

УДК 624.074.421

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ

А.Е. Донцова, О.Н. Столяров

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данном исследовании рассматриваются два базовых подхода к расчету изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона. Расчет ведется исходя из того, что действующий изгибающий момент в сечении балки не должен превышать предельно допустимого изгибающего момента. Первый подход основан на расчете по прочности армирующих волокон на растяжение. Второй подход основан на расчете по аналогии с железобетонными изгибаемыми элементами. Расчеты проведены на примере образцов балок из текстильно-армированного бетона, армированных щелочестойкими стеклянными и углеродными ровингами. Образцы балок были испытаны на изгиб для сопоставления экспериментальных данных с аналитическими. Было выявлено, что расчетные моменты закономерно соответствуют экспериментальным данным, однако необходимо введение понижающих коэффициентов: 0,20 для первого подхода, и 0,25 для второго подхода. Существует множество факторов, которые могут учитывать в себе данные понижающие коэффициенты. Самыми очевидными являются неидеальность сцепления армирующих ровингов с бетоном, внутренние напряжения и проскальзывания между филаментами внутри ровинга, иной характер трещинообразования по сравнению с классическим железобетоном. Учет сложностей работы конструкций из текстильно-армированного бетона может быть произведен посредством введения более сложных расчетных моделей, что и планируется выполнить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон, композитная арматура, текстильное армирование, изгиб, прочность на изгиб, расчет конструкций.

Ссылка для цитирования: Донцова А.Е., Столяров О.Н. Расчет изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона по прочности // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 3-11. EDN: HYOHRO

TEXTILE-REINFORCED CONCRETE BEAMS DESIGN APPROACHES

A.E. Dontsova, O.N. Stolyarov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Two basic design approaches for beams made of textile-reinforced concrete are considered in this study. The global approach is that the bending moment in the beam section should not exceed the ultimate bending moment. The first approach is based on the calculation of the tensile strength of reinforcing fibers. The second approach is based on the steel-reinforced concrete design. The beam samples of concrete reinforced with alkali-resistant glass and carbon rovings were manufactured. The beam samples have been tested for three-point bending. The experimental data has been compared to the results of analytical design. The calculated ultimate moments correspond to the experimental data, but it was necessary to introduce the reduction factors: 0.20 for the first approach and 0.25 for the second approach. The reduction factors may consider a wide list of factors. The most obvious are the imperfection of the bond between the reinforcement and the concrete matrix, internal stresses and slippage between the filaments of the rovings, and a different nature of crack formation compared to traditional steel-reinforced concrete. These complexities of textile-reinforced concrete structures can be taken into account by introducing more complex calculation models.

Keywords: textile-reinforced concrete, textile reinforcement, non-metallic reinforcement, flexural strength, design approach, structural design.

For citation: Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Textile-reinforced concrete beams design approaches // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 3-11. EDN: HYOHRO

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что текстильно-армированный бетон (ТАБ) появился еще в 1990-х годах, и его конструктивные свойства активно исследуются в последние два десятилетия, применение текстильных материалов для армирования бетонных матриц все еще считается новаторским подходом. До сих пор отсутствуют нормативно-технические документы, регламентирующие проектирование и расчет конструкций из текстильно-армированного бетона, а научные исследования, в основном, фокусируются на базовых механических свойствах материала: прочности на изгиб и на разрыв. В целом, возможно применение нормативов, разработанных для железобетона. Целевые параметры результирующей конструкции сохраняются неизменными для любых бетонных конструкций: прочность, надежность, функциональность, экономичность. При этом, в расчете должен быть произведен учет особенностей сцепления текстильных сеток с бетонной матрицей. Следует также ввести коррективы ввиду различий в характеристиках текучести неметаллического армирования по сравнению со стальным.

Бетон является хрупким материалом, и его прочность на растяжение как правило на порядок ниже, чем прочность на сжатие. Чтобы компенсировать его низкую способность к растяжению, в бетонные элементы добавляют армирующие стержни, которые воспринимают растягивающие нагрузки, и предотвращают разрушение конструкции. Основное правило проектирования строительных конструкций заключается в том, что приложенная нагрузка не должна превышать максимальную неразрушающую нагрузку. Большинство строительных норм и правил так или иначе основаны на этом принципе. Так, в СП 63.13330.2018 этот принцип сформулирован следующим образом: усилие от внешних нагрузок и воздействий в сечении при расчете по прочности не должно превышать предельного усилия, которое может быть воспринято элементом в этом сечении ($F \leq F_{ult}$). Аналогичен ему и принцип для расчета изгибаемых элементов: изгибающий момент от внешней нагрузки не должен превышать предельного изгибающего момента, который способно воспринять сечение элемента ($M \leq M_{ult}$). Аналогичным образом регламентируется расчет конструкций и в американском стандарте ACI 318-14, и в прочих широко применяемых по всему миру стандартах по проектированию бетонных и железобетонных конструкций. Предельный изгибающий момент для рассматриваемого сечения может быть определен через геометрические параметры балки и прочностные свойства используемого бетона и армирования. Расчет и проектирования значительно облегчаются при использовании рассмотренного принципа совместно с рядом упрощений: гипотезой плоских сечений, идеальным сцеплением между бетоном и армированием, невосприятием бетоном растягивающих нагрузок в растягивающей зоне, прямой взаимосвязью между напряжениями и деформациями.

Рассмотренный принцип является универсальным, и может быть применен для проектирования изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона, однако следует модифицировать упрощения в соответствии с механическими свойствами текстильно-армированного бетона. Наиболее важным является учет наличия проскальзывания текстильных армирующих ровингов в бетонной матрице под растягивающей нагрузкой. В контексте композитных материалов ровингами называют жгуты или пучки из параллельно направленных не переплетённых волокон. Композитные ровинги в текстильно-армированном бетоне являются аналогами стальных стержней в армоцементе. При достижении нагрузки, достаточной для появления трещин, идеальная связь между армированием и бетонной матрицей нарушается, и в областях трещин возникает перепад напряжения в бетоне и армирующих ровингах. При этом бетон воспринимает часть растягивающей нагрузки, хотя в рамках упрощений считается, что всё растяжение претерпевает арматура.

Исследования, описывающие испытания образцов балок из текстильно-армированного бетона на изгиб, представлены в [1–9]. В [1] исследуется влияние расположения армирующей сетки и её густоты на конечную прочность ТАБ на изгиб. Влияние плетения полотна на прочность композита было изучено в [8, 10]. В [11] представлены результаты статического и циклического испытаний текстильно-армированных бетонных балок на изгиб, при армировании ШС-стеклянными и углеродной сетками. Общий вид диаграммы растяжения образца текстильно-армированного бетона представлен на рис. 1. Можно разделить элементы диаграммы на условные области, включающие в себя: плато трещинообразования, область развития трещин, точку пиковой нагрузки, и точку разрушения образца [12].

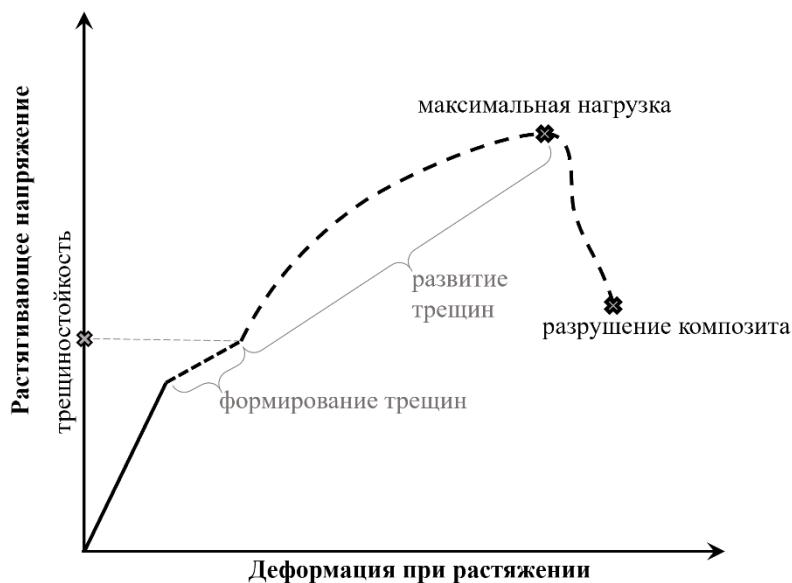


Рис. 1. Диаграмма растяжения образцов текстильно-армированного бетона
Fig. 1. Stress-strain curve for TRC under tension

Различают несколько сценариев разрушения элементов ТАБ: разрушение при расслоении [9], сдвиговое разрушение [9], телескопическое разрушение [13], хрупкое разрушение. Сопутствующими факторами, влияющими на прочность текстильно-армированного бетона на изгиб, являются прочностные свойства самих армирующих сеток и сцепление армирующих нитей с бетонной матрицей [3, 14–16]. Определяющими характеристиками при подборе армирующего текстиля являются поведение ровингов при растяжении, их стойкость к щелочной среде, и поведение ТАБ-элементов, армированных этими ровингами, при растяжении [16, 17]. Влияние наличия пропиток на сцепление армирующих ровингов с бетоном рассмотрено в [2, 4, 18, 19]. В [20, 21] рассмотрено влияние повышенных температур на сцепление текстиля с бетоном.

С накоплением базы экспериментальных данных по поведению текстильно-армированного бетона под нагрузкой и характере разрушения элементов из ТАБ, стало возможным создание аналитических моделей, описывающих поведение материала. Конечно-элементное моделирование поведения элементов из текстильно-армированного бетона под нагрузкой выполнено в работах [3, 14, 22–25]. Модель, учитывающая сцепление армирующих ровингов с бетонной матрицей разрабатывается в [23]. Метод конечных разностей использовался в [26] для прогнозирования трещинообразования при разрушении на растяжение. В работах [27–30] разрабатываются возможные расчетные схемы для проектирования строительных конструкций из текстильно-армированного бетона.

Целью данной работы является рассмотрение базовых подходов к расчету конструкций из армированного бетона. Для достижения поставленной цели в рамках исследования были изготовлены и испытаны на трехточечный изгиб образцы балок из текстильно-армированного бетона. Образцы были армированы щелочестойкими (ЩС) стеклянными и углеродными ровингами. Для моделей изготовленных образцов проводится расчет предельных изгибающих моментов в сечении по двум расчетным методикам. Первый подход фокусируется на предельной прочности армирующих ровингов на разрыв. Второй подход является аналогом расчета железобетонной балки на изгиб. Полученные численные и экспериментальные данные сравниваются для выявления соответствий и закономерностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления образцов элементов из ТАБ были использованы основовязанные текстильные сетки из щелочестойких (ЩС) стеклянных и углеродных ровингов. Механические свойства армирующих ровингов, использованных для армирования образцов, представлены в табл. 1. Механические свойства были определены экспериментально в [31, 32].

Таблица 1. Механические свойства армирующих ровингов
Table 1. Mechanical properties of reinforcing rovings

Характеристика	Тип ровингов	
	ЩС стеклянные	Углеродные
Прочность на растяжение (МПа)	1042	2090
Линейная плотность (текс)	2400	1600
Поверхностная плотность (г/м ²)	620	510
Число ровингов в сечении (на 1 метр ширины, шт.)	80	70
Удельная плотность (кг/м ³)	2680	1820
Площадь сечения ровинга (мм ²)	0,896	0,879
Удельная площадь волокон (мм ² /м)	71,642	61,538
Модуль упругости (ГПа)	66,5	173

Для бетонирования образцов использовалась мелкозернистая бетонная смесь. Состав бетонной смеси представлен в табл.2.

Таблица 2. Состав мелкозернистого бетона для изготовления образцов
Table 2. Fine-grain concrete mix proportion

Составляющее	Цемент М400	Песок	Пластификатор	Вода
Масса, г	665	1213г	7	245

В качестве экспериментальных образцов были изготовлены балки с габаритами 15x50x200 мм и 40x40x160 мм. Образцы были забетонированы и хранились во влажной среде не протяжении 28 дней для набора прочности бетоном. Контрольные образцы изготовленного бетона, испытанные на сжатие, показали прочность на сжатие $R_b = 24$ МПа.

Образцы балок были испытаны на изгиб на электромеханической испытательной машине Instron 5965. Испытания проводились в следующих условиях: расстояние между опорами составляло 150 мм или 130 мм для образцов длиной 200 мм или 160 мм, соответственно. Нагружение производилось с постоянной скоростью в 1 мм/мин. Схема нагружения приведена на рис. 2.

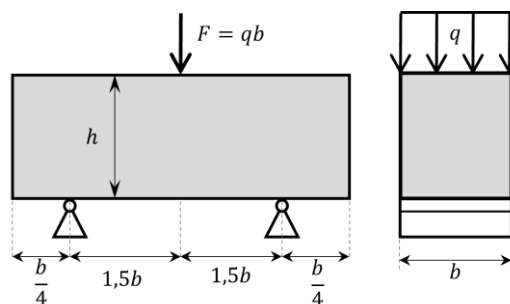


Рис. 2. Схема нагружения балок при трехточечном изгибе
Fig. 2. Schematic view of a sample beam under three-point bending

Предел прочности на изгиб был рассчитан по формуле (1).

$$\sigma = M_{max} / W_z; \tag{1}$$

где максимальный изгибающий момент M_{max} вычислялся по формуле (2).

$$M_{max} = \frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{l}{2}. \tag{2}$$

где F_{max} – максимальная сила;

l – пролет между опорами.

В расчетах W_z – это момент инерции балки, вычисляемый по формуле (3).

$$W_z = \frac{bh^2}{6}, \tag{3}$$

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА

Можно выделить два основных подхода к проектированию бетонных конструкций, которые можно распространить и на текстильно-армированный бетон: использование прочности армирования на растяжение в качестве основного критерия надежности и расчет сечения из уравнений равновесия внутренних и внешних сил, действующих в сечении в его предельном состоянии.

ПОДХОД 1: ПРОЧНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ КАК ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ
 При проектировании по прочности армирования на растяжение используется формула (4).

$$M_u = R_s \cdot A_s \cdot h_0, \quad (4)$$

где M_u – максимально допустимый изгибающий момент, Н·м;

R_s – прочность текстильного волокна на разрыв, Н/мм²;

A_s – площадь армирующих волокон в сечении, мм²;

h_0 – полезная высота сечения, м. Зависит от расположения армирующих стержней в растянутой зоне.

Схема поперечного сечения образца и геометрические параметры сечения изображены на рисунке 3.

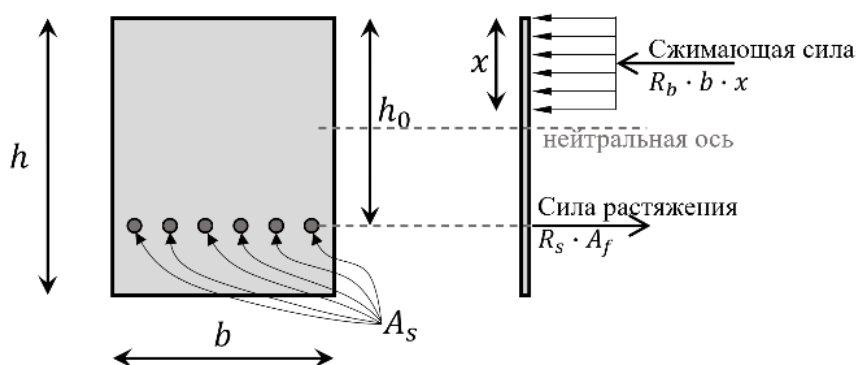


Рис. 3. Геометрические параметры сечения и схема внутренних усилий
Fig. 3. Beam section parameters and internal forces distribution under flexural load

При проектировании из уравнений равновесия сил, действующих в сечении, используется формула (5).

$$M_u = R_s \cdot A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right), \quad (5)$$

где x – высота сжатой зоны, м, которая может быть рассчитана по формуле (6):

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}, \quad (6)$$

Так как в рассматриваемых элементах отсутствует армирование в сжатой зоне, то слагаемое $R_{sc} \cdot A'_s$ в формуле (6), учитывающее наличие арматуры в сжатой зоне, равняется нулю. Из-за этого, формулы (4) и (5) отличаются незначительно, поэтому данный подход к проектированию может быть обобщен единой формулой (5), учитывающей высоту сжатой зоны, и дающей меньший результат.

ПОДХОД 2: ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА СЖАТИЕ КАК ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ

При проектировании железобетонных балок используется формула (7).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'). \quad (7)$$

Поскольку рассматриваемые элементы из текстильно-армированного бетона армированы одним слоем текстильной сетки, второе слагаемое, учитывающее сопротивление стального армирования по верхней грани балки, равно нулю. Формула приобретает вид (8).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right). \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные данные для расчета выбираются на основании изготовленных экспериментальных образцов. Результаты экспериментальных данных по испытаниям образцов на изгиб сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты испытаний балок на изгиб
Table 3. Three-point bending test results

№	Тип армирования	Размеры, мм	F_{max} , Н	δ , МПа
1	Стеклянные	15,6x200,0x50,0	198,54	3,67
2	Стеклянные	19,4x200,0x50,0	224,15	2,67
3	Стеклянные	36,6x160,0x41,7	978,58	3,42
4	Углеродные	12,4x200,0x50,0	155,09	4,54
5	Углеродные	13,8x200,0x50,0	180,22	4,26
6	Углеродные	32,2x160,0x41,4	985,50	4,27

Результаты расчета рассматриваемых балок аналитическими способами сведены в таблицу 4. При этом полезная высота сечения h_0 рассчитывалась как $0,6h$, в соответствии с расположением армирующих ровингов в сечении при бетонировании.

Таблица 4. Экспериментальные и расчетные данные по прочности балок
Table 4. Experimental and calculated ultimate bending moments

№	Тип армирования	Параметры сечения				Эксперимент		Подход 1		Подход 2	
		b , м	h , м	l , м	x , м	F_{max} , Н	M_{max} , Н·м	M_u , Н·м	$\frac{M_{max}}{M_u}$	M_{ult} , Н·м	$\frac{M_{max}}{M_{ult}}$
1	Стеклянные	0,05	0,0156	0,2	0,00536	199	9,93	60,2	0,165	43,0	0,231
2	Стеклянные	0,05	0,0194	0,2	0,00536	224	11,21	74,9	0,150	57,6	0,194
3	Стеклянные	0,0417	0,0366	0,1	0,00536	979	24,46	117,8	0,208	103,4	0,237
4	Углеродные	0,05	0,0124	0,2	0,00536	155	7,75	47,8	0,162	30,6	0,253
5	Углеродные	0,05	0,0138	0,2	0,00536	180	9,01	53,2	0,169	36,0	0,250
6	Углеродные	0,0414	0,0322	0,1	0,00536	986	24,64	102,9	0,239	88,6	0,278

При первичном расчете расчетные значения максимально допустимых моментов оказываются значительно выше фактически полученных экспериментальных значений. В среднем, теоретически полученные моменты превосходили экспериментально полученные в 4 раза. При этом, можно отметить, что полученные моменты закономерно соответствовали экспериментальным данным. При введении в теоретические расчеты понижающего коэффициента, равного 0,2 для M_u и 0,25 для M_{ult} , можно достичь близких значений теоретических и экспериментальных данных. Сводные данные с учетом коэффициента 0,25 представлены в табл.5.

Таблица 5. Сводные данные испытаний и расчетов балок из ТАБ
Table 5. Ultimate bending moments considering reduction factors for calculated data

№	Тип армирования	M , Н·м	$0,2 * M_n$, Н·м	$0,25 * M_{ult}$, Н·м
1	стеклянные	9,9	12,0	10,7
2	стеклянные	11,2	15,0	14,4
3	стеклянные	24,5	23,6	25,9
4	углеродные	7,8	9,6	7,7
5	углеродные	9,0	10,6	9,0
6	углеродные	24,6	20,6	22,2

Графическое представление полученных экспериментальных и расчетных данных представлено на рис.4.

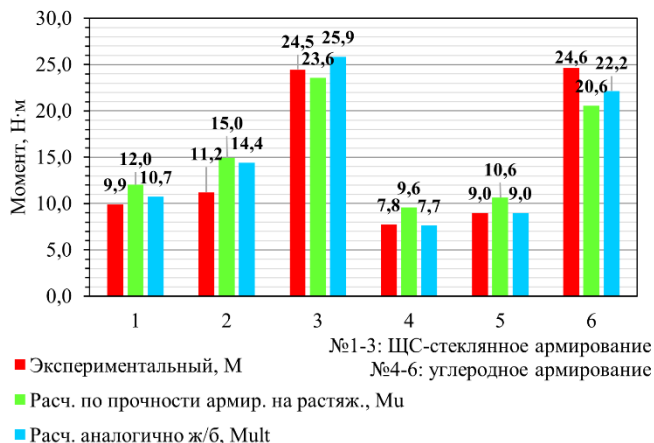


Рис. 4. Предельные изгибающие моменты для балок из текстильно-армированного бетона
Fig. 4. Ultimate banding moments for TRC beams considering reduction factors for calculated data

ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения расчетных напряжений при разрушении образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб составили $\sigma_{срур} = 4,19$ МПа для армированных углеродными ровингами образцов и $\sigma_{сршс} = 3,25$ МПа для армированных ШС-стеклянными ровингами образцов. Такое соотношение результатов эксперимента совпадает с ожиданиями, поскольку прочность углеродных ровингов выше прочности ШС-стеклянных. Полученные в рамках экспериментов данные и общее поведение элементов из ТАБ при изгибе согласовываются с результатами аналогичных испытаний, представленных в исследовании [33].

Сравнение результатов экспериментальных и расчетных данных проводилось по изгибающим моментам в сечениях балки. При расчете элементов по прочности текстильного армирования на растяжение результаты расчетов близятся к экспериментальным данным при использовании понижающего коэффициента, равного 0,25. При расчете элементов из текстильно-армированного бетона как изгибаемых балок из железобетона результаты расчетов близятся к экспериментальным данным при использовании понижающего коэффициента, равного 0,20. Как уже было упомянуто в рамках обзора литературных источников, существует ряд значительных отличий текстильного армирования от стального. Различия в сцеплении армирующих стержней с бетонной матрицей, анизотропность и немонолитность армирующего материала, сплетённого из большого числа филаментов, внутреннее проскальзывание филаментов друг относительно друга – все эти факторы могут быть заложены в выявленном понижающем коэффициенте. Также необходимо отметить геометрические отличия сечения элемента из текстильно-армированного бетона, которое является скорее плоским, и сечения балок из традиционного железобетона, которое является более вытянутым в высоту. Более сложные подходы к расчету элементов из текстильно-армированного бетона были предложены в работах [22–24, 34]. Подходы, учитывающие проскальзывание армирующих ровингов, возникновение трещин в сечении, усложненную диаграмму растяжения ТАБ по сравнению с железобетоном, упрочнение при растяжении и другие факторы, являются более трудоемкими по сравнению с базовыми расчетными подходами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс проектирования строительных конструкций из текстильного армированного бетона требует учета уникальных свойств текстильного армирования. Принципы проектирования балок из ТАБ обычно совпадают с принципами проектирования балок из железобетона, однако присутствуют и отличия, связанные со сцеплением арматуры с бетонной матрицей и диаграммами растяжения армирующих материалов. Базовые предложения для расчета элементов из ТАБ основаны на тех же упрощениях, на которых функционируют классические расчеты железобетонных элементов. В данной работе были рассмотрены простейшие подходы, доступные для расчета изгибаемых балок из текстильно-армированного бетона. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными. В результате можно сделать следующие выводы по работе:

1. Средние значения расчетных напряжений при разрушении образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб составили $\sigma_{срур} = 4,19$ МПа для армированных углеродными ровингами образцов и $\sigma_{сршс} = 3,25$ МПа для армированных ШС-стеклянными ровингами образцов.

2. Результаты расчета предельно допустимых моментов по прочности армирующих волокон на растяжение оказались сопоставимыми с результатами, полученными по подходу, учитывающему прочность бетона на сжатие.

3. Расчетные моменты закономерно соотносились с полученными экспериментальными изгибающими моментами с постоянным превышением экспериментальных моментов в 5 раз для расчета по прочности армирующих волокон на растяжение и в 4 раза для расчета по аналогии с железобетонными элементами. Поэтому для расчетных данных были введены понижающие коэффициенты 0,20 и 0,25 соответственно.

4. В дальнейших исследованиях планируется исследовать природу полученных понижающих коэффициентов и факторы, на них влияющие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Colombo I.G. et al. Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters // *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46, No. 11. Pp. 1953–1971. doi.org/10.1617/s11527-013-0023-7.
2. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53, No. 1. Pp. 17. doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4.
3. Williams Portal N., Nyholm Thrane L., Lundgren K. Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation // *Materials and Structures*. 2017. Vol. 50, No. 1. Pp. 4. doi.org/10.1617/s11527-016-0882-9.
4. Yin S., Xu S., Li H. Improved mechanical properties of textile reinforced concrete thin plate // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013. Vol. 28, No. 1. Pp. 92–98. doi.org/10.1007/s11595-013-0647-z.
5. Häußler-Combe U., Hartig J. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading // *Cement and Concrete Composites*. 2007. Vol. 29, No. 4. Pp. 279–289. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.012.
6. Volkova A. et al. Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete // *MATEC Web of Conferences* / под ред. Murgul V. 2016. Vol. 53. Pp. 01016. doi.org/10.1051/mateconf/20165301016.
7. Halvaei M. et al. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. Pp. 120877. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877.
8. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure // *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2022. Vol. 334. Pp. 127434. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127434.
9. Du Y. et al. Flexural Behaviour of Carbon Textile-Reinforced Concrete with Prestress and Steel Fibres // *Polymers*. 2018. Vol. 10, No. 1. Pp. 98. doi.org/10.3390/polym10010098.
10. Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete in uniaxial tension // *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. Springer Science and Business Media B.V., 2021. Vol. 54, No. 6. Pp. 1–27. doi.org/10.1617/S11527-021-01797-5/FIGURES/15.
11. Hegger J., Voss S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30, No. 7. Pp. 2050–2056. doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006.
12. Peled A., Mobasher B., Bentur A. *Textile Reinforced Concrete*. CRC Press, 2017. doi.org/10.1201/9781315119151.
13. Alexandre V.J.F., Boshoff W.P., Combrinck R. Damage evaluation and mechanisms of textile reinforced concrete during telescopic failure // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 403. Pp. 133055. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133055.
14. Hegger J. et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39, No. 8. Pp. 765–776. doi.org/10.1617/s11527-005-9039-y.
15. Preinstorfer P. et al. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish // *Composite Structures*. Elsevier, 2023. Vol. 312. Pp. 116859. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116859.
16. Banholzer B., Brockmann T., Brameshuber W. Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39, No. 8. Pp. 749–763. doi.org/10.1617/s11527-006-9140-x.
17. Scheurer M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete // *Materials Today: Proceedings*. Elsevier, 2023. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477.
18. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. Pp. 119517. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119517.
19. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete // *GRC*. 2015. Vol. 1247, No. C. Pp. 1–11.
20. Silva R.M. de C. et al. Bond behavior of polymer- and mineral-impregnated carbon fiber yarns towards concrete matrices at elevated temperature levels // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. Pp. 104685. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104685.
21. Silva F. de A. et al. Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced

- concrete // Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 48. C. 26–34. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.007.
22. Portal N. et al. Numerical modelling of textile reinforced concrete // Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013. 2013. C. 886–897.
23. Holler S. et al. Computational model of textile-reinforced concrete structures // Computers & Structures. 2004. Vol. 82, No. 23–26. C. 1971–1979. doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.076.
24. Valeri P., Ruiz M.F., Muttoni A. Modelling of Textile Reinforced Concrete in bending and shear with Elastic-Cracked Stress Fields // Engineering Structures. 2020. Vol. 215. C. 110664. doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110664.
25. Tran M.T., Vu X.H., Ferrier E. Mesoscale numerical modeling and characterization of the effect of reinforcement textile on the elevated temperature and tensile behaviour of carbon textile-reinforced concrete composite // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 116. Pp. 103186. doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103186.
26. Yao Y. et al. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 64. Pp. 49–61. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.009.
27. Raupach M. et al. Textile-reinforced concrete // Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Elsevier, 2016. Pp. 275–299. doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00013-6.
28. Rempel S., Ricker M., Hegger J. Safety Concept for Textile-Reinforced Concrete Structures with Bending Load // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 20. Pp. 7328. doi.org/10.3390/app10207328.
29. Lepenies I.G., Richter M., Zastrau B.W. A Multi-Scale Analysis of Textile Reinforced Concrete Structures // PAMM. 2008. Vol. 8, No. 1. Pp. 10553–10554. doi.org/10.1002/pamm.200810553.
30. Yu Q. et al. A consistent safety format and design approach for brittle systems and application to textile reinforced concrete structures // Engineering Structures. 2021. Vol. 249. Pp. 113306. doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113306.
31. Kirsanov A.I., Stolyarov O.N. Mechanical properties of synthetic fibers applied to concrete reinforcement // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2018. Vol. 80, No. 4. Pp. 15–23. doi.org/10.18720/MCE.80.2.
32. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Influence of the fabric construction parameters and roving type on the tensile property retention of high-performance rovings in warp-knitted reinforced fabrics and cement-based composites // Journal of Industrial Textiles. 2017. Vol. 47, No. 4. Pp. 453–471. doi.org/10.1177/1528083716652831.
33. Volkova A.A. et al. Structure and properties of textile reinforced concrete // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2015. Vol. 59, No. 7. Pp. 50–56. doi.org/10.5862/MCE.59.5.
34. Alrshoudi F.A.S. Textile Reinforced Concrete: Design Methodology and Novel Reinforcement. The University of Leeds, 2015. 246 p.

ОБ АВТОРАХ

Анна Евгеньевна Донцова (SPIN: 2947-9339) – ассистент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: anne.dontsoova@ya.ru

Олег Николаевич Столяров (SPIN: 7594-5118) – доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: stolyarov_on@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anna E. Dontsova – assistant at the School of hydrotechnical and power engineering, Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: anne.dontsoova@ya.ru

Oleg N. Stolyarov – associate professor at the School of hydrotechnical and power engineering, Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: stolyarov_on@spbstu.ru