от геометрических параметров и прочности микросфер

На рисунке 2 представлено графическое отражение взаимосвязи отношения предельного p_u или опасного при упругих деформациях $p_{дан}$ давления прессования к пределу прочности при сжатии материала микросфер σ_u от отношения их геометрических параметров — толщины стенки δ и внешнего диаметра D . Заштрихованная область соответствует алюмосиликатным микросферам зол-уноса, при фактическом соотношении $\delta/D \approx (0,07 - 0,1)$.

Анализ данных, относящихся к графическим зависимостям 1 и 2, показывает, что точное решение методами теории упругости (линия 1 по формуле (5)) совпадает или близко к приближенному решению задачи (линия 2 по формуле (6)) при $\delta/D \leq 0,2-0,3$. С дальнейшим увеличением толщины стенки сферы, формула (6) дает все более возрастающую погрешность. В частности, для наполненной сферы сплошного сечения по формуле (5) и графику 1 разрушающее давление прессования p_u стремится к бесконечности. По формуле (6) и графику 2 разрушающее давление должно превысить предел прочности материала на осевое сжатие в 4 раза.

Опасное давление $p_{дан}$ (линия 3) не превышает предела прочности материала на осевое сжатие, а для сфер сплошного сечения оно равно его половине. Учитывая неоправданно большой запас прочности при расчете по формуле (3), давление, ограничивающее прессование бетонных изделий на заполнителе из полых микросфер, следует рассчитывать по формуле (5) или (6). Рекомендуемые формулы можно применять для расчета верхней границы

давления прессования любого материала с жидкой или вязкой матрицей, поризованной микросферами с известными прочностными характеристиками материала стенок.

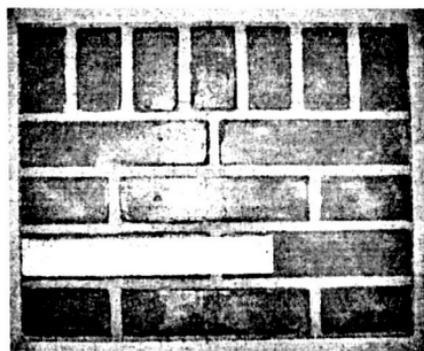
РЕЖИМЫ ПРЕССОВАНИЯ ФИБРОБЕТОНА НА ЗАПОЛНИТЕЛЕ ИЗ МИКРОСФЕР ЗОЛ-УНОСА

Алюмосиликатные микросферы добываются из зол-уноса, которые могут отличаться по химическому составу в довольно широких пределах в зависимости от сжигаемого топлива. Производители указывают только прочность по сдавливанию микросфер в цилиндре (15-28 МПа [7]), что по модели нагружения относится к контактным взаимодействиям, а не к всестороннему гидростатическому сжатию. Прочность материала стенок микросфер не указывается.

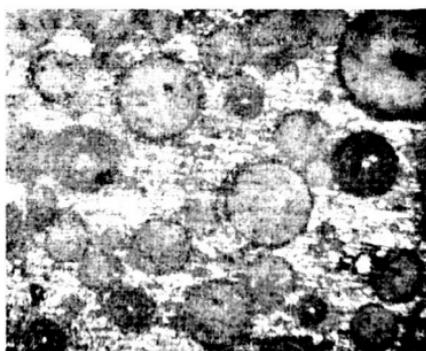
В работе [1] нами сделана оценка возможности использования цилиндрической прочности микросфер для определения верхней границы прессования поризованного бетона на примере полых стеклянных микросфер (ПСМ), для которых известны все необходимые прочностные и геометрические параметры. Анализ соотношения между экспериментальной прочностью микросфер при сдавливании в цилиндре и теоретическим предельным давлением прессования в жидкой (гелеобразной) среде с использованием формулы (5), показал, что для толстостенных сфер рассчитанная прочность оказалась выше, чем заявленная цилиндрическая прочность, причем запас прочности увеличивался по мере роста относительной толщины сферы.

Для микросфер с параметрами $\delta = 0,1D$ предельное давление прессования превысило заявленную цилиндрическую прочность микросфер в два раза. Следовательно, при выборе верхней границы давления прессования бетонов, поризованных алюмосиликатными микросферами зол-уноса, можно ориентироваться на заявленную прочность микросфер при сдавливании в цилиндре в 15-28 МПа с существенным запасом прочности.

Экспериментально установлено минимальное давление p_{min} , обеспечивающее плотную структуру материала без воздушных прослоек, которое составило 2,0-2,4 МПа. Указанные режимы прессования использованы при разработке технологии изготовления облицовочных плит с заданной фактурой поверхности



а



б

**Рис. 3. Внешний вид изделия (а)
и структура поризованного микросферами бетона (б)**

и подтверждены экспериментально. На рисунке 3 показан внешний вид плиты, имитирующей кирпичную кладку (а), и структура поризованного алюмосиликатными микросферами бетона (б), прессованного при давлении 3,0 МПа и скорости подачи нагрузки 5,0 кН/с, из смеси, жесткостью 10-15 с, содержащей от массы цемента 30-33. % микросфер, 1% фибры Ricem-8, пластифицирующие и адгезирующие полимерные добавки. Средняя плотность бетона получилась в пределах 1200-1400 кг/м³.

Внешний вид изделия характеризуется четкостью рисунка и высоким качеством поверхности, а структура бетона – практически отсутствием разрушенных микросфер, при достаточно равномерном их распределении в плотной цементной матрице. То есть, фактическое состояние структуры бетона, поризованного микросферами, соответствует оптимальному варианту, обеспечивающему минимальную плотность и водопоглощение материала. Прочностные свойства, особенно при растяжении, будут во многом зависеть от эффективности применения дисперсного армирования: вида и геометрических параметров фибры, ее содержания, прочности контактных поверхностей.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ФИБРОБЕТОНА НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

При выборе материала заполнителя бетона и армирующей фибры мы ориентировались на возможность естественной адгезии их поверхности к цементному камню. Дополнительно для создания

монолитной структуры и уменьшения водопоглощения материала в состав вводился «Виннапас» (RI 551 Z) в количестве от 4 % до 13 % от массы цемента, который по химической природе является тройным сополимером этилена, виниллаурата и винилхлорида.

Руководствуясь принципом создания непрерывного каркаса из цементного камня, окружающего заполнитель (микросферы) и полиакриловую фибру (волокно Ricem-8), с минимизацией его толщины, состав и структура бетона обрабатывались экспериментально, в зависимости от доминирующей функции изделия: теплоизоляционной, конструкционной, ограждающей, декоративной и т.д. Например, оптимальный состав бетона для производства облицовочных плит и наружного слоя многослойных панелей может быть определен по нижней границе требуемой ударной вязкости и поведения материала при разрушении. Для фибробетонов характерна хрупкая матрица, с которой начинается трещинообразование и более прочная и пластичная фибра, призванная воспринимать на себя часть силового воздействия.

Траектория начальной трещины зависит от наиболее слабых компонентов, полученных при формировании структуры бетона. Распространению трещины мешает дисперсно распределенное волокно более высокой прочности, чем другие составляющие структуры композита, заставляя ее менять направление или «ветвиться». Дальнейший характер разрушения бетона зависит от скорости раскрытия трещины, т.е. от сопротивления моноволокна разрыву по поперечному сечению, прочности ее связи с цементной матрицей и количеству фибр, попавших в плоскость трещины [8].

Анализируя полученные результаты по прочности при испытании образцов на изгиб и особенности их разрушения, были выявлены определенные закономерности, связывающие структуру материала, эффективность «работы» фибры и прочность бетона. Обнаружено два типа разрушения материала независимо от содержания фибры и конечной прочности материала: хрупкое и хрупкопластичное, которым соответствуют диаграммы деформирования, показанные на рисунке 4.

Линия 1 имеет один участок и соответствует хрупкому (стремительному) разрушению с малым прогибом образца и опасному разбрасыванию кусков материала. На линии 2 – четыре участка: участок упругопластического деформирования матрицы до об-

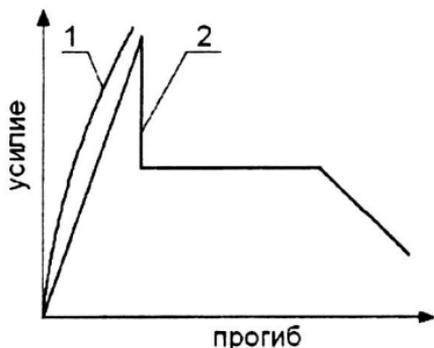


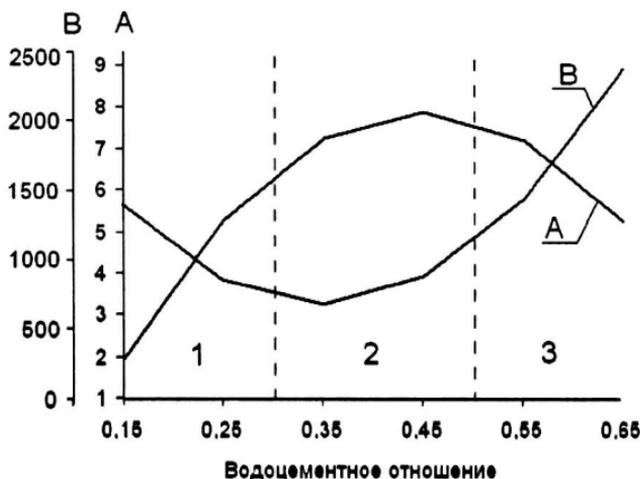
Рис. 4. Схематичное изображение диаграмм деформирования образцов из фибробетона по двум типам разрушения при изгибе

разования магистральной трещины, участок резкого падения нагрузки (примерно на 40 %); участок стабилизации нагрузки при активном деформировании фибры; участок разрушения или выдергивания фибры при критическом раскрытии трещины. Хрупкопластичное разрушение характерно образованием видимого прогиба и сохранением остаточной «фибровой» связи между половинками образца.

Последний тип разрушения предпочтителен для, например, облицовочных плит, так как более безопасен, позволяет сохранить видимую целостность изделия и продлить срок его эксплуатации.

Дальнейшей задачей оптимального структурообразования фибробетона является усиление пластической доминанты в характере его деформирования и разрушения.

В работах [8-10] нами предложена модель разрушения фибробетонов, согласно которой высокопрочная связь фибры с цементной матрицей, противодействует свободной деформации волокна, придает разрушению материала при статической нагрузке стремительный характер и уменьшает сопротивление ударному воздействию. Менее прочная связь позволяет фибре растягиваться по длине, сдвигаясь по поверхности контакта, что придает разрушению квазипластичный характер и гасит энергию удара. Прочность цементного камня и сила сцепления его с поверхностью оболочек сфер зависит от водоцементного отношения и содержания адгезива в смеси. Представленный механизм разрушения фибробетона позволяет объяснить эффект совпадения экстремальных значений прочности на изгиб и ударной вязкости, выявленный для



А – Прочность на растяжение при изгибе, МПа;
 В – Ударная вязкость, Дж/м²

Рис. 5. Взаимосвязь между прочностными характеристиками фибробетона и водоцементным отношением

фибробетонов одного состава и разного водоцементного отношения (рисунок 5).

При минимальном водоцементном отношении (0,15-0,25) материал получался рыхлым, с недостаточным сцеплением отдельных компонентов, характерным для монолитного материала, с малой прочностью на растяжение при изгибе (2,0-3,5 МПа), но с довольно высоким сопротивлением удару. Можно предположить, что такая структура материала хорошо гасила удар, так как энергия разрушения распространялась практически на весь объем материала фибры, которая могла свободно деформироваться. Образцы с водоцементным отношением (0,25-0,30) имели более плотную структуру, трещина проходила по границам микросфер или по самой матрице, а на поверхности излома наблюдалась ворсистость из-за вытягивания фибры из матрицы, что привело к хрупко-пластичному варианту разрушения.

Для области 2 (рисунок 5) характерно хрупкое разрушение и максимальная прочность матрицы и контактных зон, которая достигалась при водоцементном отношении 0,35-0,50. Фибра была хорошо закреплена в окружающем материале, и трещина распространялась по матрице, сферам, а затем – по фибре, причем

волокно разрывалась преимущественно без вытягивания торцов из матрицы. Такой вывод можно было сделать по виду излома, на котором видны разрушенные сферы и ворсистость на поверхности – слабая. При максимальной прочности на растяжение при изгибе (7,5-8,2 МПа) фибра жестко удерживалась в матрице, ее деформация была ограничена, и энергия удара локализовалась в малом объеме по поперечному сечению волокна. В результате ударная вязкость материала получилась минимальной: 750-1000 Дж/м².

При дальнейшем увеличении водоцементного отношения (область 3 рисунка 5), прочность цементного камня понижалась, избыточное количество воды играло роль смазки, что в совокупности облегчало вытягивание фибры из матрицы. Поэтому, несмотря на снижение статической прочности композита в целом, при ударном нагружении требовалась дополнительная энергия, идущая на разрушение фибры, растягивающейся по большей части своей длины. На изломе таких образцов видна значительная ворсистость и разрушение носит хрупко-пластичный характер с сохранением относительной целостности образца [9].

Оптимальный состав смеси для производства облицовочных плит и многослойных панелей может быть определен по нижней границе требуемой ударной вязкости. Эта граница известна. Цементная черепица работает в близких с облицовочной плитой условиях и ударная вязкость мелкозернистого бетона составляет 2500 Дж/м² при плотности 2700 кг/м³ [11]. Аналогичную ударную вязкость имеет поризованный микросферами бетон с 2 %-ым содержанием полиакриловой фибры плотностью 1200 кг/м³ при В/Ц = 0,68 или бетон с 1 %-ым содержанием полиакриловой фибры плотностью 1440 кг/м³ при В/Ц = 0,62 [9].

Распределение напряжений в элементарном объеме области трещины, включающем волокно с окружающей матрицей, показано на рисунке 6. При раскрытии трещины вдоль волокна, по оси z, действуют растягивающие силы, от которых в поперечном сечении фибры возникают нормальные напряжения σ_r , а на поверхности волокна и в контактной зоне возникают касательные напряжения τ_m от сдвиговой деформации относительно цементной матрицы.

Хрупкий характер разрушения связан с деформациями отрыва, возникающими в волокне от нормальных напряжений.

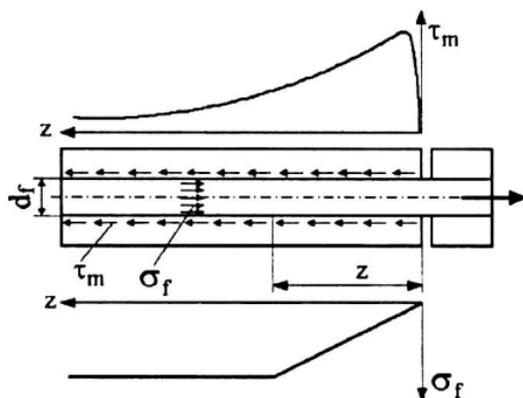


Рис. 6. Распределение напряжений в волокне и контактной зоне при раскрытии трещины

Пластичный характер разрушения происходит при сдвиговой деформации, когда волокно частично вытягивается из матрицы под действием касательных напряжений. В начальный момент образования трещины и на протяжении некоторого времени, зависящего от проч-ности сцепления матрицы и фибры, деформация волокна равна деформации матрицы. Характер разрушения будет зависеть, в конечном счете, от того, какие напряжения раньше достигнут своего предела прочности. Если нормальные напряжения – то волокно разорвется без проскальзывания и разрушение будет хрупким, если касательные напряжения – то начнется проскальзывание волокна по все большей длине, что приведет к его удлинению и стабилизации нормальных напряжений. Развитие трещины приостановится, и дальнейшее разрушение образца будет происходить только после приложения дополнительной нагрузки, скорость которого определяется деформативными и прочностными свойствами фибры.

Выявленный механизм разрушения фибробетона позволил определить пути конструирования свойств этого материала в зависимости от его назначения, требований эксплуатации и технологии изготовления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование алюмосиликатных микросфер зол-уноса в качестве мелкозернистого заполнителя для фибробетонов позволяет сформировать структуру с заданной плотностью и параметрами

замкнутой пористости, определяемой внутренним диаметром микросфер, толщиной их стенки и количеством сфер в бетонной смеси.

2. Анализ напряженного состояния толстостенной микросферы в условиях всестороннего гидростатического сжатия позволил получить теоретические зависимости для определения максимального допустимого давления прессования материала, поризованного микросферами, обеспечивающего формирование оптимальной структуры с микросферами, сохранившими свою целостность. Минимально допустимое давление прессования, обеспечивающее надлежащее качество лицевой поверхности и плотную матрицу без пустот, определяется экспериментально. Для прессованного фибробетона, поризованного алюмосиликатными микросферами зол-уноса, экспериментально определено минимально необходимое давление в 2,0-2,4 МПа и теоретически обосновано максимально допустимое давление в 15-28 МПа.

3. Полученные теоретико-эмпирические зависимости между геометрическим параметром микросфер δ/D и предельным усилием прессования поризованного микросферами материала могут найти практическое применение при разработке технологии изготовления искусственных микросфер для мотивированного выбора их геометрических параметров с учетом фактических физико-технических характеристик материала стенок.

4. Предложена модель механизма разрушения фибробетона, согласно которой высокопрочная связь фибры с цементной матрицей, противодействует свободной деформации волокна, придает разрушению материала при статической нагрузке хрупкий характер и уменьшает сопротивление ударному воздействию. Менее прочная связь позволяет фибре растягиваться по длине, сдвигаясь по поверхности контакта, что придает разрушению квазипластичный характер и гасит энергию удара.

5. Предложенный механизм разрушения экспериментально подтвержден на примере сопоставления свойств исследуемых фибробетонов при статической и динамической нагрузке: максимальная прочность бетона на растяжение при статическом изгибе соответствовала его минимальной ударной вязкости. Наиболее простой путь обеспечения требуемых свойств фибробетонов с фиксированным содержанием фибры, заполнителя и добавок - регулирование водоцементного отношения. Для фибробетона

с 1 %-ным содержанием полиакриловой фибры максимальная прочность на растяжение при изгибе 7,5-8,2 МПа и минимальная ударная вязкость 750-1000 Дж/м² зафиксированы при водоцементном соотношении 0,35-0,5. Для фибробетона, изготовленного при водоцементном отношении 0,62, достигнута наибольшая ударная вязкость 2400 Дж/м², причем прочность на растяжение при изгибе составила 4-5 МПа, что сопоставимо с показателями пескобетона.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонович, И. А. Формирование структуры прессованного бетона, поризо-ванного микросферами / И. А. Леонович, Э. И. Батыновский // Строительная наука и техника. – 2011. – № 2. – С. 47-52.

2. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

3. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов: учебник для вузов / М.Д. Подскребко. – Мн.: Вышэйш. шк., 2007. – 797 с.

4. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, Ф. П. Яковлев, В. В. Матвеев – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев: Дельта, 2008. – 816 с.

5. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Э. И. Старовойтов. – М.: Физматлит, 2008. – 384 с.

6. 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.

7. Микросферы зол-уноса // Вибротехцентр [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.vtcenter.ru/production/production.htm>. – Дата доступа : 10.05.2007.

8. Леонович, И. А. Механизм разрушения фибробетонов на заполнителе из микросфер зол-уноса / И. А. Леонович, А. А. Леонович // Вестн. Бел. – Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 149-158.

9. Леонович, И. А. Прочностные свойства фибробетонов с заполнителем из микросфер при ударном нагружении / И. А. Леонович // Вестн. Белорус. – Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 129-136.

10. 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. 70-75.

11. Черепица цементно-песчаная. Технические условия : СТБ 1002-2003. – Введ. 01.01.04. – Минск : Минстипроект, 2004. – 10 с.