



УДК 624.074

**Л.А. Панченко** – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и строительной механики

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

## ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОФИБРОБЕТОНА

В настоящее время все более широкое применение находит стеклофибробетон – мелкозернистый бетон, армированный стекловолокнами, дисперсно распределенными по его объему.

Проведенные экспериментальные исследования [1, 2, 3] выявляют влияние вида, расположения и количества армирующих волокон на структуру и прочность стеклофибробетона.

Теоретическое выражение для прочности композита в предположении, что волокна распределены однородно и связь между волокнами и матрицей достаточно основательная, а также при допущении, что две фазы действуют независимо, имеет вид

$$S_{cu} = V_f S_{fu} + V_m S_{mu}, \quad (1)$$

где  $V_m$  и  $V_f$  – доли объема матрицы и волокон соответственно,  $S_{mu}$  и  $S_{fu}$  – пределы прочности на растяжение материала матрицы и волокна соответственно.

Практически это уравнение не применимо к цементноволокнистым композитам по следующим причинам:

1. Волокна короткие и случайно ориентированы в зависимости от процесса производства композита. Вклад волокон в какое-либо направление меньше, чем доля объема волокон.

2. Прочность волокна на растяжение относительно высока по сравнению с прочностью на растяжение цементнобетонной матрицы. Поэтому ввиду совместности деформаций растягивающие напряжения для матрицы и волокон совершенно различны. Следовательно, когда матрица растрескивается, волокна не могут достичь своего предела прочности, уменьшая таким образом свой вклад в прочность композита. Стекланные волокна в силу большей жесткости могут лучше обеспечить прочность композита по сравнению с полимерными волокнами. Деформации, необходимые для полного развития прочности, относительно малы, что в большей степени сдерживает растрескивание матрицы.

3. В большинстве случаев связь между волокнами и матрицей недостаточная, чтобы использовать полную прочность волокна. Следовательно, большая доля волокон выходит из матрицы до своего разрушения.

Выход волокон уменьшает прочность композита за счет большей податливости. Коэффициенты, отражающие связь, зависят от отношения длины волокна к диаметру ( $l/d$ ) и типа волокна.

Если повреждение, обусловленное выходом волокна, возможно, его вклад обычно выражается как функция прочности связи, а не прочности волокна на растяжение. Следовательно, формулу (1) можно модифицировать как

$$S_{cu} = aV_m S_{mu} + bV_f \frac{1}{d} t, \quad (2)$$

где  $t$  – среднее напряжение связи,  $a$ ,  $b$  – эмпирические константы.

Коэффициент  $a$  отражает эффект смягчения деформаций, проявляемый цементнобетонной матрицей в области нагружения после образования трещин. Постоянная  $b$  ответственна за эффект случайного распределения волокон. Эти две постоянные определяются при использовании результатов экспериментов для заданной композиции типа волокон и матрицы.

С другой стороны, существует описание принципов построения полной диаграммы «напряжение-деформация», пространства трещин, ширины трещин для длинных и коротких ориентированных волокон для упрощенного случая, когда связь между волокнами и матрицей чисто фрикционная и матрица имеет единственную величину разрушающего напряжения.

Основываясь на идеализированной диаграмме (рис. 1) для композита с хрупкой матрицей, усиленной ориентированными волокнами, можно доказать, что предельное напряжение композита  $S_{cu}$  не зависит от прочности матрицы и может быть выражено как

$$S_{cu} = S_{fu} V_f, \quad (3)$$

а при введении в (3) коэффициента эффективности длины

$$S_{cu} = \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) S_{fu} V_f, \quad (4)$$

где  $l_c$  – критическая длина волокна, равная

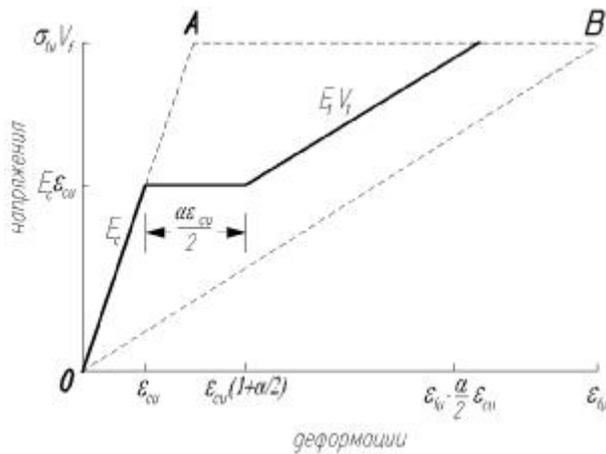


Рис. 1. Идеализированная диаграмма «напряжение-деформация» для композита с хрупкой матрицей

$$l_c = 2s_f \frac{A}{pt}, \quad (5)$$

где  $t$  – предельное напряжение на сдвиг в контактной зоне;  $p$  и  $A$  – периметр и площадь сечения волокна.

Если предположить, что волокна выходят раньше, чем разрушаются, и учесть фактор их ориентации, соответственно получаем:

а) при выстраивании волокон в направлении действия нагрузки

$$s_{cu} = V_f \frac{l}{d} t, \quad (6)$$

б) при случайном распределении волокон в плоскости

$$s_{cu} = \frac{2}{p} V_f \frac{l}{d} t, \quad (7)$$

в) при случайном распределении волокон в пространстве

$$s_{cu} = \frac{1}{2} V_f \frac{l}{d} t. \quad (8)$$

В композитах, содержащих прерывистые волокна, на концах волокон образуется концентрация напряжений. Растягивающее напряжение, которое воспринимало бы непрерывное волокно, приходится на окружающие фибры. По теории Райме, прерывистые волокна могут внести в прочность композита самое большое 6/7 своей прочности. Для волокон со значительным числом трещин эта величина понижается до 1/2.

Необходимость особого теоретического отношения к изгибу возникает вследствие большого различия, установленного экспериментально между напряжением разрыва и пределом прочности на растяжение. Первый может быть более чем в два раза больше второго.

Главная причина отличия стекловолоконного композита состоит в том, что кривая «напряжение-деформация» после трещинообразования на растянутой стороне сильно отличается от исходной кривой. Механизм изгибного упрочнения большей частью обусловлен квазипластическим поведением волокнистых композитов на растяжение в результате вытягивания волокон или упругого удлинения их после трещинообразования в матрице.

Когда растягивающие деформации растут, образуются трещины, часть нагрузки передается через трещину посредством пересекающих ее волокон, и, следовательно, равновесие сохраняется. Обусловленные образованием этих трещин, растягивающие деформации возрастают, и расстояние нейтральной оси от растянутой поверхности увеличивается. При этом деформации растяжения возрастают в большей мере, чем деформации сжатия.

До определенной величины нагрузки композит подчиняется линейно-упругому физическому закону (рис. 2а). На рис. 2б показана эпюра напряжений, типичная для цементно-волоконного композита после образования трещин, когда при постоянной нагрузке волокна растягиваются или вытягиваются сквозь трещину по всей растянутой части сечения.

Это предположение вполне применимо к стеклоцементным композитам в раннем возрасте, когда волокна плохо связаны и растягиваются перед изломом или вытягиваются после излома при примерно постоянной нагрузке.

Приравнивая внутренние моменты, которые представлены для балки на рис. 2а и 2б, получаем

$$\frac{s_t h^2}{6} = s_{cu} \frac{13}{32} h^2; \quad (9)$$

$$s_{cu} = 0,41s_t.$$

Это значит, что после образования трещин предел прочности на растяжение при больших деформациях составляет 0,41 такого же рода величины в случае, когда может иметь место изгибное упрочнение. Таким образом, если материал имеет диаграмму «напряжение-деформация» при растяжении, показанную на рис. 3а, после образования трещин не будет происходить уменьшение нагрузки (внутреннего момента).

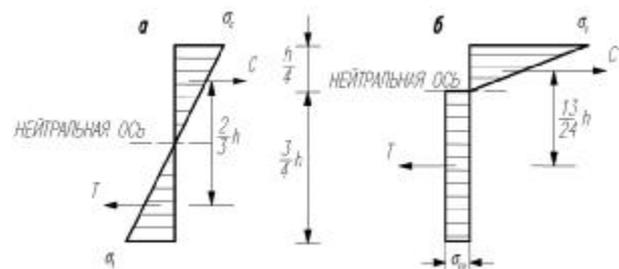


Рис. 2. Эпюры напряжений при изгибе: а – упругий материал; б – материал, упругий в сжатой зоне и пластичный в растянутой зоне



Сжимающее напряжение можно вычислить, приравняв С и Т (рис. 2б):

$$S_c = 6S_{cu}. \quad (10)$$

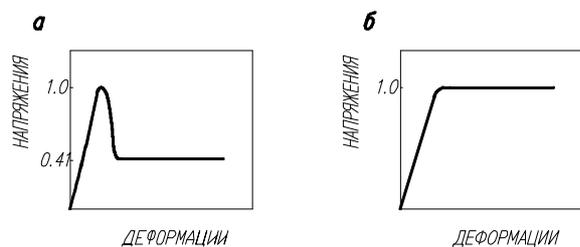


Рис 3. Диаграмма «напряжение-деформация» при растяжении:

а – без уменьшения изгибной нагрузки после образования трещин;

б – при величине нагрузки после образования трещин, в 2,44 раза превышающей нагрузку

Аналогичный подход можно использовать, чтобы показать, что предельное растягивающее напряжение ( $S_{cu}^*$ ) намного больше, чем непосредственный предел прочности на растяжение. Например, если принять диаграмму «напряжение-деформация» на рис. 3б и эпюры напряжений на рис. 2а и 2б для балки, выполненной из тех же материалов и повреждающейся при той же нагрузке, то заменой  $S_t$  в уравнении (9) на  $S_{cu}$  получаем

$$S_{cu}^* = 2,44S_{cu}. \quad (11)$$

### Литература

1. Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Экспериментальные исследования деформирования стеклофибробетонных элементов конструкций// Бетон и железобетон – пути развития: Научные труды 2-ой Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону. –М.: НИИЖБ, 2005. – Т. 2. –С. 266-269.
2. Ата Эль К. Солиман, Панченко Л.А. Экспериментальное исследование процесса трещинообразования стеклофибробетонных балок/ Сб. науч. тр. регион. науч.-практ. конф. «Молодые ученые – производству». – Ст. Оскол: СТИ МИСиС, 2005. – С. 126-128.
3. Ата Эль К. Солиман. Рациональное использование стеклопластика для усиления элементов бетонных и железобетонных конструкций: Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.23.01. – Белгород, 2005. – 159 с.