

УДК 691.32

И. А. Леонович, А. А. Леонович

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ФИБРОБЕТОНОВ НА ЗАПОЛНИТЕЛЕ ИЗ МИКРОСФЕР ЗОЛ-УНОСА

Выявлены разновидности характера перемещения трещин в фибробетонах с заполнителем из алюмосиликатных микросфер. Раскрыт механизм накопления повреждений, согласно которому высокопрочная связь фибры с цементной матрицей противодействует свободной деформации волокна, придает разрушению материала при статической нагрузке хрупкий характер и уменьшает сопротивление ударному воздействию. Оптимально прочная связь позволяет фибре растягиваться по длине, проскальзывая 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.

Введение

В представленной работе обобщены закономерности, которые проявились при разрушении мелкозернистого легкого бетона, заполнителем которого являются алюмосиликатные микросферы (АСМ), выделяемые из зол-уноса теплоэлектростанций. АСМ представляют собой полые стеклокристаллические сферы диаметром 30–500 мкм и являются практически готовым заполнителем для бетона, образующим замкнутые пустоты, не имеющие сообщения с окружающей атмосферой. Помимо низкой плотности (насыпная плотность в сухом состоянии равна 300–450 кг/м³) и высокой дисперсности, алюмосиликатные микросферы обладают значительной для легкого заполнителя механической прочностью (предел прочности на сжатие 15–28 МПа), низкой теплопроводностью (при 20 °С теплопроводность составляет 0,08 Вт/(м·К)), радиопрозрачностью, термостойкостью (температура плавления не ниже 1300 °С), высокой текучестью [1–3].

В исследуемых фибробетонах содержание микросфер в смеси варьировалось от 33 до 100 % от массы цемента. Средняя плотность бетона при этом изменялась в пределах от 1700 до 850 кг/м³.

В качестве гидравлического вяжущего использовался портландцемент 500 Д 20 и белый портландцемент М500. Для улучшения сопротивления бетона

действию растягивающих напряжений и ударному воздействию применялось дисперсное армирование неметаллической фиброй, стеклянной и полиакрилонитриловой (ПАН), сочетающей сравнительную легкость и высокую прочность [4–6]. Содержание полиакриловой фибры составляло 0,7; 1; 1,5 % от массы сухой смеси, содержание стеклянной фибры составляло 2,7; 3,2 и 4 % от массы сухой смеси.

В состав бетона вводились полимерные добавки. Для улучшения сцепления поверхности микросфер и фибры с цементным камнем и для обеспечения объемной гидрофобизации материала использовался виннапас (RL 551 Z) в количестве 6–14 % от массы цемента. Для увеличения подвижности смеси с одновременным снижением водопотребления использовались современные супер- и гиперпластификаторы в количестве 0,5–1,5 % от массы цемента. Полимерные добавки положительно повлияли на прочностные свойства бетона при статическом и динамическом нагружении [7, 8].

Исследование характера перемещения трещин при разрушении

Для выявления механизма разрушения материалов с заполнителем из микросфер, содержащих фибру, изучалось строение поверхностей излома, а

также поверхностей шлифов с помощью лупы с увеличением $\times 10$, бинокулярного микроскопа МБС с увеличением $\times 24$, микроскопа НЕОРНОТ 21 с увеличением $\times 50$ (рис. 1). Поверхности образцов шлифовались на абразивной бумаге с последовательно снимающейся зернистостью от 400 до 800 и доводились на фетровом круге с алмазной пастой зернистостью 800.

При исследовании поверхностей изломов выявлено четыре разновидности ха-

рактера перемещения магистральной трещины в АСМ-фибробетонах. На рис. 2 показаны схемы этих разновидностей разрушения:

- а) перемещение трещины по матрице из цементного камня;
- б) распространение трещины по матрице и границе раздела матрица-поверхность сферы;
- в) перемещение трещины по матрице и оболочкам микросфер;
- г) смешанный характер разрушения.

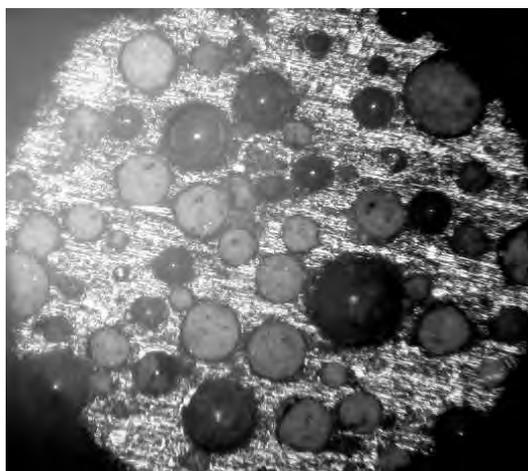


Рис. 1. Фотография поверхности шлифа АСМ-фибробетона плотностью 1330 кг/м^3 (увеличение $\times 50$ с использованием микроскопа НЕОРНОТ 21)

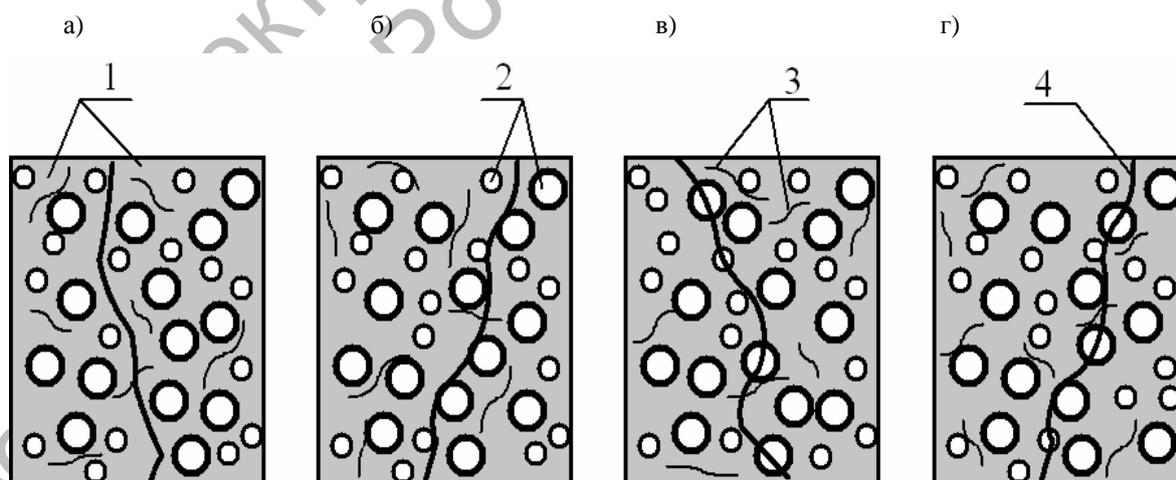


Рис. 2. Схема строения и варианты разрушения фибробетона с заполнителем из алюмосиликатных микросфер: 1 – матрица из цементного камня; 2 – алюмосиликатные микросферы; 3 – фибра; 4 – трещина

Установлено, что характер разрушения зависит от состава смеси, водоцементного соотношения и свойств оболочки микросфер.

Разрушение по схеме *a* наблюдается при низкой прочности матрицы из-за высокого или низкого водоцементного соотношения ($0,2 \geq \text{ВЦ} \geq 0,6$). Прочность бетона на растяжение при изгибе составляла 2–4 МПа.

Если прочность связи матрицы с поверхностью сфер недостаточна, то в процессе разрушения сферы остаются целыми, на берегах трещины отчетливо видны неразрушенные сферы (схема *b*). Такой тип разрушения наблюдается при отсутствии в составе смеси материала, играющего роль адгезива (клея). Прочность материала на растяжение при изгибе в этом случае зависит от прочности матрицы и концентрации микросфер в смеси.

Разрушение по типу *b* наблюдается, когда матрица имеет высокую прочность и в состав смеси введен адгезив. В контактной зоне поверхности микросфер с цементной матрицей получается хорошее сцепление, поэтому развивающаяся трещина идет по более слабым местам, проникая в заполнитель. При таком характере разрушения прочность материала на растяжение при изгибе максимальная и составляет 7–9 МПа.

Разрушение по смешанному типу при распространении трещины по телу матрицы, по оболочкам микросфер и по границе раздела матрица-оболочка сферы наблюдается, если прочность сферы, матрицы и границы матрица-сфера соизмеримы. В этом случае имеет место высокая, но не максимальная прочность материала (6–4,5 МПа), которую возможно повысить за счет увеличения прочности цементного камня, особенно при снижении содержания микросфер в материале.

Влияние длины фибры и прочности её сцепления с цементной матрицей на характер разрушения фибробетона

Обнаружено два варианта поведения фибры, попавшей в область магистральной трещины:

1) разрушение фибры по поперечному сечению в плоскости трещины без ее существенного вытягивания из матрицы;

2) вытягивание фибры из цементной матрицы с ее максимальным растяжением и последующим разрушением.

В первом случае на поверхностях излома фибра малозаметна. При увеличении $\times 24$ определяются места разрушения волокон в виде колец диаметром 15–18 мкм. После образования трещины в бетонной матрице скорость раскрытия будет зависеть от сопротивления моноволокна разрыву по поперечному сечению и количеству фибр, попавших в плоскость трещины.

Во втором случае на поверхности излома наблюдается «шерстистость», причем максимальная длина волокон, выходящих из плоскости разрушения близка к половине длины отдельного волокна.

Энергия, поглощаемая при разрыве волокна, попадающего в сечение разрушения, для единицы его площади

$$W = n \cdot 2 \int_0^{\ell/2} \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} dz = n \cdot \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} \cdot \ell, \quad (1)$$

где n – число фибр на единицу площади разрушения; ℓ – длина волокна; σ – напряжение в плоскости поперечного сечения волокна; ε – относительная продольная деформация волокна.

Чем длиннее участок волокна, участвующий в деформировании, тем больше энергия, поглощенная при разрушении (рис. 3). Это значит, что увеличение прочности сцепления волокна с цементной матрицей ограничит длину деформируемой части волокна, тем самым уменьшит возможность накопления энергии материалом фибры при разрушении и приведет к более быстрому разрушению при меньшей нагрузке, особенно при ударном воздействии. Поэтому в образцах с повышенным содержанием виннапаса RL 551 Z ударная вязкость оказалась ниже, и при статиче-

ских испытаниях на изгиб разрушение происходило стремительно, как в образцах без фибры. Желательна, особенно для органической «нежесткой» фибры без анкерных утолщений у торцов жесткая ан-

керовка волокна в матрице только в непосредственной близости к торцам, волокна при свободном проскальзывании поверхности волокна внутри матрицы, что возможно только теоретически.

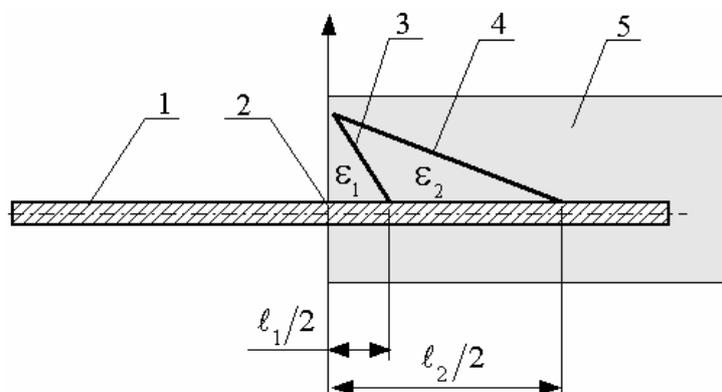


Рис. 3. Участки волокна, вовлеченные в упругопластическую деформацию при хорошем и слабом сцеплении его поверхности с цементной матрицей: 1 – волокно; 2 – сечение разрушения; 3 – область деформации волокна на длине l_1 при хорошем сцеплении его поверхности с матрицей; 4 – область деформации волокна на длине l_2 при слабом сцеплении его поверхности с матрицей; 5 – бетонная матрица

Передача нагрузки от матрицы к волокнам осуществляется по граничным поверхностям фибры и цементной матрицы. Характеристики этих поверхностей, их взаимное сцепление являются важными для свойств фибробетона. На характер разрушения влияют также длина, диаметр, объемное содержание волокна и его расположение по отношению к образовавшейся трещине.

Через действующие в волокне и на контактной поверхности напряжения можно выразить критическую длину волокна $l_{кр}$, ниже которой оно будет легко вытягиваться из матрицы, не оказывая упрочняющего воздействия на бетон. При раскрытии трещины работать в полную силу на растяжение будут только те волокна, которые были расположены перпендикулярно к трещине, скрепляя ее границы, поэтому будет вполне оправдано рассматривать только продольное направление волокон по отношению к растягивающей нагрузке [9, 10]. Как показали испытания, волокна, через которые трещина

прошла приблизительно посередине их длины, разрушаются друг за другом, начиная с тех, которые расположены ближе к началу трещины, где ее раскрытие максимально.

Модель отражает поведение фибры (рис. 4). Согласно модели тонкое волокно длиной l заключено в упругой матрице, а соединение волокна с матрицей считается идеальным. В направлении волокон, по оси z , действуют растягивающие силы. При этом в поперечном сечении фибры диаметром d_f возникают нормальные напряжения σ_f , а на поверхности волокон возникают касательные напряжения τ_m от сдвиговой деформации относительно цементной матрицы.

В начальный момент образования трещины и на протяжении некоторого времени, зависящего от прочности сцепления матрицы и фибры, деформация волокна равна деформации матрицы. Касательные напряжения скачкообразно набирают максимальную величину до

достижения пластических деформаций в матрице. Нормальные напряжения в волокне возрастают до предела прочности, если сцепление матрицы и фибры достаточно крепкое и проскальзывания по кон-

тактной поверхности не наблюдается. В таком материале происходит стремительное разрушение по хрупкому образцу, и фибра практически не влияет на развитие трещины.

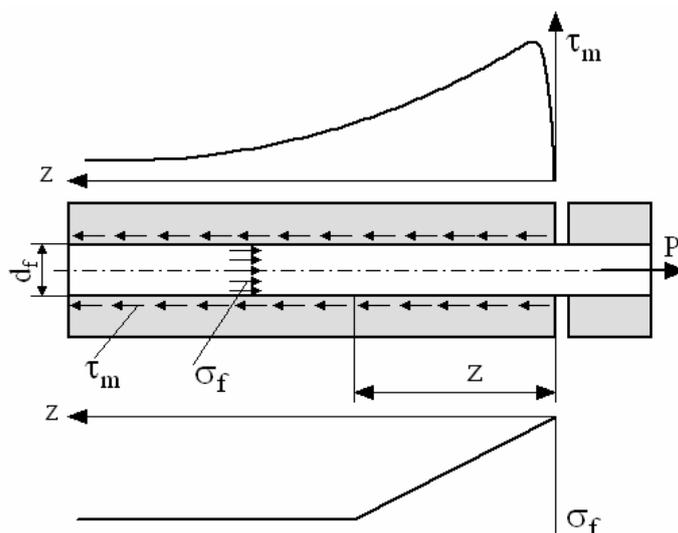


Рис. 4. Распределение напряжений в волокне, попавшем в плоскость трещины: σ_f – нормальное напряжение в поперечном сечении волокна; τ_m – касательное напряжение на контактной поверхности матрица-фибра

Если сдвиговые усилия превышают силы сцепления матрицы и фибры, начинается проскальзывание волокна на все большей длине, что ведет к его удлинению и стабилизации нормальных напряжений в волокне. Развитие трещины останавливается, и дальнейшее разрушение образца зависит от деформативных и прочностных свойств фибры. Разрушение волокон такого фибробетона происходит только после приложения дополнительной растягивающей нагрузки.

В момент приостановки раскрытия трещины растягивающие силы уравновешены сдвигающей нагрузкой на участке z:

$$\sigma \cdot \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} = \tau_m \cdot \pi \cdot d_f \cdot z. \quad (2)$$

Если нормальные напряжения достигли своего предела прочности при растяжении σ_{fu} , то

$$\frac{l_{кр}}{2} = z = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_m} \cdot \frac{d_f}{4}. \quad (3)$$

Для критической относительной длины справедлива зависимость

$$\frac{l_{кр}}{d_f} = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_m}. \quad (4)$$

Если относительная длина волокна l/d_f меньше критической, то волокно будет быстро вытягиваться из матрицы, не оказывая упрочняющего действия.

Результаты испытаний АСМ-фибробетонов при статическом и динамическом изгибе

Испытываемые составы с полиакриловой фиброй Ricem 8 подтвердили представленный механизм разрушения.

Из сопоставления свойств материала на статическую прочность при

изгибе и прочность при ударной нагрузке следует, что эти свойства у бетонов с низкомодульной фиброй во многом противоположны. В образцах, выполненных с разным водоцементным отношением

(рис. 5), максимум прочности на растяжение при изгибе (7,5–8,2 МПа) соответствовал минимуму ударной вязкости (750–1000 Дж/м²) [8].

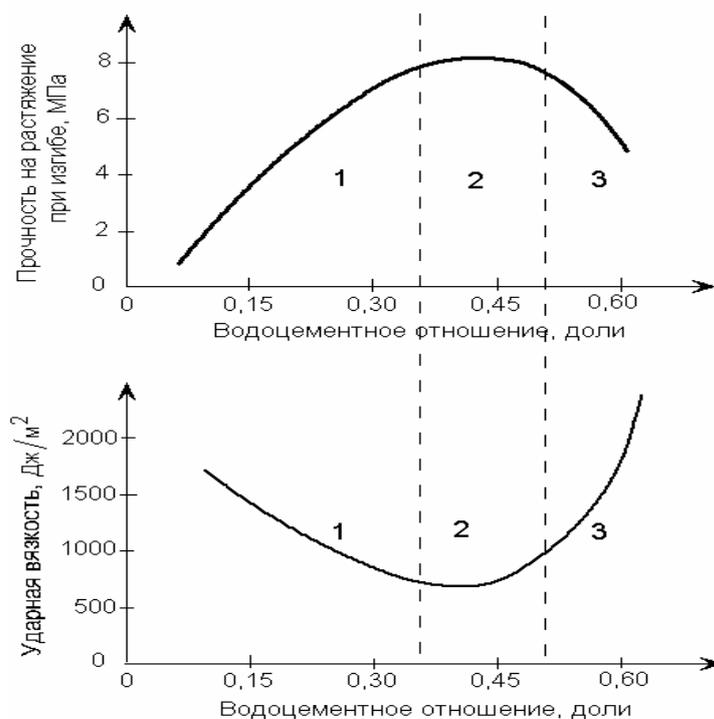


Рис. 5. Взаимосвязь между ударной вязкостью и прочностью на растяжение при статическом изгибе для АСМ-фибробетонов с разным водоцементным отношением

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 (2–3 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 более высоким водоцементным отношением (0,25–0,37) имели плотную структуру, разрушение матрицы происходило по границам микросфер или по самой матрице, а на поверхности излома наблюдалась ворсистость из-за вытягива-

ния фибр из матрицы, на что расходовалась часть энергии разрушения.

Таким образом, для образцов области 1 (см. рис. 5) характерны общая низкая прочность при статической нагрузке из-за непрочной цементной матрицы и высокое сопротивление ударному нагружению вследствие использования высокой деформативной способности фибры.

Для области 2 (см. рис. 5) характерна максимальная прочность матрицы, которая достигалась при водоцементном отношении 0,37–0,5 ед. Фибра была хорошо закреплена в окружающем материале, и разрушение происходило по смешанному варианту: трещина распространялась по матрице, сферам, затем по фибре, причем волокно разрыва-

лось преимущественно без вытягивания торцов из матрицы. Такое заключение можно было сделать по виду излома, на котором видны разрушенные сферы и слабая ворсистость на поверхности. При максимальной прочности на растяжение при изгибе цементного камня (7–8 МПа) фибра прочнее 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 довольно высокой прочности цементный камень имел низкую деформативность и поэтому слабо сопротивлялся удару, который приходился в основном на волокно, расположенное в поперечном направлении по отношению к удару.

При водоцементном отношении более 0,5 ед. (область 3) цементный камень получался не таким прочным, 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.

Предложенная модель разрушения объясняет также тот факт, что при статическом изгибе образцы с максимальной прочностью цементного камня разрушались хрупко, а образцы с меньшей прочностью (см. рис. 5, области 1 и 3) – пластично, при постепенном раскрытии трещины, которое сдерживалось вытягиваемой фиброй. В образцах с прочной цементной матрицей фибра настолько сильно сцеплена с матрицей, что, попадая в плоскость развивающейся трещины, разрушается по поперечному сечению, диаметр которого всего лишь 15–30 мкм, не используя преимущества своей высокой деформативности. На тех участках графика, где прочность матрицы меньше, фибра может постепенно освобождаться

из цементного камня, растягиваясь при этом, что приводит к пластичному характеру разрушения. Эти образцы до конца не разрушились при испытаниях, а сохранили еще достаточно высокую манипуляторную прочность.

Испытания на изгиб призм размером 40×40×160 мм, выполненных из АСМ-бетона без дисперсного армирования с полиакриловой фиброй и стеклянной фиброй, подтвердили хрупкий характер разрушения образцов без фибры и с фиброй при ее чрезмерном сцеплении с цементным камнем. Образцы из АСМ-фибробетона при оптимальном сцеплении поверхности фибры и цементного камня показали пластичный характер разрушения.

Иллюстрацией разного характера разрушения образцов является диаграмма деформирования в координатах нагрузка–прогиб (рис. 6), которая согласуется с результатами, полученными в [4].

Линия 1 имеет один участок, причем замечено, что бетон на алюмосиликатных микросферах без фибры является нелинейно-упругим материалом; АСМ-бетон, содержащий органическую фибру, является линейно-упругим материалом, поэтому для него значение секущего модуля упругости совпало с модулем упругости, равным тангенсу угла наклона линии упругости диаграммы деформирования. На линии 2 четыре участка: участок упруго-пластического деформирования матрицы до образования магистральной трещины; участок резкого падения нагрузки (примерно на 40 %); участок стабилизации нагрузки при активном деформировании фибры; участок разрушения и выдергивания фибры при критическом раскрытии трещины.

Пластичный характер разрушения фибробетона повышает срок эксплуатации и безопасность использования изделий из него. Например, если здание облицовано плитами из такого бетона и по разным причинам в плите возникнет трещина, то фрагменты облицовки

удержатся от обрушения, а при малом раскрытии трещины изделие сохранит внешнюю целостность и удовлетворительный декоративный вид. На рис. 7 показаны фотографии образцов из АСМ-фибробетона, имеющие магистральные трещины и сохраняющие свою целостность под дополнительным изгибающим воздействием.

Проведенный анализ показывает, что увеличение несущей способности материала при статической нагрузке может быть достигнуто повышением прочности матрицы, в то время как требуемое сопротивление воздействию динамических нагрузок достигается регулированием водоцементного отношения, содержанием и свойствами фибры.

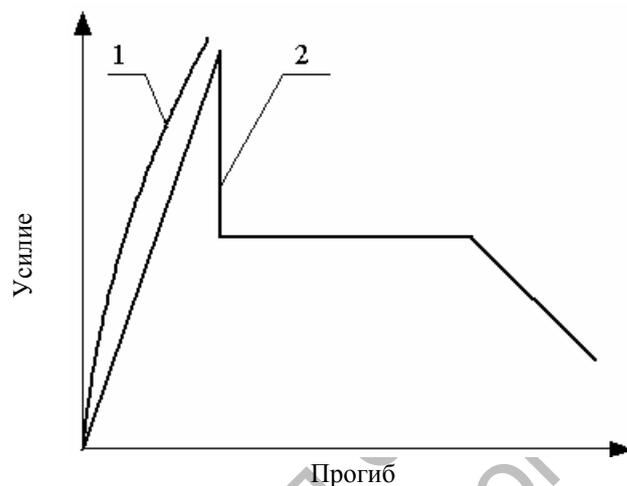


Рис. 6. Схематичное изображение диаграмм деформирования образцов при статическом изгибе: 1 – АСМ-бетон без фибры или с фиброй при ее чрезмерном сцеплении с цементным камнем; 2 – АСМ-фибробетон при оптимальном сцеплении поверхности фибры и цементного камня

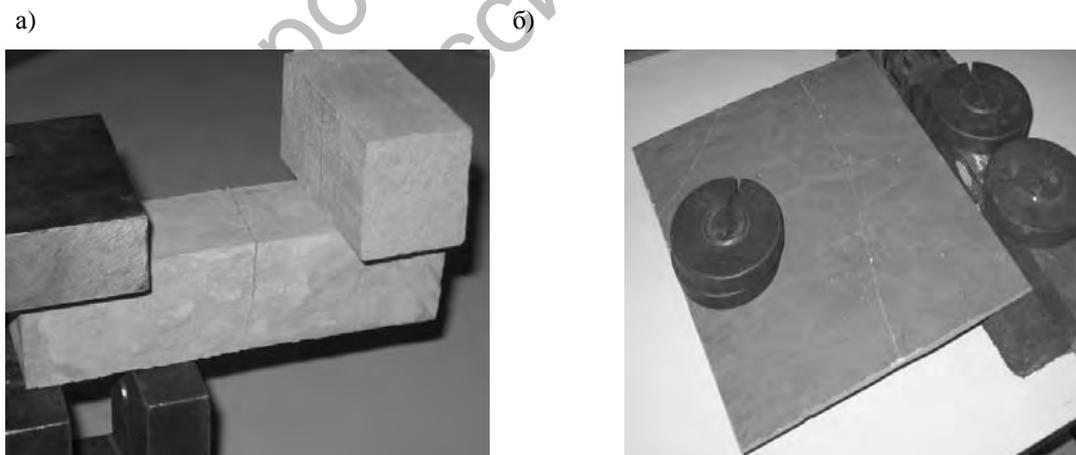


Рис. 7. Изделия из АСМ-фибробетона, имеющие трещины, под действием длительного изгибающего усилия: а – нагружение призмы размерами 40×40×160 мм с одной трещиной; б – нагружение плитки размером 300×300×6 мм с двумя трещинами

Таким образом, выявление механизма разрушения АСМ-фибробетона позволило определить пути регулирования

свойств этого материала в зависимости от назначения, требований условий эксплуатации и технологии изготовления.

Полученные сведения о механизме разрушения использованы при выборе длины фибр и корректировке содержания адгезивов в АСМ-фибробетонах.

Заключение

Выявлены разновидности характера перемещения трещины в АСМ-фибробетоне:

– по матрице из цементного камня, если ее прочность меньше прочности микросфер и сил сцепления их поверхности с цементным камнем;

– по матрице и границе раздела матрица-поверхность сферы при сравнимых прочностях поверхностного сцепления и цементного камня;

– по матрице и оболочкам микросфер, если цементный камень имеет прочность, сравнимую с прочностью оболочек;

– смешанный характер разрушения, при котором наблюдается максимальный уровень механических свойств.

Раскрыт механизм накопления повреждений и разрушения фибробетонов с заполнителем из алюмосиликатных микросфер, согласно которому высокопрочная связь фибры с цементной матрицей противодействует свободной деформации волокна, придает разрушению материала при статической нагрузке хрупкий характер и уменьшает сопротивление ударному воздействию. Оптимально прочная связь позволяет фибре растягиваться по длине, проскальзывая 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.

Предложенный механизм разрушения экспериментально подтвержден на примере сопоставления свойств исследуемых фибробетонов при статической и динамической нагрузке: максимальная прочность при статическом изгибе бетонной матрицы соответствовала минимальной ударной вязкости материала. Наиболее простой путь обеспечения требуемых

свойств фибробетонов с фиксированным содержанием фибры, заполнителя и добавок – регулирование водоцементного отношения. Для АСМ-фибробетона плотностью 1240 кг/м^3 с 1,5-процентным содержанием полиакриловой фибры максимальная прочность на растяжение при изгибе 7–8 МПа и минимальная ударная вязкость $750\text{--}1000 \text{ Дж/м}^2$ зафиксированы при водоцементном соотношении 0,37–0,5. Для АСМ-фибробетона, изготовленного при водоцементном отношении 0,62, достигнута наибольшая ударная вязкость 2400 Дж/м^2 , причем прочность на растяжение при изгибе составила 4–5 МПа.

При раскрытии трещины 0,01–0,2 мм фибробетон с оптимальной прочностью сцепления поверхности фибры и матричного состава обладает остаточной прочностью, определяемой сопротивлением разрыву попавших в разрушенное сечение фибр, причем трещина визуально малозаметна, что позволяет сохранить функциональность изделий, например облицовочных и теплозащитных плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микросферы зол-уноса // Вибротехцентр [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа : [http : // www.vtcenter.ru / production / production.htm /](http://www.vtcenter.ru/production/production.htm/). – Дата доступа : 10.05.07.
2. **ГОСТ 25818-91.** Зола уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М. : Госстрой СССР, 1991. – 14 с.
3. **Павленко, С. И.** Легкие бетоны с применением зол электростанций / С. И. Павленко – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
4. **Holschemacher, K.** Non – metallic fibres or structural concrete / K. Holschemacher, M. Juknat, S. Нцер // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. тр. в 2 ч. Ч. 1 : Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2007. – С. 6–21.
5. **Олюнин, П. С.** Дисперсное армирование цементных композитов полимерными волокнами / П. С. Олюнин // Бетон и железобетон. – 2009. – № 1. – С. 21–24.
6. **Богатина, А. Ю.** Фибропенобетон для перекрытия каркасных зданий / А. Ю. Богатина, Л. В. Моргун // Промышленное и гражданское

строительство. – 2005. – № 2. – С. 34–35.

7. **Леонович, И. А.** Прочностные и упругие свойства фибробетона с заполнителем из микросфер при статической кратковременной нагрузке / И. А. Леонович, И. М. Кузменко, Е. С. Павлюк // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2007. – № 12 – С. 63–67.

8. **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.

9. **Фудзии, Т.** Механика разрушения композиционных материалов : пер. с яп. / Т. Фудзии, М. Дзако. – М. : Мир, 1982. – 232 с. : ил.

10. **Рабинович, Ф. Н.** О некоторых особенностях работы композитов на основе дисперсно-армированных бетонов / Ф. Н. Рабинович // Бетон и железобетон. – 1999. – № 6. – С. 19–23.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 14.04.2009

I. A. Leonovich, A. A. Leonovich
Destruction mechanism of fibrous
concrete on the fly-ashes microsphere
filler

A variety of crack displacements in fibrous concrete with aluminosilicate microsphere filler have been revealed. The damage accumulation mechanism has been explained according to which a high-strength fibre bond with cement paste counteracts free fibre deformation, gives brittleness to the material under static loads and reduces the resistance to impact. Extremely high cohesion enables fibre to elongate slipping along the contact surface, which gives a quasielastic character to destruction and puts out the impact energy. Cement paste strength and its cohesion force with the surface of microsphere shells depend on the air-cement ratio and adhesive contents in the mixture.