

Д. т. н. **В. Н. Соков** (✉), к. т. н. **В. В. Соков**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

УДК 666.762.11:666.974.2]:666.98:666.762.1-494

ТЕРМОСТОЙКИЙ КОРУНДОВЫЙ БЕТОН, АРМИРОВАННЫЙ ВОЛОКНАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, СИНТЕЗИРУЕМЫМИ В МАТРИЦЕ ПРИ ОБЖИГЕ. ЧАСТЬ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ, ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНОМ*

Рассмотрены различные стадии деформации бетона, армированного волокнами. Очевидно, что при определенных условиях их размещения в матрицах можно существенно улучшить механические показатели изделий и сдерживать образование в них трещин. Необходимо, чтобы композиция вела себя как структурно единый материал с одинаково прочным сцеплением на границе раздела между волокнами и матрицей.

Ключевые слова: деформации, дисперсное армирование, матрица, бетон, напряжение, трещины, правила смеси, композиция, нарастающее разрушение, термостойкость.

В публикации [1] подчеркивается, что относительное объемное содержание волокон в композиции должно быть достаточно большим, чтобы доля нагрузки, воспринимаемая волокном, была максимальной. Однако если содержание волокон в материале превышает некоторый уровень, то это может привести к ухудшению свойств материала вследствие того, что матрица будет не в состоянии смочить и пропитать пучки волокон. В результате этого сцепление волокон с матрицей уменьшится и в композиции могут образоваться пустоты.

В публикации [1] рассматриваются четыре стадии деформации при работе армированных волокнами конструктивных материалов: 1 — упругая деформация волокон и матрицы; 2 — упругая деформация волокон и пластическая деформация матрицы; 3 — пластическая деформация волокон и матрицы; 4 — разрушение композиции.

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 5 за 2014 г.

Модуль упругости композиции E_c на стадии 1 определяют исходя из «правила смеси», т. е. считают, что модуль композиции распределяется между волокнами и матрицей:

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

где E_f , E_m — модули упругости волокон и матрицы соответственно; V_f , V_m — объемная доля волокон и матрицы соответственно.

На стадии 2 кривая деформирования матрицы уже нелинейна, и модуль упругости композиции вычисляют в каждой точке кривой по формуле

$$E_c = E_f V_f + (d\sigma_m / de_m) ef \cdot V_m,$$

где $d\sigma_m / de_m$ — тангенс угла наклона деформационной кривой матрицы при деформации ef .

Выведенные с учетом этих соображений аналитические зависимости для определения прочности композиции σ_c и модуля упругости E_c композиции относят к тем случаям, когда композиция включает достаточно пластичную матрицу, способную воспринимать совместно с армирующими ее волокнами большие напряжения без образования трещин. Обычно при армировании подобной матрицы хрупкими волокнами стадии 3 в работе композиционного материала не бывает. При пластичных волокнах на стадии 3 E_c выражают так же, как модуль композиции на стадии 2. Такие принципы работы с учетом соответствующих корректив могут быть распространены и на композиции с матрицей



В. Н. Соков
E-mail: sersok_07@mail.ru

на основе бетонных материалов. Следует полагать, что при дисперсном армировании бетонной сравнительно хрупкой матрицы высокопрочными и высокомодульными волокнами, имеющими более высокие, чем бетон, значения предельных деформаций при растяжении, стадии 3 при действии кратковременных нагрузжений не будет.

Представляет интерес последовательность разрушения композиции и взаимосвязь между прочностью волокон и прочностью композиционного материала. Простейшая модель разрушения композиции, основанная на предположении, что во всей композиции существует одинаковая деформация и по достижении разрушающей нагрузки разрываются только волокна, не лишена недостатков и позволяет использовать «правило смеси». Наиболее перспективные для создания композиционных материалов высокопрочные и высокомодульные волокна обычно обладают свойствами хрупкого разрушения с присущим для таких материалов статистическим распределением дефектов. При растяжении композиционного материала разрыв волокна произойдет в точке одного из серьезных дефектов, после чего в прилежащем к месту разрушения объеме материала напряжения существенным образом перераспределяются.

Возможны различные варианты поведения композиции. Большие касательные напряжения на поверхности раздела могут привести к нарушению сцепления по этой поверхности, распространяющемуся по длине волокна и снижающему эффективность его работы на участке значительной протяженности. Если этого не произошло, то увеличение нагрузки может вызывать последующее накопление разрывов волокон. Полагают, что композиция в этом случае разрушается в тот момент, когда нарастающее разрушение волокон при росте нагрузки настолько уменьшит их длину, что дальнейшее повышение нагрузки не может быть передано волокнам прежде всего из-за того, что при этом будет достигнут предел прочности матрицы на сдвиг. По последней гипотезе разрывы волокон в конечном счете приводят к сдвиговому разрушению матрицы и, соответственно, к разрушению композиционного материала в целом.

Возможность использования теоретических представлений, основывающихся на принципах «правила смеси», для композиций с хаотичным армированием короткими волокнами ограничена, поскольку указанные представления основываются на предположениях о непрерывном и ориентированном армировании матрицы композиционного материала. Вместе с тем описанные механизмы разрушения подобных материалов могут иметь место и при хаотичном армировании.

Многочисленными работами установлено, что поведение композиций, армированных во-

локнами ограниченной длины, не описывается вышеприведенными соотношениями, если длина волокон L не превосходит критической длины $L_{\text{крит}}$, поскольку напряжения σ_f на концах волокон ограниченной длины меньше максимального напряжения $\sigma_{f\text{max}}$ в непрерывном волокне. Для обеспечения эффективности работы таких волокон необходимо закрепить их в матрице. Процесс зависит от прочности сцепления между волокном и матрицей и лимитируется величиной касательных (скалывающих) напряжений τ на поверхности раздела в композиционном материале. Другими словами, отношение длины волокон к их диаметру в основном определяет, произойдет ли разрушение вследствие нарушения сцепления между волокном и матрицей (раствором, бетоном) или из-за разрыва волокон.

Волокно с более высоким по сравнению с матрицей модулем упругости ограничивает свободное удлинение матрицы в соседней с волокном области. При упругой деформации матрицы касательные напряжения у концов волокон на поверхности раздела будут иметь пики, быстро снижающиеся с приближением к середине волокон. Наоборот, растягивающие напряжения в волокне в этой стадии сравнительно быстро достигают максимальных значений. Их величина постоянна во всей средней части волокна. При упругопластической деформации матрицы необходима большая длина волокна для восприятия тех же усилий. В этом случае среднее напряжение в волокне ограниченной длины σ_f будет выражаться соотношением

$$\sigma_f = \sigma_f (1 - L_{\text{крит}} / 2L).$$

Для того чтобы в волокне были достигнуты предельные значения предела прочности при растяжении необходимо при прочих равных условиях обеспечить соблюдение условия

$$L_{\text{крит}} / d_f = \sigma_{f\text{max}} / 2\tau_{\text{м.у}},$$

где $\sigma_{f\text{max}}$ — предельная прочность при растяжении или предел текучести волокна; $\tau_{\text{м.у}}$ — средняя величина прочности сцепления между волокном и растворной частью материала

Отсюда следует, что целостность композиционного материала нарушится по виду разрушения 2, т. е. вследствие разрыва волокон, в том случае, если отношение длины волокна к его диаметру превышает значение $\sigma_{f\text{max}} / 2\tau_{\text{м.у}}$. Напряжение $\tau_{\text{м.у}}$ можно уподобить также прочности поверхности раздела при сдвиге.

Как уже отмечалось, важным фактором для оценки конечных свойств композиционных материалов является степень их объемного армирования. При малом содержании волокон подобные материалы могут разрушиться при весьма малых напряжениях. Здесь необходимо принимать во внимание, что бетонные материалы име-

ют меньшую величину предельных деформаций при растяжении: около 0,02 % по сравнению с 2 % для стекла, 3–4 % для стали и 10 % для полипропилена. В бетонной матрице образуются трещины и волокна, охватывающие (перекрывающие) трещину, должны воспринимать при этом всю нагрузку. Армирование считают эффективным в том случае, если волокна способны самостоятельно нести нагрузку, которую воспринимал бетон до появления трещин. Необходимое для этого количество волокон называют оптимальным или критическим [1, 2]. При содержании волокнистой арматуры в материале ниже оптимального уровня повышения предела прочности при растяжении материала ожидать не следует.

Полагают [3], что критическая доля волокон в бетонном материале может быть определена из соотношения

$$P_m = [P_f - (m - 1) P_m],$$

где P_m — напряжения в бетоне (матрице); P_f — эффективная предельная прочность волокон; m — отношение модулей упругости E_f / E_m .

Как видно, критическая доля волокон возрастает с увеличением m , и при одинаковых значениях эффективной предельной прочности она выше для более упругих волокон.

Повышение прочности материала при увеличении объемного содержания волокон может быть условно выражено графически (рис. 1). Критическое содержание армирующих волокон определяется на графике пересечением линий, характеризующих изменения прочности бетона и волокон при изменении их взаимного объема в композиции. Исходя из «правила смеси» прочность материала в данном случае может быть выражена таким образом:

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

где σ_m , σ_f — напряжение в матрице и волокнах соответственно; V_f — объемное содержание волокон; η — коэффициент, учитывающий ориентацию волокон.

В работах [4, 5] отмечается, что повышение объемного содержания волокон до оптимального уровня, приводящее к увеличению прочности материала при растяжении, относится в основном к статической прочности. Наряду с этим указывается, что даже при относительно низком объемном содержании волокнистой арматуры в бетоне могут быть существенно улучшены такие его механические показатели, как ударная вязкость и сопротивление распространению трещин.

Когда волокна ориентированы в бетонной матрице произвольно, следует учитывать, что определенная их часть не принимает участия в сопротивлении трещинообразованию. Критиче-

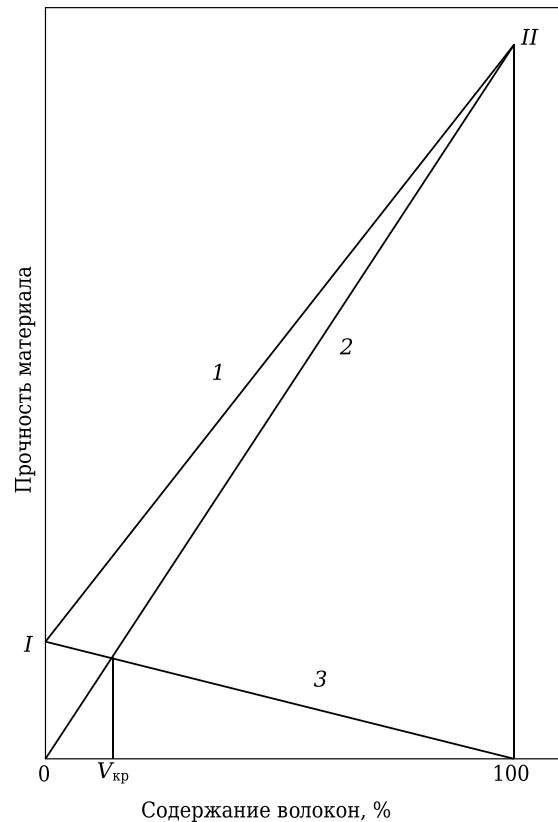


Рис. 1. Характер изменения прочности композиционного материала от содержания армирующих волокон [5]: 1–3 — нагрузка, воспринимаемая композицией, волокном и раствором соответственно; I — прочность раствора, бетона; II — прочность волокна; $V_{кр}$ — критический объем волокон

ское содержание волокон в этом случае должно быть принято в 2,47 раза большим по сравнению с соответствующим содержанием волокон, ориентированных в одном направлении.

В работе [6] выведена формула для определения прочности композиции σ_c (дискретное армирование) в зависимости от объемного содержания волокон V_f и отношения L/d , L и d — длина и диаметр волокон соответственно:

$$\sigma_c = A \sigma_m (1 - V_f) + B V_f L/d,$$

где A , B — константы, определяемые экспериментально с учетом характера изменения прочности материала в зависимости от изменения армирования в процентах и отношения L/d ; d — диаметр волокон; σ_m — критические напряжения для матрицы.

Максимальное значение константы A равно единице. Константа B обусловлена величиной сцепления волокон с матрицей и характером размещения волокон в материале. Чем выше уровень сцепления между волокнами и бетоном

и чем строже направленность (ориентация) волокон в матрице, тем выше значение константы B . Константа B выражается в тех же единицах, что и напряжение.

И. В. Ромуальди и И. А. Мандель [6] полагают, что прочность при растяжении армированных проволокой бетонных материалов зависит от среднего расстояния между геометрическими центрами проволок. Установлено, что при уменьшении расстояния между волокнами прочность композиции существенно возрастает (рис. 2), хотя объемное содержание волокон в ней может оставаться неизменным (при использовании более тонких волокон). Исходя из проекции произвольно ориентированного элементарного волокна в системе пространственных координат, было выявлено, что в работе материала в любом заданном направлении может принять эффективное участие только 41 % таких волокон. При этом среднее расстояние между их геометрическими центрами может быть выражено в виде

$$S = 13,8 d \sqrt{1/v},$$

где S — ширина трещины; d — диаметр волокнистой арматуры; v — объемное содержание волокон, %.

Увеличение прочности бетона при растяжении становится ощутимым при расстоянии между волокнами менее 1,25 см.

В настоящее время еще не разработано единой теории армирования волокнами, и представления, объясняющие поведение композиций при нагружении, довольно противоречивы. В то же время очевидно, что волокна при определенных условиях их размещения в бетонных матрицах в ряде случаев позволяют существенно улучшить их механические показатели.

Повышение прочности при растяжении бетонов при введении в них волокон И. В. Ромуальди и его сотрудники объясняют прежде всего тем,

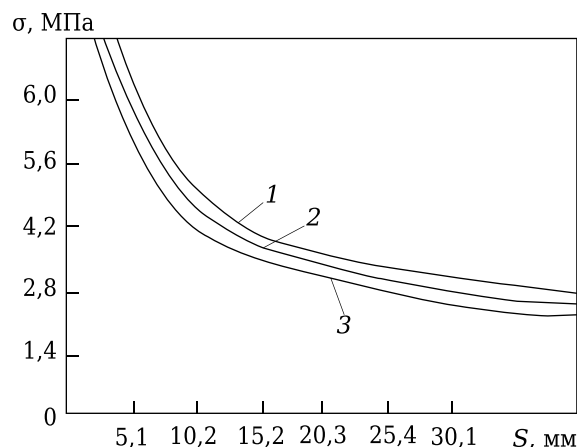


Рис. 2. Теоретические значения напряжений в армированном бетоне в момент образования первой трещины: 1–3 — содержание волокон 9,5, 7,5 и 2,5 % соответственно [6]

что волокна сдерживают образование трещин. На основании теоретических и экспериментальных исследований [6] ими было установлено, что при равномерном распределении армирующего материала в матрице эффективность работы композиции обратно пропорциональна корню квадратному из среднего расстояния между геометрическими центрами волокон. Это условие характеризует уровень напряжений, определяющих возможность распространения трещин в бетоне за пределы зоны, ограниченной соседними волокнами. Очевидно, что наибольший интерес при этом представляют волокна с очень большим отношением площади их поверхности к объему. Необходимо, чтобы композиция вела себя как структурно-единый материал. Для этого следует обеспечить при ее изготовлении сплошное и одинаково прочное сцепление на границе раздела между волокнами и матрицей.

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана и Р. Крона. — М. : Мир, 1970. — 672 с.
2. Уолтен, Дж. Волокнистые композиционные материалы / Дж. Уолтен, У. Корбетт ; пер. с. англ. ; под ред. С. З. Бокштейна. — М. : Мир, 1967. — 284 с.
3. Coble, R. I. Fibrous Concrete in the USA and UK / R. I. Coble, W. D. Kingeri // Precast concrete. — 1972. — № 10. — P. 613–616.
4. Gurrich, P. H. Properties of steel fibre reinforced mortar and concrete / P. H. Gurrich, M. A. I. Adams // Concrete. — 1973. — Vol. 7, № 4. — P. 51–53.

5. Shan, S. P. Concretoreforzado con fibras / S. P. Shan, B. Rongon // ACI Jornal. — 1971. — Vol. 68, № 2. — P. 126–175.

6. Romyaldy, J. B. The use of fiber reinforced concrete in road constructions / J. B. Romyaldy, J. B. Mandel // ACI Jornal. — 1964. — Vol. 61, № 6. — P. 657–670. ■

Получено 12.03.14

© В. Н. Соков, В. В. Соков, 2014 г.