

DOI: 10.34031/article\_5cb1e65c9f1f72.39954168

<sup>1,\*</sup>Панченко Л.А., <sup>2</sup>Ерижокова Е.С.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.  
Россия, 129337, Московская область, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

\*E-mail: panchenko.la@bstu.ru

## СТЕКЛОФИБРОБЕТОН В ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

**Аннотация.** Волокнистые композиты относятся к прогрессивным материалам для зданий и сооружений. Конструкции на их основе имеют высокие технические и экономические характеристики. Стеклофибробетон имеет эффективное применение для тонкостенных конструкций. Для решения проектных задач предложены вариационные принципы строительной механики применительно к волокнистым композитам. Оптимальная конфигурация оболочки определяется из условия стационарности ее потенциальной энергии при заданных величинах расчетных сопротивлений компонентов материала. Такая постановка задачи приводит к глобальному минимуму объема оболочки. В частности, рассматривается осесимметрично нагруженная сферическая оболочка, для которой оптимальная толщина определяется из условия равного сопротивления по критерию Мизеса. Рекомендованы типы элементов для сборного стеклофибробетонного купола различных пролетов. Рассмотрены также тоннели мелкого заложения, являющиеся распространенным объектом транспортных коммуникаций. Установлена рациональность применения для них тонкостенных пространственных систем, состоящих из прямоугольных пластинок. Решена изопериметрическая задача при заданном объеме материала на основе обобщенного вариационного принципа Лагранжа. В качестве варьируемого параметра принимается толщина прямоугольных пластинок пространственной системы тоннеля.

**Ключевые слова:** стеклофибробетон, тонкостенные конструкции, проектные задачи, вариационные принципы строительной механики, оболочки, тоннели мелкого заложения.

**Введение.** Производство и широкое применение в строительстве новых материалов с улучшенными механическими свойствами способствует научно-техническому прогрессу в стране. К разряду эффективных материалов относятся волокнистые композиты. Наличие преимущественных свойств, касающихся прочности, веса, стоимости способствует их широкому распространению в строительной отрасли. Применение таких материалов является одним из перспективных направлений в строительстве ввиду возрастающего объема сооружений с варьируемыми функциями, требующими обеспечения нового качества и надежности конструкций. Волокнистые композиты используются в виде внутренней арматуры (волокна, стержни в бетоне), а также как внешняя арматура (в форме полос).

Перспективной сферой применения такого рода материалов является также усиление существующих бетонных и железобетонных конструкций. Среди большого числа волокон особое распространение получили полимеры, армированные стеклянными и углеродными волокнами.

В тонких нитях количество дефектов значительно меньше, чем в массивных образцах. Например, при растяжении массивных стеклянных образцов предел прочности составляет

50–100 МПа, а для стеклянных волокон диаметром 10 мкм он возрастает до 1500–2500 МПа.

В настоящее время получены и используются волокна с уникальными свойствами – высокой прочностью, повышенным термическим сопротивлением, химической стойкостью (карбид и нитрид кремния, бор, углерод, графит, диабаз и др.). По прочности эти волокна в несколько раз превосходят сталь, а ткани из них выдерживают температуру до 2000 °С.

Как было сказано выше, в строительстве чаще всего используются композиты (конгломераты), матрицу которых составляет бетон. Внесение волокон наделяет бетон новыми свойствами и в то же время открывает путь более совершенной новой технологии изготовления строительных материалов и изделий. В бетоносмесительные агрегаты загружают щебень, песок, цемент и волокна. После затворения водой и перемешивания получают готовую к использованию армированную бетонную смесь, которую заливают в форму для предназначенного изделия. Время для его изготовления сокращается практически вдвое, а значительное повышение механических свойств материала ведет к снижению материалоемкости, веса и стоимости изделия.

Главное внимание в статье уделено стеклянным волокнам, которые по своим эксплуата-

ционными качествам получают надежную перспективу, в основном, в связи со сдерживанием процесса трещинообразования.

Эффективность стеклофибробетона в гражданском и промышленном строительстве обнаруживается прежде всего при устройстве ограждающих конструкций. Изготавливаемые из него стены, перегородки, полы, покрытия и перекрытия, а также конструкции специального назначения – трубы, лотки, каналы, шпунт, тубинги, кольца отличаются хорошими эксплуатационными свойствами. Одновременно наблюдается снижение трудоемкости работ по изготовлению конструкций на 25–30 %, расхода бетона на 20–25 %, стали – до 15 % и стоимости строительства – до 20 %.

Стеклофибробетон находит применение в жилищном строительстве при изготовлении трехслойных стеновых панелей, ограждений лоджий, козырьков входов и плит перекрытий. Особенно перспективен вариант применения стеклопластиковой арматуры в качестве гибких связей для трехслойных плит и панелей. Такая арматура устойчива к химически разрушающему действию бетонов и растворов. Кроме того, замена стальных гибких связей стеклопластиковыми аналогами в трехслойных панелях позволяет достигнуть значительного экономического эффекта. Так, их эффективность по теплопередаче при эксплуатации возрастает на 10–15 %.

Тонкостенные архитектурные формы из стеклофибробетона обладают повышенной прочностью при небольшой массе [1–5]. Из готовых стеклофибробетонных элементов собирают павильоны, навесы для автовокзалов, летние кафе. Такие элементы значительно сокращают процесс строительства.

Оптимальное сочетание составляющих конгломерата и вводимых волокон возможно при любых заполнителях, однако предпочтение получают составы с максимальной плотностью упаковки частиц, что ведет к уменьшению расхода вяжущего вещества.

В качестве вяжущего для приготовления мелкозернистого стеклофибробетона применяют портландцемент, глиноземистый цемент марок не ниже М400, а также добавки микрокремнезема и др.

Армирование стеклофибробетонных конструкций ведется щелочестойкими волокнами в виде отрезков, как правило, длиной от 10 до 60 мм. Повышенные нагрузки могут вызвать комбинированное армирование, когда волокна сочетаются со стержневой или проволочной стальной арматурой.

В реальности целесообразно корректировать состав заполняющей части по мере изменения фазового соотношения, а, следовательно, и массы вяжущей части. С увеличением фазового соотношения возрастает доля мелкозернистого заполнителя (в данном случае песка) при увеличении водоцементного отношения. Это способствует доуплотнению смеси, дополнительной адсорбции и сольватации части свободной жидкой среды, поддержанию на должном уровне вязкости вяжущего.

В качестве примера использования стеклянных и углеродных волокон укажем в первую очередь московские объекты: тоннели, система водоотвода, распределительные полосы мостов и путепроводов МКАД, Новоспасский мост, Остаповский и Старобасманный путепроводы, «Москва-Сити».

**Методика.** Наиболее существенные параметры, отражающиеся на сочетании волокна и матрицы – состояние матрицы (без трещин или с трещинами), композиция матрицы, геометрия и качество поверхности волокна, соотношение жесткостей волокна и матрицы, ориентация волокон, их объемная доля, продолжительность функционирования волокна в композите.

С позиций передачи прилагаемой нагрузки рассмотрено взаимодействие волокна с однородной матрицей без трещин и с трещинами. Получены математические выражения для напряжения сдвига волокна на поверхности контакта и напряжения вдоль волокна [1]. При образовании трещин волокна становятся мостом через трещину, передающим сквозь нее нагрузку.

Зона взаимодействия матрицы и волокна существует вплоть до 50 мкм вглубь его поверхности. Эта зона содержит двойную пленку толщиной приблизительно 1–2 мкм, которая окружает волокно, область больших кристаллов СН, имеющую глубину вплоть до 30 мкм, и область, которая имеет достаточную пористость. Вклад зоны взаимодействия в механические свойства композита определяется процессом связывания и отслаивания волокна. Слабое взаимодействие может привести к расслоению композита и вызвать рост трещин в матрице и их приближение к волокнам.

С учетом синергетических эффектов взаимодействия различных элементов армирования вязкость разрушения мелкозернистого бетона возрастает до трех раз. Вследствие этого трехкратное возрастание трещиностойкости значительно возмещает расход (до 160 %) на многоуровневое армирование, в частности, мелкозернистый бетон примерно в 1,5 раза экономичнее традиционного [6].

При  $E_m$  и  $E_f$ , представляющих модули упругости матрицы и волокон, и  $V_m$  и  $V_f$ , представляющих доли объема каждой фазы (как доли объема композита), модуль композита  $E_c$  можно выразить так:

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

На основе формулы (1) можно записать:

$$\sigma_c = \sigma_m [1 + V_f (M - 1)], \quad (2)$$

где  $\sigma_c, \sigma_m$  – напряжения композита и матрицы, соответственно;

$$M = \frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m}, \quad (3)$$

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

Исследовано влияние энергетического фактора на механизм разрушения конгломерата. Рост трещины определяет область разрушения. На механизм разрушения влияют конкретные ситуации, касающиеся поведения хрупкого материала. Имеются в виду: область микротрещинообразования,

ветвление трещины, ее отклонение вследствие наличия волокна-перемычки, поверхностное зацепление и закрытие трещины. Дополнительное упрочнение в связи с наличием волокон повышает внутреннюю энергию разрушения, что увеличивает предел прочности фибробетона.

В табл. 1 показано влияние длины волокна на вид разрушения композита и связанный с этим уровень растягивающих напряжений в волокне, с чем связана прочность бетонных и железобетонных элементов, армированных стекловолокном [1].

Таблица 1

**Влияние длины волокна на вид разрушения и напряжения растяжения волокна**

Длина	Вид разрушения	Растягивающие напряжения в волокне
$l < l_p$	Волокно выходит путем внезапного отслаивания	$\sigma < \sigma_{fu}$
$l_p < l < l_{cr}$	Волокно выходит при постепенном отслаивании	$\sigma < \sigma_{fu}$
$l_{cr} < l$	Волокно разрушается без какого-либо отслаивания	$\sigma > \sigma_{fu}$

Здесь  $l_p$  – минимальная длина связи, необходимая для предотвращения ее от катастрофического разрушения,  $\sigma_{fu}$  – предельное напряжение растяжения волокна.

Стеклофибробетон в тонкостенных конструкциях может быть использован сам по себе или в сочетании с дискретным армированием. Фундаментальный подход к их расчету требует формулировки новых вариационных принципов для систем из дисперсно и дискретно армированного материала.

В их основу положены фундаментальные принципы Лагранжа и Кастильяно. Их обобщение трактуется в функциональном пространстве, расширенном за счет полей функций конфигурации и модулей упругости материала. При этом, варьируемыми параметрами являются перемещения (напряжения), конфигурация и модули материала [7–9].

Из условий стационарности обобщенного функционала Лагранжа (Кастильяно) вытекают уравнения равновесия (совместности деформаций), уравнения связи, а также уравнения структурообразования, обуславливающие критерий оптимальности конструкции.

В изопериметрических задачах в качестве уравнения связи принимается условие постоянства объема, которое посредством множителя Лагранжа вводится в качестве дополнительного слагаемого в функционал вариационной задачи.

В частном случае конструкция может быть равнонапряженной по всему объему, и тогда, по теореме Васютинского для линейно-упругого тела, ей соответствует минимум потенциальной энергии деформации. Так как последняя пропорциональна объему тела, то в качестве критерия оптимальности здесь может выступать минимум объема.

Величина модуля  $E_c$  находится в зависимости от свойств матрицы и волокон, а также от их длины и процента включения. С этой целью проводятся эксперименты на растянутых и сжатых образцах. Модуль упругости  $E$  дискретной арматуры зависит исключительно от ее материала.

**Основная часть.** Оптимальная конфигурация оболочки определяется из условия стационарности ее потенциальной энергии при заданных величинах расчетных сопротивлений компонентов материала [10–13]. Такая постановка задачи приводит к глобальному минимуму объема оболочки.

Рассмотрим осесимметрично нагруженную сферическую оболочку, для которой оптимальная толщина определяется из условия равного сопротивления по критерию Мизеса:

$$\sigma_{red}^2 = \sigma_\varphi^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_\varphi \sigma_\theta, \quad (4)$$

где  $\sigma_\varphi$  – меридиональное напряжение, направленное по касательной к меридиану;  $\sigma_\theta$  – кольцевое напряжение, направленное по касательной к окружности;  $\sigma_{red}$  – приведенное напряжение, понимаемое как напряжение в условиях одноосного состояния, эквивалентного по своему эффекту напряжениям при рассматриваемом плоском напряженном состоянии.

Напряжения для сферического купола радиуса  $r$  вычисляются по формулам:

$$\sigma_\varphi = -(pr)/2h_\varphi, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = -(pr \cos 2\varphi)/2h_\varphi, \quad (6)$$

где  $p$  – интенсивность нагрузки на горизонтальную проекцию оболочки;  $h_\varphi$  – ее толщина;  $\varphi$  – угол, определяющий сечение оболочки, нормальное к оси вращения.

После подстановки выражений (5) и (6) в формулу (4) получаем равенство

$$\sigma_{red}^2 = [(pr)/(2h_\varphi)]^2 (2 \sin^2 \varphi + \cos^2 2\varphi). \quad (7)$$

Для стеклофибробетона, имеющего разные расчетные сопротивления сжатию и растяжению ( $R_{fb}$  и  $R_{fbt}$ ) используются два выражения толщины [1]:

$$h_\varphi^c = \frac{pr}{2R_{fb}} \sqrt{2 \sin^2 \varphi + \cos^2 2\varphi}, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi/4 \quad (8)$$

$$h_\varphi^t = \frac{pr}{2R_{fbt}} \sqrt{2 \sin^2 \varphi + \cos^2 2\varphi}, \quad \pi/4 \leq \varphi \leq \pi/2, \quad (9)$$

где  $h_\varphi^c$  ( $h_\varphi^t$ ) – толщина купола в сжатой (растянутой) области.

При этом учитывается, что при  $\varphi > \pi/4$  кольцевое усилие становится растягивающим. После вычисления оптимальных толщин необ-

$$J = \iint \left\{ \frac{1}{2} \left\{ N_x \frac{\partial u}{\partial x} + S \left( \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2H \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial s} + kw^2 \right\} - q_x u - q_s v - q_v w \right\} dx ds + \lambda (V - V_0), \quad (10)$$

где  $N_x, N_s, M_x, M_s, H$  – внутренние усилия;  $q_x, q_s, q_v$  – компоненты нагрузки;  $M_p(x, s)$  – изгибающие моменты от нагрузки в основной системе метода перемещений для элементарной плоскости, выделенной из складки весьма близкими сечениями  $x = x_0$  и  $x = x_0 + \Delta x$ ;  $u, v, w$  – ком-

ходимо произвести проверку условий прочности в меридиональном и кольцевом направлениях и на главных площадках.

Сборный стеклофибробетонный купол требует особого внимания в отношении прочности, долговечности и технологичности узлов. Рекомендованы следующие типы элементов: а) при пролетах от 12 до 42 м – ребристые плиты длиной 6 м прямоугольной, трапециевидной формы и в виде равностороннего треугольника; б) при пролетах до 12 м безреберные элементы в виде складок с ромбическим планом.

Результаты автоматизированного расчета железобетонного цилиндрического резервуара с дисперсным армированием рассмотрены в работе [14].

Распространенным объектом транспортных коммуникаций являются тоннели мелкого заложения. Существенная инженерная проблема – совершенствование формы их несущих конструкций и подбор материалов. Из утилитарных соображений утверждаются габариты тоннелей. В основу концепции конструирования объекта принимается способность наиболее эффективного противостояния эксплуатационным воздействиям и давлению грунта. Теория и практика таких сооружений подтвердили рациональность применения тонкостенных пространственных систем, состоящих из прямоугольных пластинок.

Рассмотрим изопериметрическую задачу при заданном объеме материала  $V_0$  и решим ее с использованием обобщенного принципа Лагранжа.

Выделим из складки тоннеля элемент (рис. 1) и запишем выражение обобщенного функционала Лагранжа:

поненты перемещений;  $k$  – коэффициент постели упругой среды;  $E$  – модуль Юнга;  $I = \delta^3/12$  ( $\delta$  – толщина складки),  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

В формуле (10) внутренние усилия имеют следующий вид:

$$N_x = \sigma \delta = E \frac{\partial u}{\partial s} \delta; \quad S = \tau \delta = G \left( \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \delta; \\ M_x = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad H = EI \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial s}; \quad M_s = M_p(x, s) - EI \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  – нормальные и касательные напряжения соответственно;  $G$  – модуль сдвига.

В данном случае варьируемыми функциями являются перемещения, толщины складки, мно-

житель Лагранжа. Следствием стационарности функционала (10) являются:

1) дифференциальные уравнения равновесия в объеме складки  $V$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial U_i'} - \frac{\partial F}{\partial U_i} &= 0; \\ -\frac{d^2}{dx^2} \frac{\partial F}{\partial V_k''} + \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial V_k'} - \frac{\partial F}{\partial V_k} &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $F$  – подынтегральная функция в выражении (10),  $U_i(x)$  и  $V_k(x)$  – обобщенные перемещения;

2) уравнения равновесия на части поверхности, несущей нагрузку как естественные граничные условия;

3) уравнение заданного объема, как уравнение связи;

4) уравнения структурообразования.

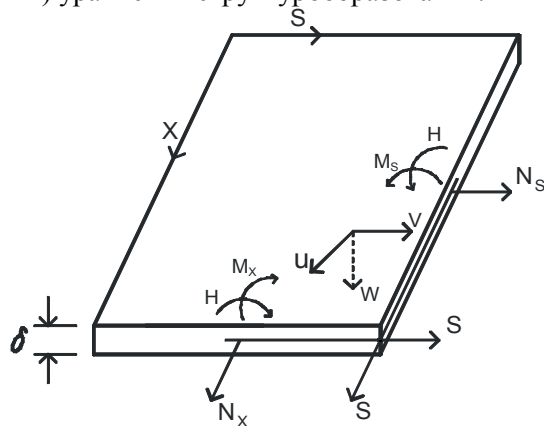


Рис. 1. Элемент, выделенный из складки тоннеля

Последний вид уравнений вытекает из условия, отвечающего варьированию функционала (10) по функции  $\delta(x, s)$ , которая в общем случае может иметь вид двойного тригонометрического ряда с неизвестными коэффициентами.

В итоге конструкция наделяется максимальными показателями в отношении жесткости, что соответствует минимуму – минимуму по функциям перемещений максимумов по функциям конфигурации.

Обычно для конструкций тоннелей мелкого заложения используют бетон, армированный стальными сетками и каркасами. Как было сказано выше, в целях сдерживания трещинообразования рационально использовать дисперсное армирование стекловолокном и в необходимых случаях углеродными волокнами. Бетон с дисперсным армированием, кроме того, наделяется повышенной ударной вязкостью, износостойкостью, морозостойкостью и атмосферостойкостью, что является существенным преимуществом для конструкций тоннелей. Таким образом, сочетание тонкостенности элементов конструкций и свойств указанного материала приводит к экономичному решению задачи.

Стальная стержневая или проволочная арматура может быть учтена путем ее приведения к фибровому армированию согласно ВСН 56-97 [15]:

$$\mu_f^{red} = \mu_f + \mu_s (R_s / R_{fbt}), \quad (13)$$

где  $\mu_f$  – коэффициент фибрового армирования по объему;  $\mu_s$  – коэффициент армирования стальной арматуры;  $R_s$  – расчетное сопротивление растяжению стальной арматуры.

Рекомендованный коэффициент фибрового армирования – от 0,01 до 0,05. Его увеличение возможно при повышенных требованиях в части трещиностойкости, что обсуждалось, в частности, в работах [4–6].

**Выводы.** Решение задач для подземного и надземного строительства, связанных с использованием тонкостенных конструкций, показало их особую эффективность при дисперсном армировании стекловолокном, сдерживающим процесс трещинообразования.

Предложенная вариационная постановка задачи для случая дисперсно и дискретно армированного материала позволяет представить решение в виде системы алгебраических уравнений, что соответствует инженерному подходу к задачам такого рода.

Даны рекомендации в отношении процента фибрового армирования и типов тонкостенных элементов из стеклофибробетона при изготовлении сборных конструкций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 183 с.
2. Ehsani M.R., Saadatmanesh H. Design recommendation for bond of GFRP rebars to concrete // Journal of Structural Engineering. 1996. March. Pp. 247–254.
3. Swamy R.N. Fibre-reinforced concrete: mechanics, properties and applications // Indian Concrete Journal. 1974. Vol. 48 (1). Pp. 7–16.
4. Kargahi M. Fiber reinforced plastic (FRP) shell as external reinforcement for concrete columns: MS; University of Central Florida. Fla., 1995. 32 p.
5. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. Пер. с англ. С.Л. Баженова. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
6. Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Многоуровневое армирование конгломератов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 57–59.
7. Yuriev A.G., Panchenko L.A., Naumov A.E. A Variational statement of problem for the case of dispersely and discretely reinforced material

// International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. № 3. С. 15361–15369.

8. Юрьев А.Г. Строительная механика: Синтез конструкций. М.: МИСИ, 1982. 100 с.

9. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 с.

10. Колтунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. М.: Выс. школа, 1963. 279 с.

11. Ржаницын А.Р. Расчет упругих оболочек. М.: Изд-во МИСИ, 1977. 104 с.

12. Талантова К.В., Халтурина Л.В. Оболочки покрытия храмовых зданий на основе

стале-фибробетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 1. С. 13–16.

13. Юрьев А.Г. Основы проектирования рациональных несущих конструкций. Белгород: Изд-во БТИСМ, 1998. 94 с.

14. Панченко Л.А., Шевченко А.В. Железобетонный цилиндрический резервуар с дополнительным дисперсным армированием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 36–42.

15. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций (ВСН 56-97). М.: НТУ НИЦ «Строительство», 1997. 91 с.

Поступила в феврале 2019 г.

© Панченко Л.А., Ерижикова Е.С., 2019

Информация об авторах

**Панченко Лариса Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.la@bstu.ru; panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Ерижикова Елена Сергеевна**, студент. E-mail: sockolowa.le@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Московская область, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

<sup>1,\*</sup>**Panchenko L.A.**, <sup>2</sup>**Erizhokova E.S**

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26

\*E-mail: panchenko.la@bstu.ru

## GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE IN THIN-WALLED CONSTRUCTIONS

**Abstract.** Fibrous composites are progressive materials for buildings and structures. Structures based on them are characterized by high technical and economic characteristics. Glass fiber concrete is effective for thin-walled structures. Various principles of structural mechanics applied to fiber composites are proposed for solving design problems. The optimal configuration of the covering is determined by the stationarity of its potential energy for given values of the calculated resistances of the material components. This formulation of the problem leads to a global minimum of the covering volume. In particular, an axisymmetrically loaded spherical cover is considered; the optimal thickness is determined from the condition of equal resistance by the von Mises yield criterion. Types of elements for precast glass-fiber concrete of various spans are recommended. In addition, the shallow tunnels are considered; they are a prevalent object of transport communications. The rationality of using the thin-walled spatial systems consisting of rectangular plates is established. The isoperimetric problem is solved for a given volume of material based on the generalized Lagrangian principles. The thickness of the rectangular plates of the spatial system of the tunnel is taken as a variable parameter.

**Keywords:** glass fiber concrete, thin-walled structures, design tasks, variational principles of structural mechanics, covers, shallow tunnels.

### REFERENCES

1. Panchenko L.A. Building structures with fibrous composites [*Stroitel'nye konstrukcii s voloknistymi kompozitami*]. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2013, 183 p. (rus)

2. Ehsani M.R., Saadatmanesh H. Design recommendation for bond of GFRP rebars to concrete.

Journal of Structural Engineering. 1996, March. Pp. 247–254.

3. Swamy R.N. Fibre-reinforced concrete: mechanics, properties and applications. Indian Concrete Journal. 1974. Vol. 48 (1). Pp. 7–16.

4. Kargahi M. Fiber reinforced plastic (FRP) shell as external reinforcement for concrete col-

umns: MS; University of Central Florida. Fla., 1995. 32 p. (rus)

5. Matthews F., Rawlings R. Composite materials. Mechanics and technology [*Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya*]. Per. with English. S.L. Bazhenov. M.: Technosphere, 2004. 408 p. (rus)

6. Yuriev A.G., Panchenko L.A. Multi-level reinforcement of conglomerates [*Mnogourovnevoe armirovanie konglomeratov*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 57–59. (rus)

7. Yuriev A.G., Panchenko L.A., Naumov A.E. A Variable statement of problem for the case of dispersed and Discretely reinforced material. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 15361–15369.

8. Yuriev A.G. Structural mechanics: Synthesis structures [*Stroitel'naya mekhanika: Sintez konstrukcij*]. M.: MISI, 1982. 100 p. (rus)

9. Yuriev A.G. Variational principles of structural mechanics [*Variacionnye principy stroitel'noj mekhaniki*]. Belgorod: Publishing house Belgram, 2002. 90 p. (rus)

10. Koltunov N.In. Bases of calculation of elastic shells [*Osnovy rascheta uprugih obolochek*]. M.: Higher School, 1963. 279 p. (rus)

11. Rzhanitsyn A.R. Calculation of elastic shells [*Raschet uprugih obolochek*]. M.: publishing house MISI, 1977. 104 p. (rus)

12. Talantova K.V., Khalturina L.V. Coating Shells of temple buildings on the basis of steel-fiber concrete [*Obolochki pokrytiya hramovyh zdaniy na osnove stalefibrobetona*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 1. Pp. 13–16. (rus)

13. Yuriev A.G. Fundamentals of design of rational load-bearing structures [*Osnovy projektirovaniya racional'nyh nesushchih konstrukcij*]. Belgorod: Publishing house BTIM, 1998. 94 p. (rus)

14. Panchenko L.A., Shevchenko A.V. Reinforced Concrete cylindrical tank with additional dispersed reinforcement [*Zhelezobetonnyj cilindricheskij rezervuar s dopolnitel'nyim dispersnym armirovaniem*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 36–42. (rus)

15. Design and the main provisions of the technology of production of fiber-concrete structures (VSN 56-97). [*Proektirovanie i osnovnye polozheniya tekhnologij proizvodstva fibrobetonnyh konstrukcij (VSN 56-97)*]. M.: NTU SIC "Construction", 1997. 91 p. (rus)

#### Information about the authors

**Panchenko, Larisa A.** PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Erizhokova, Elena S.** Bachelor student. E-mail: sockolowa.le@yandex.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26.

---

Received in February 2019

#### Для цитирования:

Панченко Л.А., Ерижикова Е.С. Стеклофибробетон в тонкостенных конструкциях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №4. С. 70–76. DOI: 10.34031/article\_5cb1e65c9f1f72.39954168

#### For citation:

Panchenko L.A., Erizhokova E.S. Glass fiber reinforced concrete in thin-walled constructions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 70–76. DOI: 10.34031/article\_5cb1e65c9f1f72.39954168