Оригинальная статья / Original article

УДК 624.074.421 https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99

# Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий

А. Е. Донцова <sup>1</sup>, О. Н. Столяров <sup>1</sup> 🖂

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

⊠ e-mail: stolyarov\_on@spbstu.ru

### Abstract

**Цель исследования.** В предлагаемой публикации в качестве цели исследования выбрана оценка эффективности применения неметаллических сеток из высокопрочных волокон в армировании складчатых элементов. Для этого исследуются методы расчета складчатых конструкций из бетонных композитов и проводится сравнительный расчет конструкции с различными параметрами армирования.

**Методы.** В статье проанализирован алгоритм расчета армоцементных конструкций по методу предельных усилий с переходом от исходного складчатого сечения к приведенному. По исследуемому методу проведен расчет тонкой складчатой панели, армированной сетками из различных материалов, с постоянным коэффициентом сетчатого армирования. В качестве армирования были рассмотрены сварная стальная сетка, тканая сетка из высокопрочных стеклянных волокон и тканая сетка из углеродных волокон. Попутно была решена обратная задача, в рамках которой подбирался коэффициент армирования, необходимый для обеспечения одинаковой несущей способности сечения при применении разных армирующих материалов.

**Результаты.** Расчет показал наибольшую несущую способность сечения, армированного сеткой из углеродных волокон – 14,5 кНм. При армировании сеткой из высокопрочных стеклянных волокон несущая способность сечения составила 6,4 кНм. Наименьшие значения были получены при армировании складчатой панели сварной стальной сеткой: несущая способность сечения составила 1,72 кНм. Коэффициенты сетчатого армирования для стальной сетки (С), стеклянной сетки (ЩС) и углеродной сетки (У) распределились в соотношении С:ЩС:У=1:0,26:0,12.

Заключение. Армирование бетонных композитов неметаллическими сетками имеет значительный потенциал для проектирования легких пространственных конструкций покрытий зданий и сооружений. Применение высокопрочных армирующих волокон позволяет достигнуть прочности панелей, сравнимой с прочностью традиционных армоцементных изделий. Необходимо рассмотреть прочие прочностные расчеты складчатых панелей с армированием неметаллическими сетками, а также экспериментально подтвердить результаты аналитических расчетов.

*Ключевые слова:* бетон; сцепление; композитная арматура; текстильно-армированный бетон; оболочки; складчатые конструкции.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Донцова А. Е., Столяров О. Н., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 82-99

(cc) BY 4.0

Для цитирования: Донцова А. Е., Столяров О. Н. Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 82-99. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99.

Поступила в редакцию 29.05.2024

Подписана в печать 10.07.2024

Опубликована 30.09.2024

# Ultimate limit-state design of textile-reinforced concrete folded floor panels

## Anna E. Dontsova <sup>1</sup>, Oleg N. Stolyarov <sup>1</sup>

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
 29, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg 195251, Russian Federation

⊠ e-mail: stolyarov\_on@spbstu.ru

### Abstract

**Purpose of reseach.** The main goal of this study is to evaluate the effectiveness of using non-metallic meshes made of high-strength fibres in the reinforcement of folded elements. For this purpose, methods for calculating folded structures made of concrete composites are investigated, and a comparative calculation of the structure with various reinforcement parameters is performed.

**Methods.** The study analyzes an algorithm for calculating reinforced cement structures using the limit force method with the transition from the original folded section to the reduced section. Using the method under study, we calculated a thin folded panel reinforced with meshes of various materials with a constant mesh reinforcement coefficient. Welded steel mesh, high-strength glass fiber textile mesh and carbon fiber textile mesh were considered as reinforcement. Simultaneously, the inverse problem was solved, within the framework of which the reinforcement coefficient necessary to ensure the same load-bearing capacity of the section when using different reinforcing materials was selected.

**Results.** Sample of section reinforced with carbon fiber mesh exhibit the greatest ultimate load of 14.5 kNm. Sample of section reinforced with glass fiber and welded steel mesh exhibit ultimate load of 6.4 kNm and 1.72 kNm, respectively. Inverse problem was also solved. The reinforcement ratio necessary to ensure equal load-bearing capacity of the panel reinforced with different materials was determined. The reinforcement ratios of steel mesh (S), AR-glass textile (G) and carbon textile (C) were found as S:G:C=1:0.26:0.12.

**Conclusion.** Reinforcement of concrete composites with non-metallic meshes has significant potential for the design of lightweight spatial structures for roofing buildings and structures. The use of high-strength reinforcing textile meshes makes it possible to achieve panel strength comparable to that of traditional reinforced concrete products. It is necessary to consider other strength calculations of folded panels reinforced with non-metallic meshes and experimentally confirm the results of analytical calculations.

Keywords: concrete; bond; non-metallic reinforcement; textile reinforced concrete; shells; folds; folded structures.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Dontsova A. E., Stolyarov O. N. Ultimate limit-state design of textile-reinforced concrete folded floor panels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 82-99 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99.

Received 29.05.2024

Accepted 10.07.2024

Published 30.09.2024

### Введение

Текстильно-армированный бетон (ТАБ) – это сравнительно новый конструкционный материал. В научной литературе присутствует значительное число исследований его конструктивных и эксплуатационных свойств [1-3], а также описан ряд случаев применения конструкций из ТАБ в объектах гражданского строительства [4-7]. Оценка прочности элементов из ТАБ и её повышение являются ключевыми вопросами исследований на данный момент. Прочность ТАБ на изгиб обсуждается в статьях [8, 9]. Испытания элементов из текстильноармированного бетона на растяжение представлены в работах [10, 11]. В работах [12, 13] рассматриваются конструктивные особенности использования высокопрочного бетона при создании тонкостенных элементов из ТАБ. Предлагается использование технологии химического предварительного напряжения панелей, повышающего прочность на изгиб и трещиностойкость элементов [14]. Сравнение различных материалов для текстильного армирования представлено в [15]. Тем не менее, несущая способность конструкций из ТАБ в большинстве случаев определяется экспериментально или с применением конечно-элементного моделирования. Отсутствуют стандарты, регламентирующие применение текстильно-армированного бетона в строительных проектах.

При проектировании железобетонных покрытий зданий и сооружений, испытывающих нагрузки только от собственного веса и атмосферных осадков, сжатая зона бетона зачастую оказывается загружена незначительно, несущая способность материала не используется в полной мере. Такие случаи можно рассматривать как случаи вынужденного перерасхода материала [16, 17]. Данная инженерная проблема может быть решена конструированием пустотных и ребристых покрытий, а также покрытий оболочкового типа: складчатых [18], арочных [19, 20], или криволинейных [6]. Обзор проектов оболочек из текстильно-армированного бетона приведен в [21, 22]. Прочностные расчеты складчатых конструкций из текстильноармированного бетона приведены в работах [23]. Экспериментальная оценка прочности сэндвич-панелей со складчатой сердцевиной из текстильно-армированного бетона представлена в [24]. Масштабным проектом в данной области является проект немецких ученых Oricrete [25], в рамках которого складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона производятся по методу оригами [26, 27].

В данной работе рассмотрен способ расчёта складчатой конструкции покрытия из текстильно-армированного бетона на основании основных положений расчёта композитных бетонных конструкций, изложенных в действующих нормах и научной литературе. Для армирования конструкции рассматриваются основовязаные сетки из стеклянных и углеродных ровингов.

При проектировании оболочек рационально применение армоцемента – бетонного композита, армированного тканой или плетеной стальной сеткой [28]. Армоцемент является ближайшим аналогом ТАБ, различие между композитами заключается в материале армирующей сетки. В российских строительных нормах актуальны стандарты по применению армоцемента – это СП 96.13330.2016 «Армоцементные конструкции», СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования», а также «Пособие по проектированию армоцементных конструкций» к СП 96.13330.2016.

Применение неметаллического армирования в бетонных конструкциях регламентируется СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». Нормативный предел прочности стеклокомпозитной арматуры при растяжении  $R_{f,n}$ =800 МПа, что соответствует стальной арматуре класса A800. Расчетное сопротивление растяжению стеклокомпозитной арматуры при расчете по предельным состояниям первой группы на действие только постоянных и длительных нагрузок в соответствии со сводом правил равно  $R_f$ =240 МПа, что соответствует расчетному сопротивлению растяжению стальной арматуры класса А240 (210 МПа). Дальнейшие указания по расчету изделий со стеклопластиковой или стальной арматурой различаются незначительно и строятся на основных законах теории железобетона. Взаимозаменяемость стеклопластиковой и стальной арматуры зачастую обосновывается сходством в показателях сцепления армирующих стержней с бетонной матрицей [29], а также близостью коэффициентов линейного расширения стали и стеклопластика [28].

Стеклопластиковые и стальные стержни являются сходными по основным характеристикам, и стеклопластиковую арматуру часто используют в строительной практике. Работа сеток из стеклянных нитей в качестве армирующего материала может отличаться от работы стержней. Во-первых, внешние геометрические параметры нитей не являются постоянными характеристиками. Нити могут деформироваться при бетонировании конструкций и последующей усадке бетона. В этом случае изменяется диаметр и форма нити, а также её площадь сечения, что влияет на коэффициент армирования конструкции. Поэтому для проведения аналогии между ткаными стеклянными и стальными сетками необходимо дополнительное теоретическое и экспериментальное обоснование. Тем не менее, с точки зрения сцепления армирующего материала с бетонной матрицей, характеристики стальных стержней, стеклопластиковых стержней и стеклянных нитей схожи. В работах [30, 31] представлены результаты испытаний полимерных ровингов на выдергивание из бетонной матрицы, и влияние пропиток и глубины заделки на сцепление ровингов с бетоном.

Цель данного исследования заключалась в оценке эффективности применения неметаллических сеток из высокопрочных волокон в армировании складчатых элементов. Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

1. Проанализировать метод расчета складчатых конструкций, использующий переход от складки к приведенному двутавровому сечению.

2. Исследовать соответствие геометрических параметров исходного складчатого и конечного приведенного сечений для осуществления корректного перехода от одного к другому.

3. Провести оценочный расчет типовой складчатой панели с трапецеидальным поперечным сечением по различным сценариям армирования: с использованием сварной стальной сетки, сетки из высокопрочных стеклянных волокон, и сетки из углеродных волокон.

### Материалы и методы

Расчет складчатых покрытий через приведенное сечение

Аналитический расчет складчатых покрытий ведется посредством приведения складчатого поперечного сечения к эквивалентному (приведенному). Эквивалентным принимается тавровое или двутавровое сечение для треугольных и трапецеидальных складок, соответственно. Работа армирующего материала и бетонной матрицы представляется совместной, учёт сцепления арматуры с бетоном не производится. В расчёте учитывается лишь прочность армирующего материала и его площадь в сечении элемента. Алгоритм расчёта прочности сечения, нормального к продольной оси, по предельным состояниям первой группы приведен на рис. 1.

# Переход к приведенному сечению для трапецеидальной складки

Основные геометрические характеристики исходной трапецеидальной складки и соответствующего ей приведенного сечения (двутавра) приведены на рис. 2.

Соответствие геометрических параметров исходного сечения трапецеидальной формы и приведенного двутаврового сечения сведено в табл. 1.

86



Рис. 1. Алгоритм расчёта складчатых элементов

Fig. 1. The algorithm for folded-plate structures design



Рис. 2. Схемы сечений: **a** – исходного; **б** – приведенного Fig. 2. Folded-plate section parameters: **a** – initial; **б** – transformed section

Обозначение /	Трапецеидальная складка /	Двутавр / I-beam			
Designation	Trapezoidal fold				
Заданные характеристики					
$t/t_f/t'_f$	Толщина сечения	Толщина верхней и нижней полки			
$b_f$	Ширина нижнего основания	Ширина нижней полки			
<i>b</i> ' <sub><i>f</i></sub>	Ширина верхнего основания	Ширина верхней полки			
h	Высота складки	Высота двутавра			
α	Угол наклона складки к горизонту	-			
n	Число полных складок в элементе				
Рассчитываемые характеристики					
$h_w = h - (t_f + t'_f)$	-	Высота стенки двутавра			
$t_w = 2t\sin\alpha \cdot n$	-	Толщина стенки двутавра			

Table 1.	Correspondence	between the geom	etric characteristics	of the original and	I transformed sections

Таблица 1. Соответствие геометрических характеристик исходного и приведенного сечений

Для сравнительного анализа была рассмотрена складчатая панель, находящаяся под действием изгибающего момента от постоянных и длительных нагрузок (М=12,56 кНм), и рассчитанная как армоцементное строительное изделие в «Пособии по проектированию армоцементных конструкций» [32, с. 32-34]. Исходные данные для задачи были приняты из примера расчёта. Схема поперечного

сечения панели приведена на рис. За. Схема приведенного сечения складки приведена на рис. 3б.

(приведенная)

Оценка несущей способности складки при различном армировании панели

В исходной задаче складка армирована несколькими типами стального армирования:



Рис. 3. Схема поперечного сечения: а – трапециедальной складки; б – двутавра Fig. 3. Cross-sectional diagram of:  $\mathbf{a}$  – trapezoidal fold;  $\mathbf{6}$  – I-beam

 Двумя сварными стальными сетками № 12,5-05 (по ТУ 14-4-713-97).

2. Четырьмя стержнями Ø3 мм класса Вр-I (по ГОСТ 6727) в верхнем основании;

3. Четырьмя стержнями Ø4 мм класса Вр1400 в нижнем основании складки.

Для сравнения различных видов армирующей сетки рассматриваемая складка была рассчитана по той же методике с тремя видами армирования, различными по материалу, но с постоянным коэффициентом армирования:

1. Армирование одной сварной стальной сеткой № 12,5-05 (по ТУ 14-4-713-97). Расчетное сопротивление растяжению  $R_{mc_1} = 245 \text{ M}\Pi a$  (табл. 4 СП 96.13330.2016); модуль упругости  $E_{m_1} = 150000 \text{ M}\Pi a$  (п. 5.2.8 СП 96.13330.2016).

2. Армирование одной тканой сеткой из стекловолокна (СР-4<sup>1</sup>) линейной плотностью 2400 текс. Сопротивление растяжению  $R_{mc_2} = 914$  МПа; модуль упругости  $E_{m_2} = 66500$  МПа<sup>2</sup>.

3. Армирование одной тканой сеткой из углеродного волокна (УР1<sup>1</sup>) линейной плотностью 1600 текс. Сопротивление растяжению  $R_{mc_3} = 2093$  МПа; модуль упругости  $E_{m_3} = 173000$  МПа<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Там же, табл. 2.1

<sup>3</sup> Там же, табл. 2.4

Материал панели принят из примера её расчёта – мелкозернистый бетон класса В40, с расчётной призменной прочностью на сжатие  $R_b = 22$  МПа (по таблице 6.8 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») и относительной деформацией сжатого бетона при напряжениях, равных  $R_b$ ,  $\varepsilon_{b_2} = 0,0048$  (по таблице 6.10 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»).

Сравнительный расчёт всех четырёх случаев армирования при постоянном коэффициенте армирования сетками  $\mu_m = 0,0015$  (при толщине элемента 10 мм) приведен в табл. 2. Данные об армирующих стержнях и их параметрах в таблицу не занесены, поскольку в полной мере представлены в примере расчета задачи в [32].

Пример расчёта таблицы для исходной схемы армирования панели:

Относительная деформация арматуры растянутой зоны вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R}{E},\tag{1}$$

где *R* – сопротивление арматуры растяжению, МПа;

*E* – модуль упругости арматуры, МПа.

Для первой схемы армирования в растянутой зоне находятся стержни класса Вр1400 с  $R_s = 1215$  МПа,  $E_s = 200000$  МПа:

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{1215}{200000} = 0,00608.$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Столяров О.Н. Тонкостенные строительные конструкции из текстильно-армированного бетона: специальность 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / О.Н. Столяров; Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого. СПб., 2023. 334 с.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 82-99

Table 2. Calculation of a folded panel with a mesh reinforcement coefficient of $\mu_m$ =0,0015					
	Исходн. (2		Comro un	Contra un	

Вид армирования / Type of reinforcement	и стержни) / Initial (2 welded nets and rods)	Сварная сетка / Welded mesh	Сетка из стеклянн. ро- вингов СР-4 / Glass mesh. roving CP 4	Сетка из уг- леродн. ро- вингов / Car- bon mesh. Roving			
Прочность сеток на растяжение, $R_{mc}$ , МПа	245	245	914,1	2093			
Число сеток, <i>п</i>	2	1	1	1			
Модуль упругости арматуры, <i>Е<sub>m</sub></i> , МПа	200000	200000	66500	173000			
Относительная деформация ар- матуры растянутой зоны ε <sub>s,el</sub>	0,00608	0,001225	0,0137	0,0121			
Относительная высота сжатой зоны бетона ξ <sub>R</sub>	0,309	0,558	0,181	0,199			
Коэффициент армирования стержнями							
Сжатой (верхней) полки	0,00566	0	0	0			
Растянутой (нижней) полки	0,00339	0	0	0			
Коэффициенты приведенного армирования							
Сжатой (верхней) полки	0,0102	0,0008	0,0008	0,0008			
Растянутой (нижней) полки	0,0183	0,0008	0,0008	0,0008			
Вертикальной стенки	0,00105	0,00053	0,00053	0,00053			
Проверка положения границы сжатой зоны: $R_{c_1}A_{fc} > R_m\mu_{mf_1}A_{ft} + R_m\mu_{mw_1}A_{wt}$							
$R_{c_1}A_{fc}$ , H	122495	110980	113656,4	118372			
$R_m \mu_{mf_1} A_{ft} + R_m \mu_{mw_1} A_{wt}, \mathbf{H}$	69875	4677	17451	39956			
Условие соблюдается?	да	да	да	да			
Несущая способность сечения, кНм	17710	1716	6404	14663			

Таблица 2. Расчет складчатой панели при коэффициенте армирования сетками µ<sub>m</sub>=0,0015

Относительная высота сжатой зоны бетона  $\xi_R$  вычисляется по формуле

$$\xi_{R} = \frac{0,7}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b_{2}}}},$$

$$\xi_{R} = \frac{0,7}{1 + \frac{0,00608}{0,0048}} = 0,309.$$
(2)

Коэффициенты армирования рассчитываются по формуле

$$\mu_s = \frac{A_s}{A},\tag{3}$$

где  $A_i$  – площадь поперечного сечения арматуры, в данном случае стержней;

A – площадь поперечного сечения элемента. Для нижней растянутой полки площадь поперечного сечения четырех стержней  $A_s = 28,28 \text{ мм}^2$ , а габариты полки:  $b_f = 740 \text{ мм}, t_f = 20 \text{ мм}$ . Тогда коэффициент армирования нижней полки будет:

$$\mu_s = \frac{50,24}{740 \cdot 20} = 0,00339.$$

Коэффициент приведенного армирования рассчитывается по формуле

$$\mu_{m_1} = \mu_m + \mu_s \frac{R_s}{R_m} + \mu_{sp} \frac{R_{sp}}{R_m}, \qquad (4)$$

где  $\mu_m$  – коэффициент сетчатого армирования;

*R<sub>s</sub>* – расчетное сопротивление растяжению арматуры;

 $R_m$  — расчетное сопротивление растяжению сетки. С учетом коэффициента армирования сеткой  $\mu_m = 0,0015$ , и наличия в исходной задаче 2 сеток, для

нижней растянутой полки коэффициент приведенного армирования будет равен:

$$\mu_{m_1} = 0,0015 + 0,00339 \cdot \frac{1215}{245} = 0,0183.$$

Если граница сжатой зоны проходит в верхней полке, выполняется условие:

$$\begin{split} R_{c_{1}}A_{fc} &> R_{m}\mu_{mf_{1}}A_{ft} + R_{m}\mu_{mw_{1}}A_{wt}, \quad (5) \\ \text{где } R_{c_{1}} &= R_{b} + R_{mc}\mu_{m1}; \\ A_{fc} &= b'_{f}t'_{f}; \\ A_{ft} &= b_{f}t_{f}; \\ A_{w} &= h_{w}t_{w}. \end{split}$$

Рассчитаем каждую из частей неравенства:

$$R_{c_1} A_{fc} = (22 + 245 \cdot 0,0102) \times (0,25 \cdot 0,02) = 124332 \text{ H};$$

$$R_m \mu_{mf_1} A_{ft} + R_m \mu_{mw_1} A_{wt} =$$

$$= 245 \cdot 0,0183 \cdot 0,74 \cdot 0,02 +$$

$$+ 245 \cdot 0,00105 \cdot 0,24 \cdot 0,057 =$$

$$= 75314 \text{ H}$$

$$124332 \text{ H} > 75314 \text{ H}.$$

Условие выполнено, сжатая зона расположена в верхней полке.

При расположении сжатой зоны в верхней полке несущая способность сечения определяется по формуле

$$M_{cr} = R_{m} \mu_{mf_{1}} A_{ft} \left[ h - \frac{t_{f} + t_{f}^{'}}{2} \right] + R_{m} \mu_{mw_{1}} A_{w} \frac{h_{w} + t_{f}^{'}}{2}.$$
 (6)

Подставляя полученные значения в формулу (6), получаем несущую способность сечения:

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 82-99

$$M_{cr} = 245 \cdot 0,01988 \cdot (0,74 \cdot 0,02) \left[ 0,28 - \frac{0,02 + 0,02}{2} \right] + 245 \cdot 0,00105 \cdot (0,24 \cdot 0,057) \cdot \frac{0,24 + 0,02}{2} = 19,12 \text{ KHm}.$$

Полученный результат удовлетворяет изначальному условию, поставленному в задаче – воздействующий на сечение изгибающий момент *M* = 12,56 кНм меньше несущей способности сечения.

## Оценка потребности в армирующем материале для обеспечения одинаковой несущей способности сечения

Для оценки потребности в материале должна быть решена задача, обратная представленной в предыдущем пункте. Зададимся потребностью в несущей способности сечения  $M_{cr} = 10,5$  кНм, и рассчитаем необходимые коэффициенты армирования для такого сечения с использованием сварной стальной, стеклянной или углеродной сетки. Полученные коэффициенты армирования составят:

– для стальной сварной сетки  $\mu_{m_1} = 0,0095;$ 

-для сетки из стеклянных ровингов CP-4  $\,\mu_{m_2}=0,0025\,;$ 

-для сетки из углеродных ровингов УР1  $\mu_{m_2} = 0,0011.$ 

### Результаты и их обсуждение

Из проведенного расчёта можно сделать вывод, что основное влияние на прочность складки в исходной задаче оказывает стержневая арматура в ниж-

нем основании трапецеидальной складки. При удалении стержневой арматуры из сечения складки несущая способность сечения понижается на порядок. При этом, при использовании армирующей углеродной сетки несущая способность сечения оказывается сравнима с изначальной. Армирование сеткой из стеклянных ровингов повышает несущую способность сечения в 3,7 раза по сравнению со сварной сеткой. Результаты расчета в графическом представлении приведены на рис. 4. Результаты расчета исходной панели, армированной стержнями и сетками, аналогичны результатам, полученным в [32].

В расчёте была использована классическая модель расчета складчатых конструкций, в рамках которой армирование принимается равномерно распределенным по сечению элемента, поскольку расстояние между стержнями не превышает 10t, где t – толщина сечения. Правомерность применения данной модели в расчетах изделий из текстильно-армированного бетона должна быть дополнительно подтверждена экспериментально и методами конечно-элементного моделирования. Выполнение подтверждающих расчетов и создание моделей планируется в дальнейших исследованиях.



**Рис. 4.** Несущая способность сечения складки под действием постоянных и длительных нагрузок при расчете по первой группе предельных состояний с различными комбинациями армирования при постоянном коэффициенте армирования сетками µ<sub>m</sub>=0,0015

Fig. 4. Bearing capacity of a folded-plate section under constant and long-term loads calculated with various combinations of reinforcement at a constant mesh reinforcement coefficient of  $\mu_m$ =0,0015

Ввиду высокой стоимости высокопрочных углеродных волокон при дальнейших расчетах изделий из текстильно-армированного бетона следует рассмотреть возможности комбинирования стеклянных и углеродных армирующих волокон для повышения доступности конечного изделия.

Важно отметить, что для корректного определения расчетных прочностных показателей армирующих нитей из стекла и углерода необходимо введение коэффициентов условий работы, учитывающих работу армирующих нитей. Более широкое исследование свойств неметаллических армирующих нитей и их совместной работы с бетонной матрицей позволит внести в расчеты уточняющие коэффициенты.

### Выводы

В работе был проведен расчет на прочность складчатой панели с трапецеидальным сечением, находящейся под действием длительных и постоянных нагрузок по первой группе предельных состояний. Было рассмотрено четыре сценария армирования панели: стержнями и сварными стальными сетками (представленный изначально в пособии по проектированию [32]); одной сварной стальной сеткой № 12,5-05; одной тканой сеткой из стекловолокна; од]ной тканой сеткой из углеродного волокна. В результате исследования:

1. Сформирован алгоритм расчета складчатых конструкций с использованием перехода к приведенному двутавровому сечению. 2. Сопоставлены геометрические параметры складчатого и приведенного сечений рассчитываемых элементов.

3. Оценочный расчет типовой складчатой панели с одинаковым коэффициентом сетчатого армирования  $\mu_m = 0,0015$ показал наибольшую прочность сечения, армированного углеродным волокном. Несущая способность сечения составила  $M_{cr_2} = 14,47$  кHм, что сравнимо с несущей способностью исходного сечения, армированного высокопрочными стальными проволоками  $M_{cr} = 17,71$  кНм. Несущая способность сечения, армированного сеткой из стеклянных волокон,  $M_{cr_2} = 6,40$  кНм оказалась в 2,3 раза ниже, чем с углеродным армированием. Несущая способность сечения, армированного одной сварной стальной сеткой, оказалась самой низкой:  $M_{cr} = 1,72$  кНм.

### Список литературы

1. Zdanowicz K., Beckmann B., Marx S. Distributed strain measurements in thin expansive concrete slabs with biaxial textile reinforcement // Civ. Eng. Des. 2022. № 4. P. 154– 161. https://doi.org/10.1002/cend.202200002

2. Wu C., Pan Y., Yan L. Mechanical Properties and Durability of Textile Reinforced Concrete (TRC) — A Review // Polymers. 2023. № 18. P. 3826. https://doi.org/10.3390/polym15183826.

3. Siva Vignan G., Gourishetty R., Challa D.K. Study on mechanical properties of textile reinforced concrete // I-manager's Journal on Structural Engineering. 2020. № 2. P. 25. https://doi.org/10.26634/jste.9.2.17256

4. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete // International Congress Series. 2015. T. 1247, № 7. P. 119-126.

5. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick / D. Ehlig, F. Schladitz, M. Frenzel, et al. // Beton- und Stahlbetonbau. 2012. № 11. P. 777–785. https://doi.org/ 10.1002/ best.201200034

6. Friese D., Scheurer M., Hahn L. Textile reinforcement structures for concrete construction applications – a review // J. Compos. Mater. 2022. № 26. P. 4041–4064. https://doi.org/10.1177/00219983221127181

7. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion / P. Valeri, P. Guaita, R. Baur, et al. // Struct. Concr. 2020. № 6. P. 2251–2267. https://doi.org/10.1002/suco.201900511

8. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete / M. Halvaei, M. Jamshidi, M. Latifi, et al. // Constr. Build. Mater. 2020. № 262. P. 120877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877 9. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis // Mater. Struct. 2020. № 1. P. 17. https://doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4

10. Goldfeld Y. Structural modelling of textile-reinforced concrete elements under uniaxial tensile loading // Compos. Struct. 2020. № 235. P. 111805. https://doi.org/10.1016/ j.compstruct.2019.111805

11. Valeri P., Fernàndez Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete // Constr. Build. Mater. 2020. № 258. P. 119517. https://doi.org/10.1016/ j.conbuildmat.2020.119517

12. Rossi E., Randl N., Harsányi P. Overlapped joints in Textile Reinforced Concrete with UHPC matrix: An experimental investigation // Mater. Struct. 2021. № 4ю P. 152. https://doi.org/10.1617/s11527-021-01739-1

13. Forman P., Mark P. Interaktionsbemessung für schlanke Querschnitte aus UHPC / // Beton- und Stahlbetonbau, 2021. № 8. P. 607–619. https://doi.org/10.1002/best.202100026

14. Zdanowicz K., Marx S. Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing // Eng. Struct. 2022. № 256. P. 113946. https:// doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113946

15. Scheurer M. M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete // Mater. Today Proc. 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477

16. Jayasinghe A., Orr J., Hawkins W. Comparing different strategies of minimising embodied carbon in concrete floors // J. Clean. Prod. 2022. № 345. P. 131177. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131177

17. A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors / W. Hawkins, J. Orr, T. Ibell, et al. // Eng. Struct. 2020. № 207. P. 110195. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110195

18. Mohammadsalehi A., Mostofinejad D. Behavior of high-performance concrete canvas Miura-origami structures under flexural loading // Structures. 2023. № 54. P. 928–945. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.072

19. Du W., Liu Q., Zhou Z. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures // Thin-Walled Struct. 2019. № 137. P. 224–230. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014

20. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. New perspectives for design of lightweight structures by using textile reinforced concrete // Fib Symposium. Krakow, Poland: Structural Concrete Laboratory of EPFL. P. 8.

21. Kromoser B., Preinstorfer P., Kollegger J. Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components // Struct. Concr. 2019. № 2. P. 730–744. https://doi.org/10.1002/suco.201700225

22. De Coster A., De Laet L., Tysmans T. Exploring the three-dimensional space with modular concrete shells: Form-finding, design and structural analysis // Thin-Walled Struct. 2024. № 195. P. 111336. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111336

23. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types // CivilEng. 2024. № 1. P. 224–246. https://doi.org/10.3390/civileng5010012

24. Heimbs S., Cichosz J., Klaus M. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads // Compos. Struct. 2010. № 6. P. 1485–1497. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.001

25. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures // Adv. Eng. Softw. 2014. № 72. P. 119–127. https:// doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004

26. Spartali H., Woerd J.D., Hegger J. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns // Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2022. P. 1–11.

27. van der Woerd J.D., Chudoba R., Bongardt C. Oridome: Construction of a dome by folding // IASS-SLTE 2014 Symposium «Shells, Membranes and Spatial Structures: Foot-prints». Brasilia: International Association for Shell and Spatial Structures; 2014. P. 1–8.

28. Соколов Б.С. Проектирование армоцементных конструкций в Пособии к СП 96.13330.2016 // Бетон и железобетон. 2021. № 1. С. 3–7.

29. Xu S., Krüger M. Reinhardt, H. Bond Characteristics of Carbon, Alkali Resistant Glass, and Aramid Textiles in Mortar // J. Mater. Civ. Eng. 2004. № 4. P. 356–364. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(356)

30. Quadflieg T., Stolyarov O. Comparison of pull-out behavior of glass, basalt, and carbon rovings embedded in fine-grain concrete and geopolymer // Mater. Test. 2022. № 5. P. 746–753. https://doi.org/10.1515/mt-2021-2117

31. Homoro O., Michel M., Baranger T.N. Pull-out response of glass yarn from ettringite matrix: Effect of pre-impregnation and embedded length // Compos. Sci. Technol. 2019. № 170. P. 174–182. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.045

32. Соколов Б.С., Зенин С.А., Титаев В.А. Пособие по проектированию армоцементных конструкций. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020. 103 с.

### References

1. Zdanowicz K., Beckmann B., Marx S. Distributed strain measurements in thin expansive concrete slabs with biaxial textile reinforcement. *Civ. Eng. Des.* 2022; (4): 154–161. https://doi.org/10.1002/cend.202200002

2. Wu C., Pan Y., Yan L. A Review. *Polymers*. 2023; (18): 3826. https://doi.org/10.3390/polym15183826.

3. Siva Vignan G., Gourishetty R., Challa D.K. Study on mechanical properties of textile reinforced concrete. i-manager's Journal on Structural Engineering. 2020; (2): 25. https://doi.org/10.26634/jste.9.2.17256

4. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. *International Congress Series*. 2015; 1247 (7): 119-126.

5. Ehlig D., Schladitz F., Frenzel M., et al. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. *Beton- und Stahlbetonbau.* 2012; (11): 777–785. https://doi.org/10.1002/best.201200034

6. Friese D., Scheurer M., Hahn L. Textile reinforcement structures for concrete construction applications – a review. *J. Compos. Mater.* 2022; (26): 4041–4064. https://doi.org/10.1177/00219983221127181

7. Valeri P., Guaita P., Baur R., et al. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. *Struct. Concr.* 2020, (6): 2251–2267. https://doi.org/10.1002/suco.201900511

8. Halvaei M., Jamshidi M., Latifi M., et al. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020; (262): 120877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877

9. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis. *Mater. Struct.* 2020; (1): 17. https://doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4

10. Goldfeld Y. Structural modelling of textile-reinforced concrete elements under uniaxial tensile loading. *Compos. Struct.* 2020; (235): 111805. https://doi.org/10.1016/ j.compstruct.2019.111805

11. Valeri P., Fernàndez Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete. Constr. Build. Mater. 2020; (258): 119517. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119517

12. Rossi E., Randl N., Harsányi P. Overlapped joints in Textile Reinforced Concrete with UHPC matrix: An experimental investigation. *Mater. Struct*, 2021; (4): 152. https://doi.org/ 10.1617/s11527-021-01739-1

13. Forman P., Mark P. Interaktionsbemessung für schlanke Querschnitte aus UHPC. *Beton- und Stahlbetonbau.* 2021; (8): 607–619. https://doi.org/10.1002/best.202100026

14. Zdanowicz K., Marx S. Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing. *Eng. Struct.* 2022; (256): 113946. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113946

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 82-99

15. Scheurer M. M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete. *Mater. Today Proc.* 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477

16. Jayasinghe A., Orr J., Hawkins W. Comparing different strategies of minimising embodied carbon in concrete floors. *J. Clean. Prod.* 2022; (345): 131177. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131177

17. Hawkins W. Orr, J., Ibell T., et al. A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors. *Eng. Struct.* 2020; (207): 110195. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110195

18. Mohammadsalehi A., Mostofinejad D. Behavior of high-performance concrete canvas Miura-origami structures under flexural loading. *Structures*. 2023; (54): 928–945. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.072

19. Du W., Liu Q., Zhou Z. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures. *Thin-Walled Struct.* 2019; (137): 224–230. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014

20. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. New perspectives for design of lightweight structures by using textile reinforced concrete. *fib Symposium*. Krakow, Poland : Structural Concrete Laboratory of EPFL. P. 8.

21. Kromoser B., Preinstorfer P., Kollegger J. Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components. *Struct. Concr.* 2019; (2): 730–744. https://doi.org/10.1002/suco.201700225

22. De Coster A., De Laet L., Tysmans T. Exploring the three-dimensional space with modular concrete shells: Form-finding, design and structural analysis. *Thin-Walled Struct*. 2024; (195): 111336. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111336

23. Vakaliuk I. Scheerer, S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types. *CivilEng.* 2024; (1): 224–246. https://doi.org/10.3390/civileng5010012

24. Heimbs S., Cichosz J., Klaus M. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads. *Compos. Struct.* 2010; (6): 1485–1497. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.001

25. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Adv. Eng. Softw.* 2014; (72): 119–127. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004

26. Spartali H., Woerd J.D., Hegger J. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns. *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2022. P. 1–11.

27. van der Woerd J.D., Chudoba R., Bongardt C. Construction of a dome by folding. *IASS-SLTE 2014 Symposium «Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints»*. Brasilia: International Association for Shell and Spatial Structures; 2014. P. 1–8.

28. Sokolov B.S. Armocement Structures Designing in the Manual to the SP 96.13330.2016. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2021; (1): 3–7. (In Russ.).

29. Xu S., Krüger M., Reinhardt H. Bond Characteristics of Carbon, Alkali Resistant Glass, and Aramid Textiles in Mortar. *J. Mater. Civ. Eng.* 2004; (4): 356–364. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(356)

30. Quadflieg T., Stolyarov O. Comparison of pull-out behavior of glass, basalt, and carbon rovings embedded in fine-grain concrete and geopolymer. *Mater. Test.* 2022; (5): 746–753. https://doi.org/10.1515/mt-2021-2117

31. Homoro O., Michel M., Baranger T.N. Pull-out response of glass yarn from ettringite matrix: Effect of pre-impregnation and embedded length. *Compos. Sci. Technol.* 2019; (170): 174–182. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.045

32. Sokolov B.S., Zenin S.A., Titaev V.A. Manual for armocement structures design. Moscow; 2020. 103 p. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the Authors

Донцова Анна Евгеньевна, ассистент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dontsova\_ae@spbstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9081-9575

Столяров Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: stolyarov\_on@spbstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2930-5022 Anna E. Dontsova, Assistant at the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Engineering of the Institute of Civil Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: dontsova\_ae@spbstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9081-9575

**Oleg N. Stolyarov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor at the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Engineering of the Institute of Civil Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: stolyarov\_on@spbstu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2930-5022