

Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 31–40.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (5): 31–40.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 692.45: 691.328 + 666.983

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Клара Васильевна Талантова, Александр Сергеевич Фисенко

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены пространственные конструкции структурного покрытия из армоцемента: регулярная структура, состоящая из двух основных элементов – пирамидального и ребристой плиты (вариант 1) и гибридного – пирамидального элемента с железобетонным основанием и растянутого пояса из стальных труб (вариант 2). Рассмотрены пути их совершенствования за счет применения фибрового армирования взамен сетчатого, т.е. использования сталефибробетона, моделирования средствами BIM-технологии, выполнения статического расчета программными средствами и в рамках конструктивного расчета с помощью специальных программных средств, оптимизации расхода стальной фибры и характеристик исходного бетона. Показано, что все перечисленное открывает возможность задавать свойства элементов структурного покрытия в соответствии с напряженно-деформированным состоянием и условиями эксплуатации. Приведены результаты технико-экономического сравнения вариантов.

Ключевые слова: армоцемент, элементы структурного покрытия, пирамидальный элемент, ребристая плита, сталефибробетон, регулярная структура, гибридная структурная конструкция, трубы стальные, технико-экономические показатели

Для цитирования: Талантова К.В., Фисенко А.С. Совершенствование структурных покрытий общественных зданий // Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 31–40. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40.

Original article

IMPROVEMENT OF STRUCTURAL COATINGS PUBLIC BUILDINGS

Klara V. Talantova, Aleksandr S. Fisenko

Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article presents spatial structures of a structural coating made of reinforced cement: a regular structure consisting of two main elements – a pyramidal and ribbed slab (option 1) and a hybrid – a pyramidal element with a reinforced concrete base and a stretched belt of steel pipes (option 2). The ways of their improvement due to the use of fiber reinforcement instead of mesh reinforcement are considered, i.e. use of steel fiber reinforced concrete, modeling by means of BIM technology, performing static analysis with software tools, and within the framework of constructive calculation using special software tools, optimizing the consumption of steel fibers and the characteristics of

the original concrete. It is shown that all of the above makes it possible to set the properties of structural coating elements in accordance with the stress-strain state and operating conditions. The results of the technical and economic comparison of options are given.

Keywords: reinforced cement, structural coating elements, pyramidal element, ribbed slab, steel fiber reinforced concrete, regular structure, hybrid structural design, steel pipes, technical and economic indicators

For citation: Talantova K.V., Fisenko A.S. Improvement of structural coatings public buildings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (5): 31–40. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40.

Учеными Ленинградского зонального научно-исследовательского института экспериментального проектирования (ЛенЗНИИЭП) в 1964–1965 гг. была разработана регулярная структура покрытия из армоцементных тонкостенных элементов ($h = 10\text{--}20$ мм) на основе мелкозернистого бетона, армированных тканями или сварными сетками по сечению из проволочной арматуры диаметром 0,5–1,5 мм [1].

Элементы армоцементного структурного покрытия имели размеры: пирамиды на плане – 1,5×1,5 м, высотой 0,9 м, плиты жесткости на плане – 1,5×1,5 м, высотой ребер 0,1 м [2, 3]. Такое конструктивное решение покрытия позволяет возводить помещения произвольной формы, обеспечивая его хорошие акустические свойства. Покрытие с регулярной структурой из тонкостенных армоцементных элементов обладает небольшой строительной высотой (в пределах 1 м), возможностью устройства плоской кровли, размещения между пирамидальными элементами необходимых коммуникаций, не требует дополнительной отделки и устройства подвесного потолка (рис. 1) [1–3]. Многогранная поверхность структурного покрытия служит для повышения уровня звукопоглощения в зале, придает архитектурную выразительность интерьера в помещениях и фойе [2].

Однако специальные способы обеспечения проектного положения сетчатой арматуры не всегда гарантируют получение надежного защитного слоя сеток из стальной проволоки диаметром 0,5–1,5 мм [3]. Из-за нарушения плотности и толщины защитного слоя бетона возникает опасность коррозии арматуры из тонкой проволоки, что вызывает необходимость в специальной ее защите.



*Рис. 1. Структурное покрытие из армоцементных элементов. Вариант 1
а – покрытие вестибюля станции метро «Пролетарская» в Санкт-Петербурге; б – BIM-модель конструкции покрытия*

*Fig.1. Structural coating of reinforced cement elements. Option 1
а – covering the lobby of the metro station “Proletarskaya” in St. Petersburg; б – BIM model of coating construction*

Кроме того, армоцементные конструкции характеризуются повышенными деформациями усадки и ползучести, более низкой, чем у железобетонных конструкций (ЖБК), огнестойкостью, значительными тепло- и звукопроводностью, сложностью усиления [2, 3].

Применение сталефибробетона (СФБ) в тонкостенных структурных элементах покрытия дает возможность существенно снизить недостатки тонкостенных конструкций, присущих армоцементу [4], в частности, в силу высокой коррозионной стойкости материала СФБ исключить необходимость обеспечения защиты фибровой арматуры от коррозии в конструкции [5–7]. Помимо этого применение СФБ позволяет задавать физико-механические характеристики материала конструкции в соответствии с условиями эксплуатации, т.е. деформативность, в том числе от усадки и ползучести, огнестойкость, тепло- и звукопроводность и т.п. [6–8].

Известно, что структура сталефибробетона формируется при насыщении бетона, как правило, мелкозернистого, тонким стальным волокном фиброй, например, диаметром $d_f = 0,3–0,8$ мм и соответственно длиной $l_f = 30–80$ мм, определяемых в соответствии с назначением и эксплуатационными требованиями к конструкции.

Как показали исследования [6, 7], структура бетонной матрицы в СФБ, по сравнению с исходным бетоном и бетоном в ЖБК, характеризуется меньшим количеством крупных пор и капилляров, наличием мелких замкнутых пор и большей однородностью. Таким образом, разработка тонкостенных элементов структурного покрытия на основе сталефибробетона, аналогичных по геометрии и назначению армоцементным, получила свое дальнейшее развитие.

При изготовлении сталефиброжелезобетонных (СФЖБ) пирамидальных элементов и плит жесткости, армированных помимо фибровой регулярной арматурой, не возникает проблем с обеспечением защитного слоя регулярной арматуры, которая размещается при необходимости в сечениях с высокими значениями напряжений и усилий.

Приступая к проектированию СФБ элементов структурного покрытия, предварительно, в соответствии с назначением элемента, принимается класс исходного мелкозернистого бетона и соответствующий ему тип стальной фибры [7, 8]. В результате статического расчета покрытия *методом конечных элементов* и анализа картин полей напряжений от невыгодного сочетания нагрузок оценивается напряженно-деформированное состояние покрытия и его элементов, определяются максимальные значения нормальных напряжений и усилий (сжатия σ_c , растяжения σ_t и главные напряжения σ_{m1} и σ_{m2} , а также изгибающие моменты M_x , M_y и продольные силы N_x , N_y) (рис. 2).

Далее проводится конструктивный расчет элементов покрытия по двум группам предельных состояний и разрабатываются схемы армирования. При проектировании структурного покрытия размерами на плане $B \times L = 30 \times 36$ м на стадии предварительного расчета был принят класс СФБ по прочности на сжатие $V_f 30$. Этому классу соответствуют расчетные сопротивления сталефибробетона: сжатию $R_{fb} = 22,1$ МПа, растяжению $R_{fbt} = 2,8$ МПа, модуль упругости $E_{fb} = 25,8 \cdot 10^3$ МПа.

После предварительного выбора фибры по результатам статического расчета с помощью программных средств (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619865 от 31.10.2012) уточнен ее

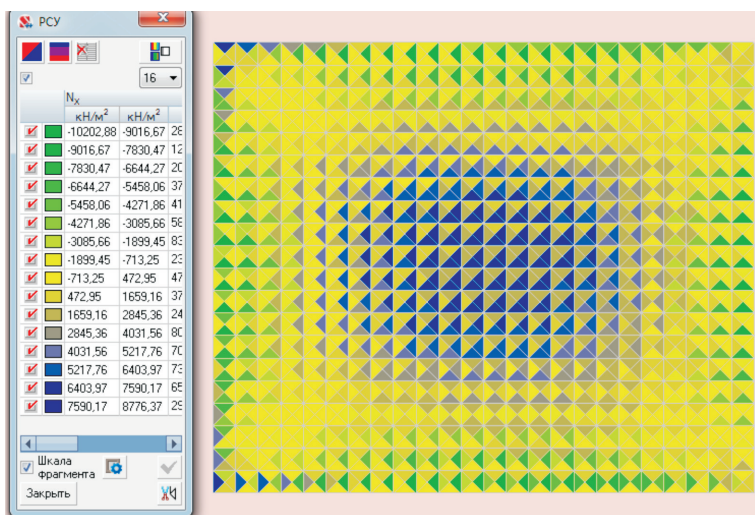


Рис. 2. Картина полей напряжений сталефибробетонного покрытия, созданная средствами ВК SCAD от действия наиболее невыгодного сочетания нагрузок

Fig. 2. The picture of the stress fields of the steel – reinforced concrete coating created by means of the VK SCAD from the action of the most unfavorable combination of loads

оптимальный расход и прочность на сжатие и растяжение исходного бетона [9] (табл. 1).

В результате анализа статического расчета картин полей напряжений все структурные элементы разделены на несколько групп унификации (рис. 3, табл. 1). Каждая группа унификации рассчитана на действие максимальных напряжений (усилий).

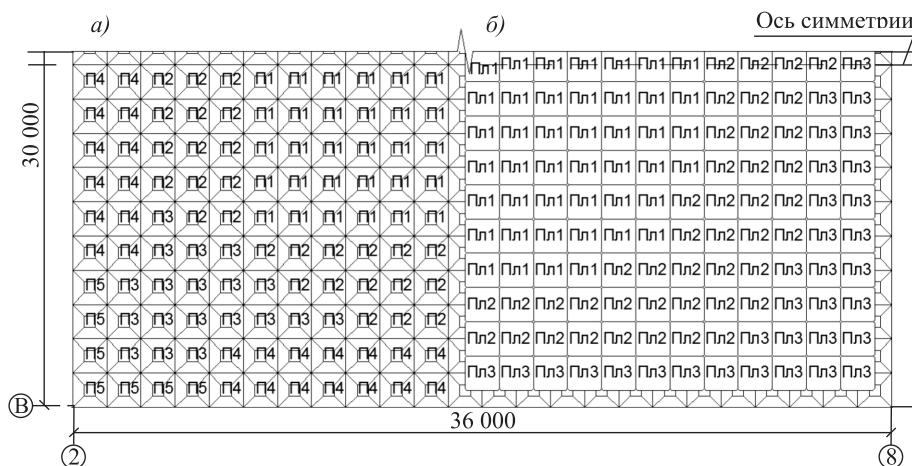


Рис. 3. Схема раскладки унифицированных элементов структурного сталефибробетонного покрытия. Фрагмент *а* – пирамидальные структурные элементы П1–П5; *б* – ребристые плиты жесткости Пл1–Пл3

Fig. 3. Layout scheme of unified elements of structural steel-reinforced concrete coating. Fragment *a* – pyramidal structural elements P1–P5; *b* – ribbed plates Pl1–Pl3

Таблица 1. Технико-экономические показатели групп унификации сталефиброжелезобетонных элементов регулярного структурного покрытия. Вариант 1

Table 1. Technical and economic indicators of the unification groups of steel-reinforced concrete elements of regular structural coating. Option 1

Марка элемента	Количество элементов на покрытие, шт.	Максимальное напряжение растяжения σ_t , МПа	Максимальное напряжение сжатия σ_c , МПа	Армирование q_0	Масса, т		Расход бетона, м ³		Расход стали, кг			
					одного элемента	на все покрытие	на элемент	на все покрытие	фибра	арматура	закладные	всего
П1	140	3,07	1,25	3,15	0,346	48,4	20,97	36,3	17,2	7,6	61,1	8550
П2	124	2,3	2,3	2,05	0,150	42,9	18,58	23,6	17,2	7,6	48,4	6020
П3	76	1,9	1,5	1,45	0,151	26,5	11,49	16,9	4,3	7,6	28,8	2190
П4	112	2,75	7,4	1,3	0,151	39,1	16,93	15,1	4,4	7,6	27,1	3040
П5	28	1,5	4,1	0,9	0,103	9,78	4,24	10,5	4,4	7,6	22,5	630
Пл1	153	–	13,7	0,55	0,243	37,3	15,66	4,3	7,1	2,9	14,3	2210
Пл2	156	–	10,0	2,0	0,22	38,0	15,97	15,8	7,1	2,9	25,8	4030
Пл3	128	1,8	3,9	1,3	0,09	28,2	11,54	9,0	3,3	0	12,3	1570
Всего	917					265	115,4					28 230

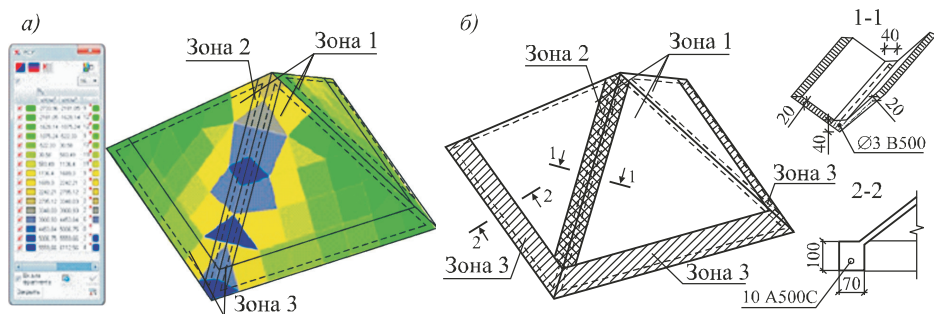


Рис. 4. Проектирование наиболее нагруженного пирамидального элемента П5
 а – картина полей напряжений, полученная средствами ВК SCAD: зона 1 $\sigma_t = 1,5$ МПа; $\sigma_c = 4,1$ МПа; зона 2 $\sigma_t = 6,15$ МПа; зона 3 $\sigma_t = 5,19$ МПа; $N_t = 41,5$ кН; б – схема зонного монодисперсного фибрового и регулярного армирования ($d_f = 1,2$ мм, $l_f = 150$ мм): зона 1 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$); зона 2 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$) + Ø3B500; зона 3 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$) + Ø10A500C

Fig 4. Designing the most loaded pyramidal element P5

а – the picture of stress fields obtained by means of VK SCAD: zone 1 $\sigma_t = 1,5$ МПа; $\sigma_c = 4,1$ МПа; zone 2 $\sigma_t = 6,15$ МПа; zone 3 $\sigma_t = 5,19$ МПа; $N_t = 41,5$ кН; б – scheme of zone-monodisperse fiber and regular reinforcement ($d_f = 1,2$ мм, $l_f = 150$ мм): zone 1 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$); zone 2 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$) + Ø3V500; zone 3 $R_{fbr} = 1,5$ МПа ($\mu_{fv} = 0,9\%$) + Ø10A500S

В результате статического расчета получены значения нормальных напряжений (например, рис. 4, а; 5, а) и усилий, и в соответствии с картинками полей напряжений и усилий разработаны схемы зонного монодисперсного фибрового армирования элементов покрытия (например, рис. 4, б; 5, б).

Выполнение статического расчета сталефибробетонных элементов структурного покрытия методом конечных элементов с помощью программных средств позволяет оценить действительное напряженно-деформированное состояние элемента, в соответствии с чем разрабатывается его

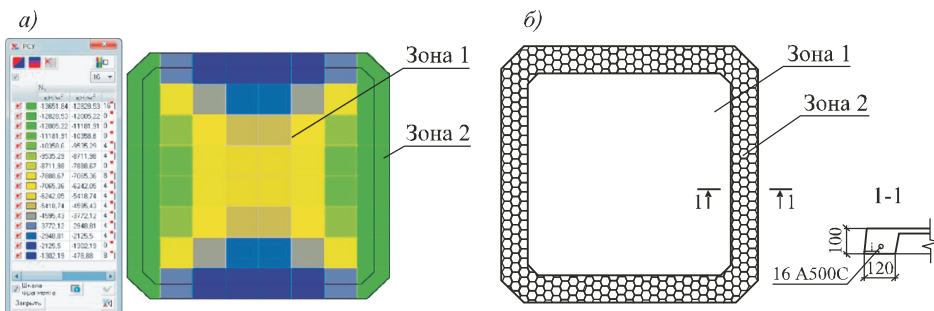


Рис. 5. Проектирование элемента П11 плиты жесткости

а – картина полей напряжений, полученная средствами ВК SCAD: зона 1 $\sigma_c = 13,7$ МПа; зона 2 $\sigma_c = 23,92$ МПа, $N_c = 287$ кН; б – схема зонного монодисперсного фибрового и регулярного армирования ($d_f = 0,25$ мм, $l_f = 12,5$ мм): зона 1 $R_{fb} = 13,7$ МПа ($\mu_{fv} = 0,55\%$); зона 2 $R_{fb} = 13,7$ МПа ($\mu_{fv} = 0,55\%$) + Ø16A500C

Fig. 5. Design of the element P11 of the stiffness plate

а – the picture of stress fields obtained by means of VK SCAD: zone 1 $\sigma_c = 13,7$ МПа; zone 2 $\sigma_c = 23,92$ МПа, $N_c = 287$ кН; б – scheme of zone-monodisperse fiber and regular reinforcement ($d_f = 0,25$ мм, $l_f = 12,5$ мм): zone 1 $R_{fb} = 13,7$ МПа ($\mu_{fv} = 0,55\%$); zone 2 $R_{fb} = 13,7$ МПа ($\mu_{fv} = 0,55\%$) + Ø16A500S

Таблица 2. Технико-экономические показатели групп унификации сталефиброжелезобетонных элементов структурного гибридного покрытия. Вариант 2

Table 2. Technical and economic indicators of unification groups of reinforced concrete structural elements of hybrid coating. Option 2

Марка элемента	Количество элементов на покрытии, шт.	Максимальное напряжение растяжения σ_t , МПа	Максимальное напряжение сжатия σ_c , МПа	Армирование по объему, %	Масса, т		Расход бетона, м ³		Расход стали, кг				
					одного элемента	на все покрытие	на элемент	на все покрытие	на элемент			на все покрытие	
									фибра	арматура	закладные		всего
П-1	82	0,5	4,2	0,6	0,791	64,9	0,34	28,2	15,9	–	32,9	48,8	4001
		–	–	–	0,945	77,5	0,39	32,3	–	28,2	17,2	45,4	3723
П-2	60	2,8	1,9	2,8	0,791	47,5	0,34	20,6	74,2	–	32,9	107,1	6426
		–	–	–	0,945	56,7	0,39	23,6	–	28,2	17,2	45,4	2724
Трубы 108×5	252	–	–	–	0,032	8,1	–	–	–	–	–	32	8089
Всего	394					254,7		105					24 963

схема конструирования, которая реализуется рациональным выбором фибрового армирования и бетона, что в сумме позволяет создать экономичное и долговечное конструктивное решение.

Помимо регулярного структурного покрытия специалистами ЛенЗНИИЭП разработан вариант комбинированного (гибридного) покрытия из пирамидальных элементов, вершинами вниз (армоцементные пирамиды с железобетонными основаниями и стальными трубами в растянутой зоне), которые могут устанавливаться в покрытии вплотную друг к другу или в шахматном порядке.

Нижний пояс гибридного покрытия, выполняемый из отдельных металлических стержней (труб), образует диагональную решетку (по сравнению с ортогональным верхним поясом). Такая конструктивная система не только эффективна по расходу материалов, но и при шахматном расположении элементов позволяет размещать светоаэрационные фонари через шаг, что улучшает освещенность помещения и вносит в интерьер оригинальные решения.

Аналогичное гибридное структурное покрытие со сталефиброжелезобетонными пирамидальными элементами вершинами вниз и со светоаэрационными фонарями разработано специалистами института ЛенНИИпроект в 1978–1983 гг. (вариант 2) для устройства покрытия четырехэтажного фойе в здании Российской национальной библиотеки (рис. 6, 7, табл. 2).

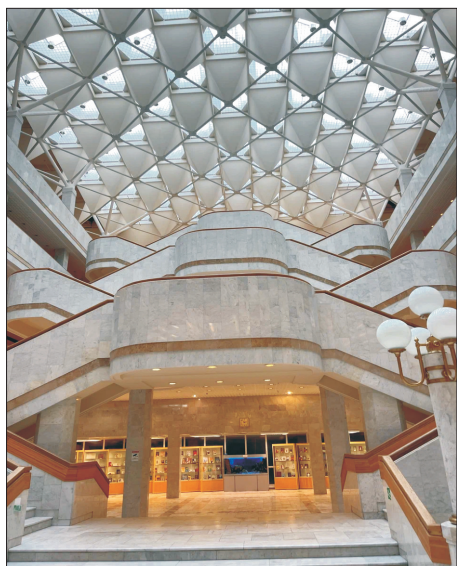


Рис. 6. Гибридное сталефиброжелезобетонное структурное покрытие в фойе Российской национальной библиотеки со светоаэрационными фонарями. Вариант 2. Общий вид

Fig. 6. Hybrid steel-reinforced concrete structural coating in the foyer of the Russian National Library with light-aerating lanterns. Option 2. General view

шает высоту регулярной структуры почти вдвое.

Кроме того, за счет возможности располагать между пирамидами светоаэрационные проемы оно отвечает высоким требованиям комфорта и подходит для покрытия высоких залов и атриумов.

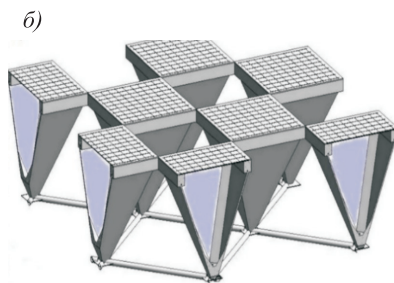
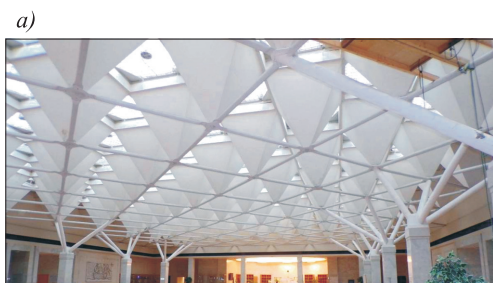


Рис. 7. Гибридное структурное покрытие с пирамидальными элементами со сталефибробетонными гранями и железобетонными основаниями, закрепленными к растянутому поясу. Вариант 2

a – покрытие в здании Российской национальной библиотеки в Санкт-Петербурге; *б* – BIM-модель гибридной конструкции покрытия

Fig. 7. Hybrid structural coating with pyramidal elements with steel-fiber concrete bases fixed to a stretched belt. Option 2

a – covering in the building of the Russian National Librari in St. Petersburg; *b* – BIM model of hybrid coating design

Таблица 3. Сравнение технико-экономических показателей вариантов конструктивного решения структурного покрытия площадью 1080 м²

Table 3. Comparison of technical and economic indicators of design options for a structural coating with an area of 1080 m²

Показатель	Сталефиброжелезобетонное структурное покрытие. Вариант 1	Гибридное структурное покрытие. Вариант 2 (100 %)	Экономия, %
Высота покрытия, м/%	1,0/47	2,12/100	-53
Расход материалов на 1 м ² бетон, м ³ /% сталь, т/%	0,107/110 0,02614/139	0,97/100 0,0231/100	10 13
Собственный вес на 1 м ² , кг/ м ² /%	245,7/106	235,8/100	6
Количество элементов на покрытие, шт.	917/233	394/100	133

В свою очередь, сталефибробетонное покрытие с регулярной структурой (вариант 1) можно применять в относительно невысоких помещениях административных и общественных зданий, а также в качестве конструкции перекрытия.

Список источников

1. *Родов Г.С.* Армоцементные конструкции для промышленных, сельскохозяйственных и гражданских зданий. Л.: Стройиздат, 1968. 159 с.
2. *Лысенко Е.Ф.* Армоцементные конструкции. 2-е изд. Киев: Выща шк., 1981. 189 с.
3. *Митрофанов Е.Н.* Армоцемент. Л.: Стройиздат, 1973. 208 с.
4. *Рабинович Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология и конструкции: Моногр. М.: Изд-во АСВ, 2011. 560 с.
5. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1987. 147 с.
6. *Гулимова Е.В.* Исследование коррозионной стойкости арматуры в сталефибробетоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1980. 23 с.
7. *Лобанов И.А.* Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов): Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1982. 34 с.
8. *Талантова К.В.* Строительные конструкции на основе сталефибробетона с заданными свойствами // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Докл. I Всерос. конф., 8–10 апр., 2008 г. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. С. 381–390.
9. *Талантова К.В.* Оптимизация расхода стальной фибры при проектировании конструкций на основе сталефибробетона // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 8. С. 99–106.

References

1. *Rodov G.S.* Reinforced cement structures for industrial, agricultural and civil buildings. Leningrad: Stroyizdat, 1968. 159 p. (In Russ.).
2. *Lysenko E.F.* Armored structures. Kiev: Vyshcha shkola, 1981. 189 p. (In Russ.).
3. *Mitrofanov E.N.* Armo cement. Leningrad: Stroyizdat, 1973. 208 p. (In Russ.).

4. *Rabinovich F.N.* Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology and construction: Monograph. Moscow, 2011. 560 p. (In Russ.).
5. Recommendations for the design and manufacture of steel fiber concrete structures. Moscow, 1987. 147 p. (In Russ.).
6. *Gulimova E.V.* Studies of the corrosion resistance of reinforcement in steel-fiber-reinforced concrete: Abstract. ... PhD. Leningrad, 1980. 23 p. (In Russ.).
7. *Lobanov I.A.* Fundamentals of the technology of dispersed-reinforced concrete (fiber-reinforced concrete): Abstract, ... DSc. Leningrad, 1982. 34 p. (In Russ.).
8. *Talantova K.V.* Building structures based on steel fiber concrete with desired properties. Problems of optimal design of structures: reports of the I All-Russian Conference. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2008. P. 381–390. (In Russ.).
9. *Talantova K.V.* Optimization of steel fiber consumption in the design of structures based on steel fiber reinforced concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2014; (8): 99–106. (In Russ.).

Информация об авторах

К.В. Талантова – доктор технических наук, доцент, talant_bar@mail.ru

А.С. Фисенко – студент

Information about the authors

K.V. Talantova – DSc, Ass. Professor, talant_bar@mail.ru

A.S. Fisenko – Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022
Одобрена после рецензирования 10.05.2022
Принята к публикации 16.05.2022

The article was submitted 11.04.2022
Approved after reviewing 10.05.2022
Accepted for publication 16.05.2022