



УДК 691.3:624.046

А. П. ПОМАЗОВ, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики, ассистент кафедры строительных конструкций

ПРОДОЛЬНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ НИЗКОМАРОЧНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТАЛЬНОЙ ОБОЙМЕ ПРИ ОБЪЕМНОМ АРМИРОВАНИИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96, +7 (915) 947-36-25; эл. почта: pomazov.a.p@yandex.ru

Ключевые слова: трубобетон, экспериментальные исследования, напряженно-деформированное состояние, малогабаритные сечения, осевое сжатие, фибробетон, объемное армирование, металлическая фибра.

Приводятся результаты испытаний неармированных низкомарочных искусственных каменных материалов в стальной обойме, показан вклад объемного армирования металлической фиброй и вклад стальной обоймы в работу конструкции. Представлены диаграммы продольного деформирования лабораторных образцов, приведены основные выводы по применению низкомарочных растворов в качестве основы для заполнения стальной оболочки трубобетонного стержня.

Трубобетонные конструкции вызывают особый интерес в современном строительстве [1], поскольку они удачно совмещают в себе наилучшие свойства как стальных, так и железобетонных конструкций. Однако применение таких композитных материалов вызывает определенные сложности в связи со слабой изученностью их действительной работы под нагрузкой как составного композитного материала [2]. В составе трубобетонной конструкции бетонный сердечник предотвращает местную потерю устойчивости и локальные деформации тонкостенной трубы, а труба ограничивает поперечные деформации бетона и создает эффект обоймы, вследствие чего возникает трехосное напряженное состояние, при котором бетон работает в запредельной области относительных деформаций. Полученная конструкция обладает высокой несущей способностью, значительно превосходящей несущие способности отдельно взятых трубы и сердечника, а также обладает повышенными демпфирующими свойствами [3, 4].

Что касается армирования сердечника, то установка гибкой арматуры в малогабаритных сечениях вызывает определенные проблемы, кроме того, в стесненном сечении арматурные стержни являются концентратором напряжений. Результаты исследований осевого сжатия железобетонных, а также армированных и неармированных трубобетонных стержней приведены в [4, 5], где показано, что стержневая арматура вносит определенный вклад в несущую способность сечения, однако, этот вклад несопоставим с увеличением металлоемкости и трудозатрат на изготовление армированного сердечника в составе композитной конструкции.

Альтернативным вариантом усиления каменного сердечника является объемное (дисперсное) армирование, представляющее собой распределенные по растворной или бетонной смеси волокна – фибру, в качестве которой может



использоваться металлическая стружка, являющаяся отходом промышленности. Таким образом, в составе конструкции образуется пространственный фиброкаркас с трехосной ориентацией фибры, обеспечивающий увеличение прочности, ударной вязкости, трещиностойкости и других не менее важных свойств бетона. По сравнению со стержневым армированием дисперсное армирование способствует снижению стоимости и трудоемкости изготовления конструкций, экономному использованию стали.

Фибробетоны используются как в монолитных, так и в сборных элементах конструкций, проявляя высокие эксплуатационные свойства и долговечность. Опыт применения дисперсно-армированных бетонов в строительстве, основные достоинства, особенности работы при статических и динамических нагрузках рассмотрены в [6, 7]. Экспериментально-теоретические исследования динамической прочности и высокоскоростной деформации мелкозернистых бетонов и фибробетонов освещены в монографии [8]. Поведение колонн из стальных труб, заполненных фибробетоном, при осевой и внецентренной нагрузке, а также их режимы разрушения изучены в статье зарубежных коллег [9].

Целью настоящего исследования является экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния каменного сердечника из низкомарочного раствора в стальной обойме и оценка вклада объемного армирования в несущую способность и деформативность композитного материала.

Для проведения исследования были изготовлены лабораторные образцы, состоящие из прямошовных электросварных стальных труб длиной 100 мм, диаметром 60 мм с толщиной стенки 2,0 мм, заполненных низкомарочным цементно-песчаным раствором без добавления фибры (подвижность ОК 8–10 см), а также с добавлением волнообразной металлической фибры толщиной 0,8 мм и длиной 40 мм (рис. 1а) из расчета 20 кг/м³. Для определения фактической прочности растворного камня на сжатие были изготовлены стандартные образцы-кубы со стороной 70,7 мм (рис. 1б).

Испытания образцов статической осевой сжимающей нагрузкой проводились в лаборатории непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений кафедры теории сооружений и технической механики при помощи универсальной испытательной машины УИМ-30 с максимальной нагрузкой 30 тонн. Для определения осевых деформаций по мере увеличения нагрузки использовался прогибомер, фиксирующий перемещения подвижной загружающей траверсы, для измерения нагрузки – силомер с аналоговым циферблатом.

Растворные кубики без объемного армирования металлической фиброй разрушались при средней нагрузке 0,95 тонн, что соответствует пределу прочности на осевое сжатие 1,93 МПа (рис. 1в). Разрушающая нагрузка для фиброрастворных кубов составила 1,67 тонн (3,39 МПа). Введение металлической фибры в состав растворной смеси увеличило прочность растворного камня в 1,76 раз.

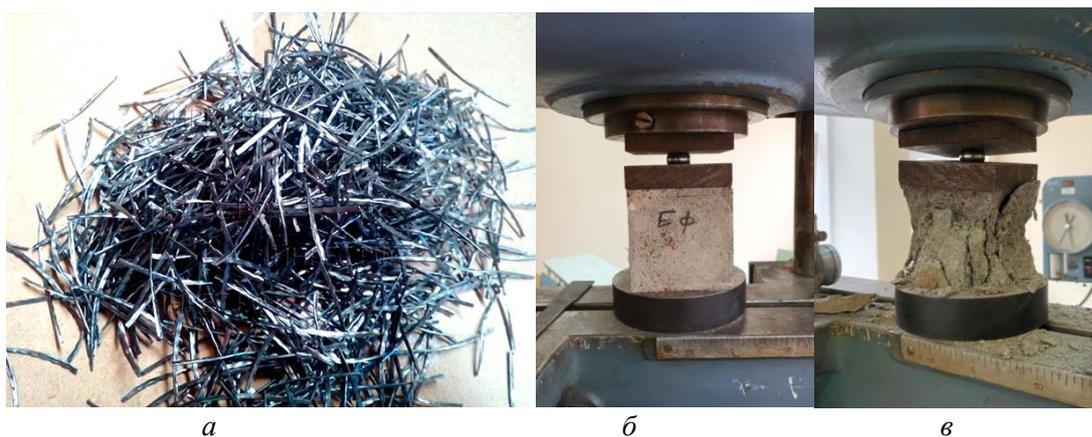


Рис. 1. Металлическая фибра для дисперсного армирования (а) и схема испытания стандартных растворных кубов (70,7×70,7×70,7) на сжатие (б), разрушенный образец-куб (в)

После определения прочности растворных кубиков, соответствующей дифференцированной прочности сердечника из растворного камня, были проведены испытания композитных трубообразных образцов, а также аналогичных трубофиброрастворных образцов. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.



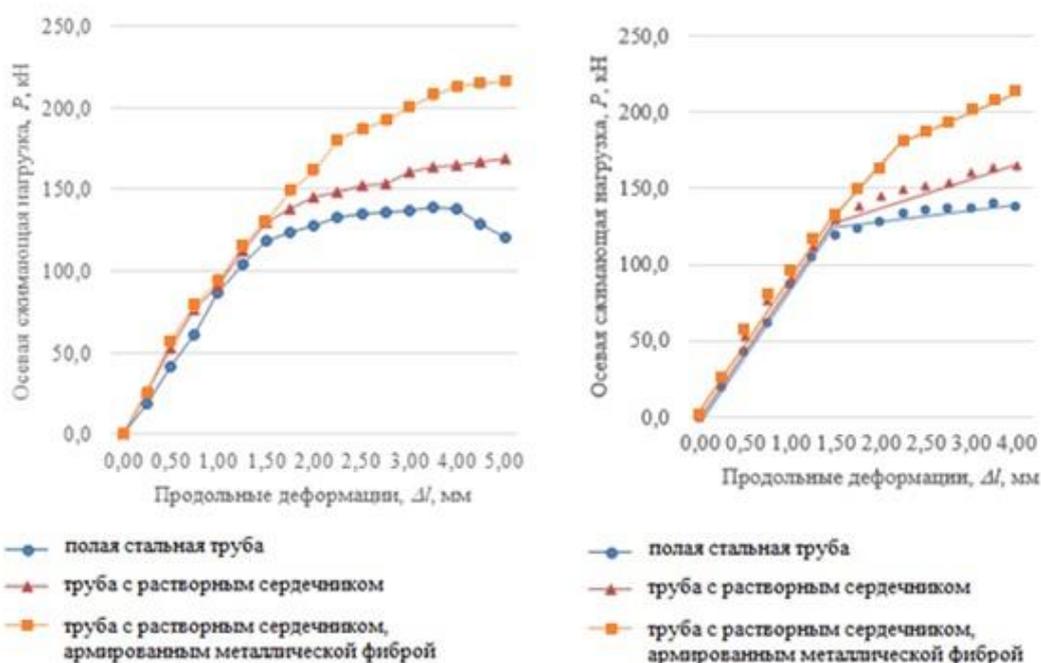
Рис. 2. Экспериментальная установка для испытаний лабораторных образцов осевой сжимающей нагрузкой при помощи универсальной испытательной машины УИМ-30

В таблице приведены значения осевой нагрузки, соответствующие продольным деформациям с определенным шагом дискретности. Под продольными деформациями здесь имеется в виду относительное перемещение торцов образца, т. е. действительные осевые деформации для составного стержня, которые измерялись путем регистрации сближения загрузающих пластин с помощью прогибомера. По результатам испытаний построены диаграммы

продольного деформирования (рис. 3а). Для наглядного сравнения и оценки вклада растворного сердечника в работу конструкции также были построены диаграммы зависимости нагрузки-деформации для полой стальной трубы $\varnothing 60 \times 2,0$ из стали 09Г2С.

Продольные деформации и соответствующие сжимающие нагрузки

Продольные деформации Δl , мм	Относительные продольные деформации $\varepsilon = \Delta l/l$	Осевая сжимающая нагрузка прессы, P , кН		
		полая труба	труба с сердечником из растворного камня	труба с сердечником из армированного растворного камня
0	0	0,0	0,0	0,0
0,50	0,005	41,8	52,8	56,8
1,00	0,01	86,8	90,8	94,7
1,50	0,015	118,6	129,7	131,3
2,00	0,02	127,6	145,1	162,1
2,50	0,025	135,1	152,2	187,4
3,00	0,03	136,9	160,9	201,1
3,50	0,035	139,3	164,3	207,8
4,00	0,04	138,2	165,2	213,4
4,50	0,045	129,0	166,8	215,3
5,00	0,05	120,6	168,8	216,7



а

б

Рис. 3. Диаграммы продольного деформирования полых труб и труб с неармированным и армированным металлической фиброй раствором сердечником, построенные по результатам эксперимента (а) и идеализированные линейаризованные диаграммы деформирования образцов (б)

Следует отметить, что составная конструкция работает в более широком спектре осевых деформаций, чем отдельно взятый растворный сердечник, для которого предельное значение относительной деформации составляет 0,002 при непродолжительном действии сжимающей нагрузки. Несущая способность сердечника из растворного камня диаметром 56 мм составляет 4,75 кН, а при объемном армировании – 8,35 кН. Из таблицы и рис. 3а также можно заметить, что прирост несущей способности композитного стержня по сравнению с полый трубой оказался значительно больше несущей способности сердечника.

При использовании в качестве сердечника бетона средних классов, в отличие от низкомарочных материалов, наблюдается не только увеличение прочности, но и значительное увеличение жесткости, причем на всех этапах деформирования (рис. 4) [10]. Образцы с сердечником из низкомарочных растворов на первых этапах при относительных деформациях до 0,015 (упругая стадия) ведут себя сравнительно одинаково, разветвление диаграмм становится очевидным лишь в пластической стадии, где композитный стержень выдерживает значительно большие нагрузки, которые неограниченно растут по сравнению с полый трубой. На рис. 3б приведена идеализированная диаграмма деформирования для исследуемых образцов.

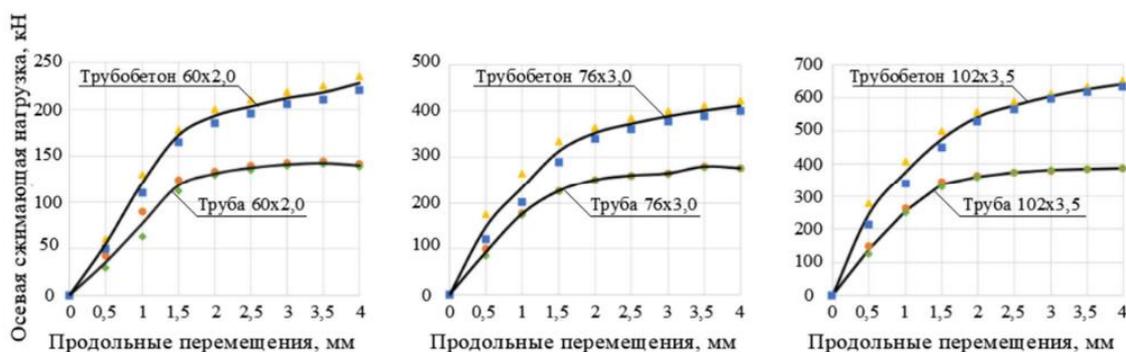


Рис. 4. Диаграммы продольного деформирования труботетонных стержней (сердечник из бетона класса В12,5) и стальных труб длиной 100 мм [4]

Из приведенных выше диаграмм (рис. 3) видно, что введение металлической фибры в растворную смесь для сердечника заметно увеличивает несущую способность конструкции. Однако по настоящему исследованию нельзя сделать выводы о количественном значении вклада объемного армирования в работу композитного элемента, поскольку эксперимент проводился с конкретной партией лабораторных образцов труб, заполненных определенным составом цементно-песчаного раствора с определенным видом фибры. В дальнейших исследованиях планируется определить зависимости для различных составов растворной смеси, объемной доли фибры в ней, вида и длины фиброволокон.

Также из проведенных экспериментальных исследований видно, что даже низкомарочные растворы (до М50), имеющие сравнительно невысокую дифференцированную прочность при затвердевании, оказывают значительный эффект на несущую способность композитного стержня, однако практически не добавляют трубе жесткости в отличие от более прочных заполнителей. Серьезным минусом труботетонных элементов является то, что сердечник из



растворного или бетонного камня существенно утяжеляет собственный вес конструкции, вследствие чего повышается нагрузка на фундамент. С целью устранения данного недостатка для уменьшения веса композитной конструкции имеет смысл в качестве сердечника использовать материалы на основе гипсового вяжущего, у которых сопротивление сжатию близко к прочности камня из низкомарочных растворов, а плотность составляет 1000 кг/м^3 , в то время как значения плотности для растворов и бетонов варьируются в пределах от 1800 кг/м^3 до 2500 кг/м^3 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Г. В. Чесноков, Е. С. Михалдыкин. – Текст : электронный // Наукоеведение : Интернет-журнал. – 2015. – Том 7, № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf>.
2. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Г. В. Чесноков, Е. С. Михалдыкин. – Текст : электронный // Наукоеведение : Интернет-журнал. – 2015. – Том 7, № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>.
3. Manikandan, K. V. Understandings on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube with Different Kinds of Concrete Infill / K. V. Manikandan, C. Umarani // Hindawi, Advances in Civil Engineering. – 2021. – Article 6645757. – URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
4. Хазов, П. А. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии / П. А. Хазов, А. П. Помазов. – Текст : непосредственный // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 2(37). – С. 77–86.
5. Ерофеев, В. И. Прочность и устойчивость композитных железобетонных и трубобетонных образцов при статическом нагружении / В. И. Ерофеев, П. А. Хазов, А. К. Ситникова. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 25 (2). – С. 141–153.
6. Окольников, Г. Э. Опыт применения дисперсно-армированных бетонов в строительной индустрии России / Г. Э. Окольников, А. Ю. Царева, С. С. Зуев // Системные технологии. – 2020. – № 34. – С. 48–52.
7. Поведение мелкозернистых фибробетонов при разных режимах механического нагружения / Д. А. Ламзин, М. Е. Гонов, А. М. Брагов, А. К. Ломунов. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2023. – № 81. – С. 97–109. – DOI: [10/17223/19988621/81/9](https://doi.org/10.17223/19988621/81/9).
8. Брагов, А. М. Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона : монография / А. М. Брагов, Л. А. Игумнов, А. К. Ломунов. – Нижний Новгород : ННГУ, 2015. – 269 с. – ISBN 978-5-91326-352-0. – Текст : непосредственный.
9. Research on Dynamic Response of Concrete-Filled Steel Tube Columns Confined with FRP under Blast Loading / Jing Dong, Junhai Zhao, Dongfang Zhang, Yingping Li // Hindawi, Shock and Vibration. – 2019. – Article ID, 8692310. – 18 p. – URL: <https://doi.org/10.1155/2019/8692310>.
10. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections (Экспериментальные и аналитические модели продольного деформирования трубобетонных образцов малогабаритных сечений) / Khazov P. A., Erofeev V. I., Nikitina E. A., Pomazov A. P. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2023. – Том 19, № 4. – С. 409-418.



POMAZOV Artyom Pavlovich, postgraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics, assistant of the chair of building structures

LONGITUDINAL DEFORMATION OF LOW-GRADE ARTIFICIAL STONE MATERIALS IN A STEEL CAGE WITH VOLUMETRIC REINFORCEMENT

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-96, +7 (915) 947-36-25; e-mail: pomazov.a.p@yandex.ru

Key works: concrete-filled steel tube, experimental research, stress-strain state, small-sized sections, axial compression, steel fiber-reinforced concrete, volumetric reinforcement, steel fiber.

The article presents the results of tests of non-reinforced low-grade artificial stone materials in a steel cage; the contribution of volumetric reinforcement with metallic fiber and the contribution of the steel cage to the behavior of the structure is shown. Diagrams of longitudinal deformation of laboratory samples are presented, the main conclusions on the use of low-grade solutions as a basis for filling the steel shell of a pipe-concrete rod are given.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. O probleme raschyota trubobetonnykh konstruksiy s obolochkoy iz raznykh materialov. Chast 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoy obolochkoy [On the problem of calculating pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 1. Experience in the use of tube concrete with a metal shell]. *Naukovedenie : Internet-zhurnal [Online Journal of Science Studies]*. 2015. Vol. 7. № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf>.

2. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. O probleme raschyota trubobetonnykh konstruksiy s obolochkoy iz raznykh materialov. Chast 2. Raschyot trubobetonnykh konstruksiy s metallicheskoy obolochkoy [On the problem of calculating pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of concrete filled steel tubes structures]. *Naukovedenie : Internet-zhurnal [Online Journal of Science Studies]*. 2015. Vol. 7. № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>.

3. Manikandan K. B., Umarani C. Understandings on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube with Different Kinds of Concrete Infill. *Advances in Civil Engineering*, 2021; 2021:6645757. <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.

4. Khazov P. A., Pomazov A. P. Prochnost i prodolny izgib trubobetonnykh sterzhney pri tsentralnom szhatii [Strength and longitudinal bending of pipe concrete rods under central compression]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii. [Magazine of Civil Engineering]* 2023. № 2(37). P. 77–86.

5. Erofeev V. I., Khazov P. A., Sitnikova A. K. Prochnost i ustoychivost kompozitnykh zhelezobetonnykh i trubobetonnykh obraztsov pri staticheskom nagruzhenii [Strength and stability of composite reinforced concrete and pipe concrete samples under static loading]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Journal of Construction and Architecture]*. 2023. № 25(2). P. 141–153.

6. Okolnikova G. E., Tsaryova A. Yu., Zuev S. S. Opyt primeneniya dispersno-armirovannykh betonov v stroitel'noy industrii Rossii [Experience in using dispersed-reinforced concrete in the construction industry of Russia]. *Sistemnye tekhnologii [System Technologies]*. 2020. № 34. P. 48–52.

7. Lamzin D. A., Gonov M. E., Bragov A. M., Lomunov A. K. Povedenie melkozernistykh fibrobetonov pri raznykh rezhimakh mekhanicheskogo nagruzheniya



[Response of fine-grained fiber-reinforced concrete under different mechanical loading conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 2023. № 81. P. 97–109. DOI: 10/17223/19988621/81/9.

8. Bragov A. M., Igumnov L. A., Lomunov A. K. Vysokoskorostnaya deformatsiya melkozernistogo betona i fibrobetona [High-speed deformation of fine-grained concrete and fiber concrete] : monografiya. Nizhny Novgorod, NNGU, 2015, 269 p. – ISBN 978-5-91326-352-0.

9. Jing Dong, Junhai Zhao, Dongfang Zhang, Yingping Li. Research on Dynamic Response of Concrete-Filled Steel Tube Columns Confined with FRP under Blast Loading // Hindawi, Shock and Vibration. 2019. Article ID, 8692310, 18 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/8692310>.

10. Khazov P. A., Erofeev V. I., Nikitina E. A., Pomazov A. P. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2023. Vol. 19, № 4. P. 409–418

© **А. П. Помазов, 2023**

Получено: 30.09.2023 г.