

*Панченко Л.А., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ФИБРОБЕТОНА

panchenko.bstu@mail.ru

Материал бетонной матрицы передает нагрузку высокомодульным волокнам посредством сдвигающих сил на поверхности раздела. Основную долю напряжений воспринимают волокна, и несущая способность композитного элемента зависит от их объемного содержания. В настоящей статье предложен новый подход к оптимальному армированию фибробетонных конструкций по определению прочности композита, основанный на законе смесей. Представлены формулы для критического объема волокон и предела прочности фибробетона на растяжение.

Ключевые слова: *предел прочности фибробетона, критический объем волокон, закон смесей.*

1. Основные предпосылки

Мировая практика строительства определила фибробетон как один из перспективных строительных материалов XXI века. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон выделяется за счет увеличения удельной и суммарной поверхности заполнителя, а, следовательно, повышенной физико-химической и химической активности вяжущих материалов [1].

Сформированные большей частью на эмпирической основе строительные нормы и правила для фибробетонных конструкций [2, 3] не исключают их совершенствования на пути теоретических исследований. В настоящей работе предложен новый подход к оптимальному армированию фибробетонных конструкций и определению прочности композита, основанный на законе смесей [4].

Упрочнение высокомодульными волокнами основывается на предположении, что материал бетонной матрицы передает волокнам приложенную нагрузку посредством сдвигающих сил, действующих на поверхности раздела. Поскольку модуль продольной упругости волокна больше аналогичного модуля матрицы, то основную долю напряжений воспринимают волокна, а несущая способность композитного элемента в большой степени зависит от их объемного содержания [5].

Предполагаются следующие варианты поведения композита.

1. Композит будет немедленно разрушаться после разрушения матрицы. Этот хрупкий тип разрушения может побудить недостаточная доля объема волокон.

2. После растрескивания матрицы композит будет продолжать сопротивляться нагрузкам, если они будут меньше достигнутой величины.

Когда матрица растрескивается, нагрузка передается от композита на волокна, пронизывающие трещину. При дальнейшем росте нагрузки и деформаций эти волокна одно за

другим выходят из матрицы, что ведет к постепенному разрушению композита. Доля объема волокон снова оказалась недостаточной.

3. Если доля объема волокон достаточно высокая, после растрескивания матрицы они будут продолжать воспринимать возрастающую нагрузку. Этот вариант поведения композита и предусматривается для оптимального использования свойств матрицы и волокна.

2. Критическая доля объема волокна при одноосном растяжении

В упругой области основными переменными являются модули упругости матрицы и волокон. Предполагается, что деформации в матрице, волокнах и композите одинаковы, то есть, нет проскальзывания. Таким образом, нагрузка, прикладываемая к композиту, есть сумма нагрузок, приложенных к двум компонентам.

При E_m и E_f , представляющих модули упругости матрицы и волокон, и V_m и V_f , представляющих доли объема каждого компонента фазы (как доли объема композита), модуль композита E_c можно выразить, используя закон смесей:

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f,$$

или

$$E_c = (1 - V_f) E_m + V_f E_f. \quad (1)$$

Умножив обе части на деформацию ε , по закону Гука, получаем:

$$\sigma_c = (1 - V_f) \sigma_m + V_f \sigma_f, \quad (2)$$

где σ_c , σ_m , σ_f – растягивающие напряжения композита, матрицы и волокна соответственно.

Формулы (1) и (2) действительны при следующих предположениях: волокна непрерывны и ориентированы в направлении напряжений; перед образованием трещин волокна полностью связывают матрицу; коэффициент Пуассона волокна и матрицы принимается равным нулю.

Если волокна распределены дискретно (прерывно) и случайно, величина, представляющая долю объема волокон в формулах (1) и (2), должна быть умножена на коэффициент эф-

фактивности, зависящий от соотношения размеров армируемого элемента и длины волокна, а также других факторов [2,3].

Эффект включения волокон заключается в способности восприятия ими нагрузки после растрескивания матрицы. За пределами сопротивления трещинообразованию, учитывая, что вклад матрицы исчезает, предел прочности композита на растяжение (σ_{cu}) представим как функцию предела прочности волокон (σ_{fu}) и их доли, т.е.

$$\sigma_{cu} = V_f \sigma_{fu}. \quad (3)$$

Для того чтобы композит продолжал сопротивляться большим нагрузкам, чем нагрузка, соответствующая образованию трещины, необходимо превышение критического объема волокон $V_{f(crit)}$. Эта величина определяется как объем волокон, который после растрескивания матрицы будет воспринимать нагрузку, приложенную к композиту до трещинообразования. Как обусловлено выше, она должна быть умножена на коэффициент эффективности. Приравняв правые части выражений (2) и (3), с учетом того, что в уравнении (2) $\sigma_f = \varepsilon_{tu} E_f$, ε_{tu} – деформация, соответствующая пределу прочности матрицы σ_{tu} , получаем:

$$V_{f(crit)} = \frac{\sigma_{tu}}{[\sigma_{tu} + (\sigma_{fu} - \varepsilon_{tu} E_f)]}. \quad (4)$$

3. Прочность фибробетона

Матрица и волокна вносят вклад в восприятие растягивающей нагрузки на композит. Однако при достижении предела прочности композита относительная пропорция нагрузки, воспринимаемой каждой фазой, неизвестна.

Теоретическое выражение для определения предела прочности композита, в предположении, что волокна распределены однородно и связь между волокнами и матрицей достаточно основательная по отношению к разрушению волокон, а также при допущении, что два компонента действуют независимо, имеет вид

$$\sigma_{cu} = V_m \sigma_{tu} + V_f \sigma_{fu}, \quad (5)$$

или

$$\sigma_{cu} = \sigma_{tu} + V_f (\sigma_{fu} - \sigma_{tu}),$$

где σ_{tu} – предел прочности на растяжение материала матрицы.

При оптимальном использовании свойств матрицы и волокна, т.е. при учете формулы (4), находим

$$\sigma_{cu} = \sigma_{tu} + \frac{\sigma_{tu} (\sigma_{fu} - \sigma_{tu})}{[\sigma_{tu} + (\sigma_{fu} - \varepsilon_{tu} E_f)]}. \quad (6)$$

Упомянутый выше коэффициент эффективности распределения волокон вводится во второе слагаемое.

4. Теоретические принципы армирования волокнами при изгибе

4.1. Механизм противостояния фибр изгибу

Необходимость особого теоретического отношения к изгибу возникает вследствие большого различия, установленного экспериментально, между пределом прочности на растяжение при изгибе и непосредственным пределом прочности на растяжение. Первый может быть в три раза больше второго.

Главная причина отличия цементоволокнистого 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 фибр или упругого удлинения фибр после трещинообразования в матрице.

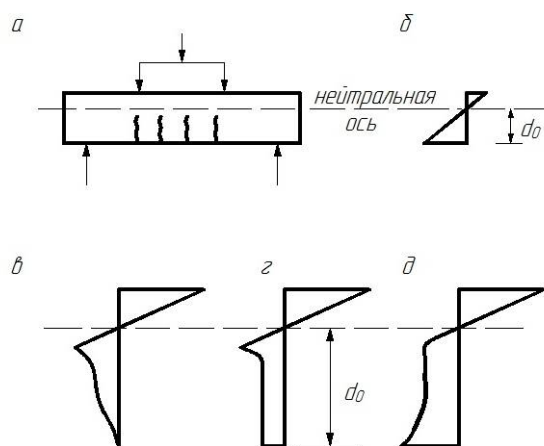


Рис. 1. Распределение деформаций и напряжений в цементоволокнистой балке с трещинами: а – балка под нагрузкой; б – распределение деформаций после образования трещин; в, з, д – эпюры напряжений, зависящие от доли объема волокон

На рис. 1 показана армированная волокнами балка, подверженная возрастающей нагрузке. Когда растягивающие деформации растут, образуются трещины, часть нагрузки передается через трещину посредством пересекающих ее волокон, и, следовательно, равновесие сохраняется. Обусловленные образованием этих трещин, деформации растяжения возрастают, и расстояние от нейтральной оси до растянутой поверхности увеличивается. При росте нагрузки на балку деформации растяжения возрастают в большей мере, чем деформации сжатия.

Эпюры напряжений в растянутой зоне, показанные на рис. 1, в, з, д, соответствуют различным долям объема фибр – ниже, равным или выше величины $V_{f(crit)}$.

4.2. Теоретический анализ изгиба элемента из цементоволокнистого композита после трещинообразования

На рис. 2, а представлена эпюра напряжений в упругой стадии деформирования балки. Существует приближенное представление, основанное на упрощенном предположении формы эпюры напряжений в растянутой зоне балки после образования трещин. На рис 2, б показана эпюра напряжений, типичная для цементово-

локнистого композита в раннем возрасте после образования трещин, когда при постоянной нагрузке волокна растягиваются или вытягиваются сквозь трещины по всей растянутой области. Обозначим, как и ранее, предел прочности на растяжение после образования трещин σ_{cu} , а предел прочности бетона на сжатие (растяжение) $\sigma_c(\sigma_t)$.

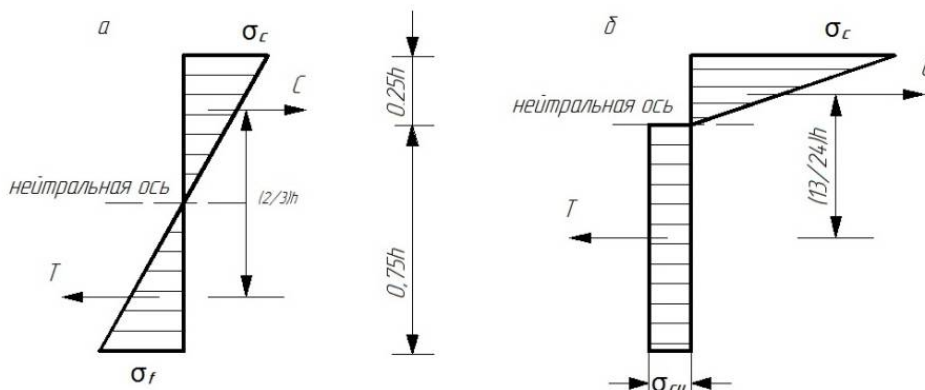


Рис. 2. Эпюры напряжений при изгибе:

а – упругий материал; б – материал, упругий в сжатой зоне и пластичный в растянутой зоне

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

$$\frac{\sigma_t h^2}{6} = \sigma_{cu} \frac{13}{32} h^2; \sigma_{cu} = 0,41\sigma_t. \quad (7)$$

Это значит, что после образования трещин сопротивление при больших деформациях не превышает 0,41 предела прочности на растяжение при изгибе. Таким образом, если материал имеет диаграмму «напряжение-деформация»,

показанную на рис. 3, а, после образования трещин деформации нарастают без увеличения нагрузки (внутреннего момента).

Из выражения (7) получаем величину

$$\sigma_t = 2,44\sigma_{cu}, \quad (8)$$

являющуюся основным параметром диаграммы на рис. 3, б. При этом нагрузка на балку превышает нагрузку трещинообразования в 2,44 раза.

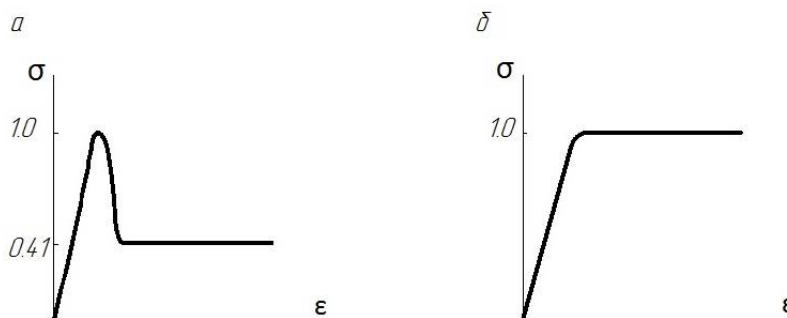


Рис. 3. Кривые «напряжение – деформация» при одноосном растяжении:

а – при сохранении нагрузки после образования трещин; б – величина нагрузки после образования трещин в 2,44 раза превышает нагрузку трещинообразования

Если принять теперь кривую «напряжение-деформация» на рис. 3, б и эпюры напряжений на рис. 2, а и 2, б для волокнистой балки, выполненной из однородного материала, и разрушение при той же нагрузке, то сжимающее

напряжение на рис. 2, б можно вычислить, приравнивая S и T :

$$\sigma_c = 6\sigma_{cu}. \quad (9)$$

Для волокон различной ориентации, которые вытягиваются при трещине раньше, чем

наступает их разрушение, величину σ_t можно вычислить, используя коэффициент η , который принимается равным: 1 – при выстраивании волокон в направлении действия нагрузки, $3/8(1/5)$ – при случайном распределении волокон в плоскости (пространстве). Таким образом,

$$\text{при } \eta = 1 \quad \sigma_t = 2,44V_f\tau\frac{l}{d}; \quad (10)$$

$$\text{при } \eta = 3/8 \quad \sigma_t = 1,55V_f\tau\frac{l}{d}; \quad (11)$$

$$\text{при } \eta = 1/5 \quad \sigma_t = 1,22V_f\tau\frac{l}{d}; \quad (12)$$

Смысл формул (10) – (12) следующий: предел прочности на растяжение при изгибе после образования трещины зависит только от объема, формы и ориентации волокон и фрикционного сопротивления связи, и не зависит от сопротивления матрицы, хотя последнее может отдельно влиять на сопротивление связи; он возрастает пропорционально V_f и l/d и вдвое больше для первого случая по сравнению с третьим случаем.

4.3. Влияние связи между волокном и матрицей на предел прочности на растяжение при изгибе

Пределная деформация растяжения стеклоцементного композита может значительно уменьшаться в течение нескольких лет. Это не обязательно означает, что пределная деформация растяжения волокон непрерывно уменьшается. Скорее связь между волокном и матрицей улучшается, поскольку продукты гидратации содействуют увеличению поверхности контакта и сил трения на ней. Деформация в композите при заданном напряжении зависит от длины несвязанного волокна, и, следовательно, чем

больше длина связи, тем меньше предельная деформация растяжения композита.

Это увеличение связи может воздействовать на композит несколькими путями:

а) хорошо связанное волокно, пересекающее трещину в матрице, будет более высоко напряжено, чем волокно с недостаточной связью, потому что деформация в трещине очень большая и раскрытие трещины будет передаваться по короткой несвязанной длине волокна;

б) волокна при беспорядочных углах поперек трещин в матрице будут испытывать более высокие изгибные напряжения;

в) снижение в композите предельной деформации растяжения может произойти в результате снижения изгибного сопротивления, когда предел прочности на растяжение остается тем же самым. Основные принципы этого подхода представлены на рис. 4 и 5.

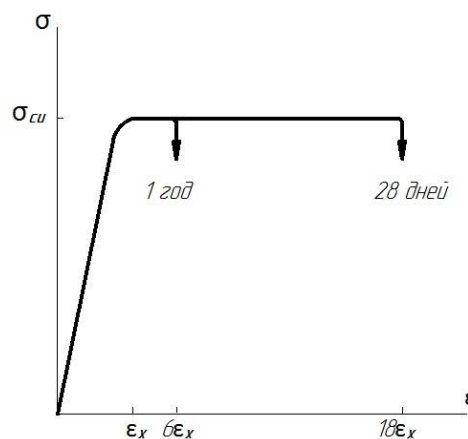


Рис. 4. Идеализированная диаграмма «напряжение – деформация» для цементоволокнистого композита

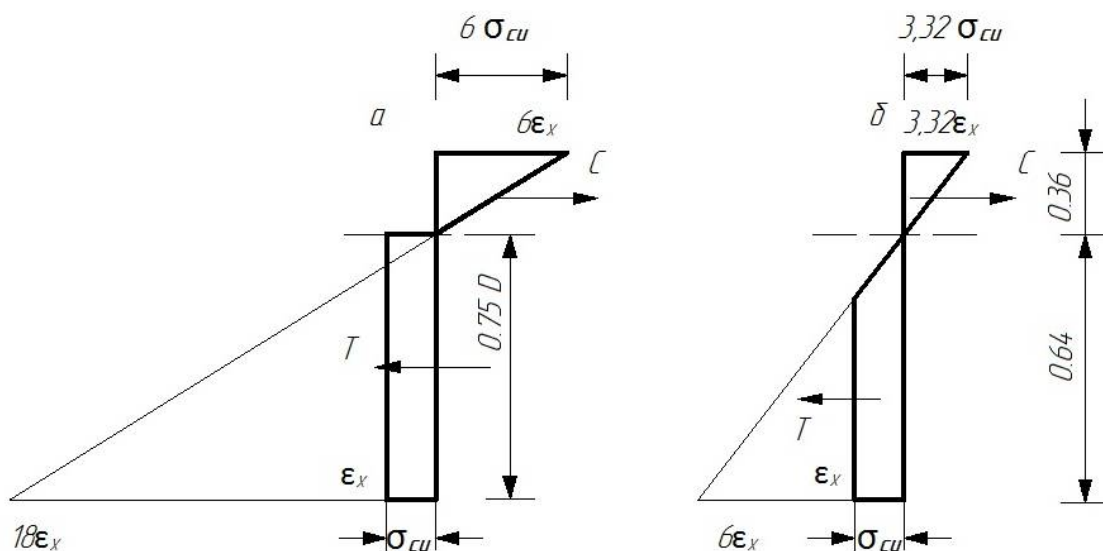


Рис. 5. Эпюры деформаций и напряжений при изгибе для диаграмм на рис. 3: а – для диаграммы 3, а предельный момент равен $0,41\sigma_{cu}h^2$; б – для диаграммы 3, б, предельный момент равен $0,35\sigma_{cu}h^2$

Видно, что увеличение связи между волокном и бетонной матрицей, ведущее к снижению предельной энергии деформации, может быть причиной уменьшения предела прочности на растяжение при изгибе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Изд. Стройиздат, 1989. 176 с.
2. ВСН 56-97. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. М.: Изд. НИЦ «Строительство», 1997. 94с.
3. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции. М.: Изд. ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. 61с.
4. Мэттьюз Ф., Ролингс Ф. Композитные материалы. Механика и технология; Пер. с англ. С.Л. Баженова. М.: Изд. Техносфера, 2004. 408 с.
5. Панченко Л.А. Рационализация использования стеклофибробетона в строительстве зданий и инженерных коммуникаций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 2. С. 34–36.

Panchenko L.A.

THE DEFINITION OF FIBRECONCRETE STRENGTH LIMIT

Concrete matrix material transmits load to high-module fibre by means of shear forces on partition surface. Fibres receive main part of stresses, in connection with carrying capacity of composite element depends on them volume content. In present article is modern approach to optimal reinforcement of fibre-concrete construction and aggregate strength definition proposed. It is on composites law based. They are formula for critical volume of fibres and formula for fibreconcrete tensile strength limit.

Key words: fibreconcrete strength limit, critical volume of fibres, composites law.