

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАДЕЖНОСТИ ПО СТАЛЕФИБРОБЕТОНУ

К. В. Талантова, доктор техн. наук, профессор

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Аннотация. Известно, что для обеспечения эксплуатационной надёжности строительных конструкций в расчётах учитываются коэффициенты надёжности по нагрузкам и по материалам. Коэффициенты надёжности по нагрузкам определяются условиями эксплуатации. Коэффициенты надёжности по материалам – видом выбранного материала.

Исходя из того, что материала – железобетона – нет, а соединение стальной арматуры и бетона реализуется в железобетонных конструкциях, где бетон и арматура работают, как правило, сохраняя свои характеристики, то коэффициенты надёжности по материалам при проектировании железобетонных конструкций принимаются для бетона и арматуры. В то же время при насыщении бетона, как правило, мелкозернистого, стальными волокнами-фибрами получается строительный композиционный материал – сталефибробетон. При этом в российских нормативных документах по сталефибробетонным конструкциям и первой, и актуализированных редакциях представлены коэффициенты надёжности по бетону и стальным фибрам подобно нормам по железобетонным конструкциям. Однако композит – сталефибробетон – обладает физико-механическими свойствами, которые кардинально отличаются от свойств и бетона, и фибр. Отсутствие коэффициентов надёжности по материалу и в нормах, и в работах учёных послужило основанием для проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований, в результате которых были получены коэффициенты надёжности по сталефибробетону.

Ключевые слова: сталефибробетон, сталефиброжелезобетонные конструкции, коэффициенты надёжности, расчетные сопротивления, экспериментально-теоретические исследования, типы стальных фибр, напряженно-деформированное состояние.



*Талантова
Клара Васильевна*

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании конструкций на основе сталефибробетона (СФБ) в соответствии с СП [1] расчетные сопротивления материала определяются с использованием коэффициентов надёжности по бетону и стальным фибрам.

Однако при изложении правил проектирования в СП [1] употребляется термин «бетон-матрица», который принят в исследованиях композиционных материалов. Но в нормах нет упоминания о том, что СФБ-композит. Бетон же превращается в бетонную матрицу, со свойствами, отличающимися от свойств исходного бетона, только при насыщении

его волокнами. Не ясно, как можно назначать бетон-матрицу без учёта волокон. Кроме того, поскольку СФБ – композиционный материал, то при проектировании конструкций на основе СФБ коэффициенты надёжности должны быть определены по материалу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В представляемой работе рассматривались типы фибр, предлагаемые отечественными производителями и наиболее часто упоминаемые в исследованиях российских учёных [2,3]. Исследования выполнялись на основе сравнительной оценки физико-

механических характеристик СФБ, изготовленного с использованием четырёх типов фибр: токарной – марка Т1, гладкой из проволоки общего назначения

по ГОСТ 3282 – марка П1 (базовый вариант), фрезерованной из листа – марка Л1, фрезерованной из сляба – марка Фр. 1 (таблица 1).

Таблица 1. Стальные фибры, используемые в экспериментах

Тип фибры	Диаметр фибр d_f , $d_{fред}$, мм	Длина фибр l_f , мм	Длина/диаметр l_f/d_f	Расчетное сопротивление R_{sf} , МПа	Модуль упругости, E_{sf} , МПа
Токарная	0,24	20	83	400	$2,0 \times 10^5$
Проволочная	0,39	32	82	500	$2,0 \times 10^5$
*Листовая	0,60	35	58	400	$1,9 \times 10^5$
*Фрезерованная	0,60	34	57	300	$1,8 \times 10^5$

$d_{fред} = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}}$ – приведенный диаметр фибр некруглого сечения,

A_f – площадь поперечного сечения фибры, мм.

Всего было изготовлено 15 серий образцов с различным объемным процентом армирования ($\mu_{fv} = 1,0; 1,5; 2,0$), всего 1140 образцов. Выбор размеров образцов определялся требованиями ГОСТ на бетоны [4]. При этом учитывались размеры сечений проектируемых конструкций и тот факт, что в зависимости от соотношения размеров сечения элемента ($b \times h$) и длины фибр (l_f) изменяются коэффициенты ориентации последних (k_{or} и k_n) от 0,1 до 0,98 [2] и степень их использования колеблется в широких пределах. По результатам, полученным в экспериментах, были определены сопротивления СФБ

сжатию R_{fbm} , растяжению при изгибе R_{fbm} и растяжению при раскалывании R_{fbshM} , МПа.

В представляемых исследованиях на основе статистической обработки экспериментальных данных для прочностных характеристик СФБ, приготовленного с использованием рассмотренных типов фибр, были построены гистограммы эмпирических распределений (рисунок 1), которые позволили предположить, что характер распределения для всех рассматриваемых случайных величин прочности СФБ (R_{fbm} , R_{fbm} , R_{fbshM}) подчиняется нормальному закону [5].

Проверка по критерию χ^2 Пирсона подтвердила сделанное предположение (уровень значимости составил 0,01) [5,6]. На рисунке 2 приведены соответствующие кривые нормального распределения прочности СФБ на сжатие.



Рис. 1. Гистограммы распределения экспериментальных данных прочности на сжатие для образцов – кубов с разными типами фибр: а) токарной; б) проволочной в) листовой; г) фрезерованной; процент фибрового армирования $\mu_{fv} = 2\%$

Определение нормативных сопротивлений СФБ на сжатие выполнялось по формуле

$$R_{fbn} = R_{fbm} - \gamma \cdot \sigma_{fbm}, \quad (1)$$

где γ – квантиль функции Лапласа;

$$(\Phi) \gamma = P - 0,5 \quad (2)$$

В формулах 1 и 2:

Φ – табулированная функция Лапласа;

R_{fbn} – нормативное сопротивление прочности СФБ на сжатие;

R_{fbm} – математическое ожидание прочности СФБ на сжатие;

σ_{fb} – среднеквадратическое отклонение параметра прочности СФБ на сжатие R_{fbn} .

При обеспеченности $P=0,95$ по таблицам значений функции Лапласа определен $\gamma = 1,645$. Подобные же зависимости использованы для определения нормативных сопротивлений СФБ на растяжение при изгибе R_{fbn} и растяжение при раскалывании R_{fbshn} .

Расчетные сопротивления СФБ определялись с обеспеченностью $P = 0,99865$, при этом квантиль функции Лапласа $\gamma = 3$. Расчетное сопротивление СФБ на сжатие вычислялось по формуле:

$$R_{fb} = R_{fbm} - 3 \cdot \sigma_{fb} \quad (3)$$

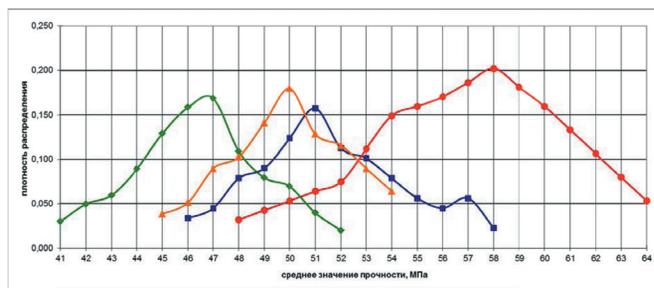


Рис. 2. Кривые плотности вероятностей прочности сталефибробетона на сжатие по экспериментальным данным (образцы – кубы $10 \times 10 \times 10$ см с $\mu_{fv}=2\%$) для фибр: листовая – \blacklozenge ; фрезерованной – \blacktriangle ; токарной – \blacksquare ; проволочной – \bullet

При выполнении представляемых экспериментальных исследований велись наблюдения за характером разрушения образцов СФБ. При этом разрушение образцов с проволочной и токарной фиброй проходило плавно и вязко без потери формы образца, с фрезерованной фиброй – хрупко с характерным треском и заметными разрушениями образца, с листовой фиброй разрушение СФБ имело характер средний между СФБ с проволочной и фрезерованной фиброй. Описанное поведение образцов СФБ наблюдалось независимо от объемного содержания фибр.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сравнительный анализ данных позволил оценить прирост прочности СФБ на сжатие R_{fbn} в соотношении с прочностью контрольного бетона R_{bm} , который составил от 10 % до 50 %, что соответствует литературным данным [7,8,9]. Максимальный прирост прочности был получен для СФБ с проволочной фиброй. При этом разброс показателей прочности на сжатие в зависимости от типа фибр относительно невелик. Этот факт еще раз подтверждает то, что прочность СФБ на сжатие в большой степени зависит от характеристик бетонной матрицы.

Прирост прочности СФБ на растяжение при изгибе к прочности исходного бетона составил в среднем 150 ... 200 %. Максимальная прочность СФБ на растяжение при изгибе, как и при сжатии, была получена при использовании проволочной фибры, со снижением на 10 ... 15 % в случае использования токарной, далее СФБ с листовой фиброй, и, со снижением более чем на 30 %, – с фрезерованной фиброй. При увеличении размеров сечения образца прочность на растяжение при изгибе для проволочной, токарной и листовой фибр относительно друг друга несколько сглаживается, но СФБ с фрезерованной фиброй, как и ранее, показал самые низкие характеристики.

Прочность на растяжение при раскалывании превысила показатели исходного бетона на 60 ... 140 %. При этом прочность СФБ с проволочной фиброй, как и в предыдущих случаях, выше, чем для других типов фибр. Показатели прочности СФБ с токарной, листовой и фрезерованной фибрами оказались близки по значениям с небольшим разбросом, особенно для объемного содержания фибр – 1,0 и 1,5 %. Относительно небольшой прирост прочности СФБ для всех типов фибр связан с высокими показателями прочности исходного бетона.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАДЕЖНОСТИ ПО СТАЛЕФИБРОБЕТОНУ

Результаты большого объема экспериментальных исследований позволили сделать вывод о высокой стабильности прочностных характеристик СФБ, характеризуемых коэффициентами вариации в пределах. То есть статистическая изменчивость свойств композита – СФБ – заметно ниже, чем традиционного бетона. Однако для обеспечения заданной надежности разрабатываемых элементов конструкций на основе СФБ требуется определить коэффициенты надежности по материалу.

На основе приведенных выше результатов статистической обработки экспериментальных

данных для обеспечения заданной надежности разрабатываемых элементов СФБК (СФЖБК) были определены коэффициенты надежности по сталефибробетону на сжатие в зависимости от типа

рассматриваемых в представляемой работе фибр, объемного процента армирования и геометрии сечения образца из соотношения $R_{fibt}/R_{fib}=\gamma_{fb}$ (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты надежности по сталефибробетону на сжатие γ_{fb} для различных типов и объемного содержания фибр, в зависимости от размеров сечения

Тип фибр $b \times h$ (см)	Токарная			Проволочная			Листовая			Фрезерованная		
	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
4×4×16	1,14	1,27	1,12	1,11	1,09	1,14	1,12	1,15	1,12	1,23	1,16	1,19
10×10×10	1,06	1,11	1,14	1,14	1,09	1,15	1,04	1,07	1,16	1,12	1,21	1,11
10×10×40	1,12	1,09	1,18	1,19	1,14	1,17	1,17	1,17	1,13	1,15	1,15	1,21

Аналогично установлены коэффициенты надежности на растяжение при изгибе и растяжении при раскалывании (таблица 3).

Таблица 3. Коэффициенты надежности по сталефибробетону на растяжение при изгибе γ_{fib} и растяжении при раскалывании γ_{fbsh} для различных типов и объемного содержания фибр, μ_{fv} , в зависимости от напряженного состояния

Тип фибр	Токарная			Проволочная			Листовая			Фрезерованная		
Объемный процент армирования $\mu_{fv}, \%$	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
Напряженное состояние												
Растяжение при изгибе, γ_{fib}	1,06	1,11	1,14	1,14	1,09	1,15	1,04	1,07	1,16	1,12	1,21	1,11
Растяжение при раскалывании, γ_{fbsh}	1,18	1,09	1,18	1,19	1,14	1,17	1,17	1,18	1,13	1,15	1,15	1,21

Дальнейшая обработка данных позволила установить усредненные коэффициенты надежности по сталефибробетону в зависимости от типа фибр и напряженного состояния элемента, из рассматриваемых в представляемой работе (таблица 4).

Для сопоставления расчетных данных прочности СФБ на осевое растяжение и экспериментальных данных прочности СФБ на растяжение при раскалывании в представляемой работе был использован эмпирический коэффициент перехода от прочности на растяжение при раскалывании СФБ к прочности на его осевое растяжение, предложенный в работе [10].

Этот коэффициент составляет от 1,17 до 1,3 в интервале прочности на осевое растяжение СФБ от 1,6

до 5,5 МПа, $R_{bt}=R_{fbsh}/k$. С учетом этих исследований получен коэффициент надежности по СФБ на осевое растяжение $\gamma_{fbt}=1,23$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В СП «Сталефибробетонные конструкции» [1] коэффициент надежности по бетону равен 1,3, такой же коэффициент надёжности по бетону приведён и в СП «Бетонные и железобетонные конструкции» [11]. Известно, что в железобетонных конструкциях бетон работает, как правило, в сжатых зонах, но не работает в растянутых, где усилия растяжения восприни-

Таблица 4. Коэффициент надежности по сталефибробетону в зависимости от типа фибр и напряженного состояния образца

Напряженное состояние	Тип фибр			
	Токарная	Проволочная	Листовая	Фрезерованная
Сжатие, γ_{fb}	1,15	1,14	1,16	1,19
Растяжение при изгибе, γ_{fib}	1,17	1,15	1,12	1,21
Растяжение при раскалывании, γ_{fbsh}	1,16	1,13	1,18	1,24

мает арматура. В то время как в конструкциях на основе сталефибробетона (СФБК) и сжатие, и растяжение передаются на сталефибробетонные сечения со своими сопротивлениями, в сталефиброжелезобетонных конструкциях (СФЖБК) в растянутых зонах сталефибробетонное сечение работает совместно с арматурой. Таким образом, для обеспечения эксплуатационной надёжности СФБК (СФЖБК) целесообразно при их проектировании применение коэффициентов надёжности по сталефибробетону. Несомненно, необходимо продолжить исследования в этом направлении.

Библиографический список

1. СП 52-104-2006*. Свод правил по проектированию и строительству: сталефибробетонные конструкции (к СНиП 52-01-2003). — М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2010. — 80 с.
2. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. — М., 1987. — 148 с.
3. Шабловский, Е.А. Стальные фибры для дисперсного армирования бетонных конструкций / Е.А. Шабловский. — М., 1990. — 61 с. — (Серия: Конструкции жилых и общественных зданий. Технология индустриального домостроения: обзор. информ. / ВНИИТАГ; вып. 4.
4. ГОСТ 10180–12. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В.Е. Гмурман. — 9-е изд. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.
6. Венецкий, И.Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе / И.Г. Венецкий, В.И. Венецкая. — М.: Статистика, 1979. — 447 с.
7. Аболиньи, Д.С. Дисперсно хаотически армированный бетон как двухфазный материал и некоторые экспериментальные данные о его прочности при центральном сжатии и изгибе / Д. С. Аболиньи, В. К. Кравинскис // Исследования по механике строительных материалов и конструкций. — Рига: РПИ, 1969. — Вып. 4. — С. 117–123.
8. Куликов, А.Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Куликов. — Л., 1975. — 25 с.
9. Применение фибробетона в строительстве: материалы краткосрочного семинара / под ред. Л.Г. Курбатова. — Л.: ЛДНТП, 1985. — 80 с.
10. Арончик, В.Б. К вопросу о методе косвенного испытания растяжения для бетонов, армированных волокнами / В.Б. Арончик, О.В. Коротышевский, Р.К. Глуде // Фибробетон и его применение в строительстве: сб. науч. тр. — М.: НИИЖБ, 1979. — С. 122–125.
11. СП 63. 13330 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.(с изменениями № 1,2). — М.: Минстрой РФ, 2015 — 303 с.