

УДК 624.046

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-2-312-322

ТРЕХОСНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2023 г.

Хазов П.А.

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

khazov.nngasu@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023

С помощью экспериментального моделирования рассматриваются эффекты, возникающие при переходе бетона в сложное напряженное состояние, которое образуется в результате ограничения поперечных деформаций за счет стальной оболочки. Исследования проводились на трубобетонных образцах трех типоразмеров, а также на дифференцированных образцах из чистого бетона и стальной трубы. Приводятся диаграммы работы образцов при продольном сжатии и их сравнение. Применение трубобетонных конструкций оказывается весьма эффективным не только за счет насыщения материалом несущей конструкции, но и за счет взаимного влияния составляющих конструкции друг на друга. Приводятся количественная оценка и качественное обоснование повышения эффективности работы бетонного сердечника в составе трубобетонного элемента. Показано, что прирост несущей способности образца за счет усиления простой трубы бетоном в несколько раз превышает дифференцированную несущую способность бетонного ядра. Эффекты, возникающие в бетоне под влиянием стальной оболочки, создают трехосное напряженное состояние, что позволяет многократно увеличить несущую способность любого хрупкого материала. Этот факт позволяет считать трубобетонные конструкции композитными с нелинейным приростом прочности за счет совместной работы составляющих системы. Переход трубобетонных образцов в пластическое состояние происходит при тех же значениях продольной деформации, что и у полых стальных труб, но при больших значениях нагрузки. Показано, что бетон в условиях такого напряженного состояния ведет себя как аморфный материал, не разрушается на всех этапах деформирования, а также в нем практически отсутствуют процессы зарождения и распространения трещин.

Ключевые слова: трубобетон, критерии прочности, трехосное сжатие бетона, сложное напряженно-деформированное состояние, эффективность трубобетона, несущая способность.

Введение

Природа разрушения бетонных образцов при осевом сжатии заключается в постепенном откалывании материала с поверхности в направлениях, перпендикулярных нагрузке, как при статическом [1, 2], так и при динамическом воздействии [3–9] (рис. 1а). Наиболее простой способ увеличить несущую способность заключается

в ограничении подвижности материала в радиальном направлении, что приводит к эффекту обоймы [7], а бетон переходит в не одноосное (двух-, трехосное) напряженное состояние (рис. 1б).



Рис. 1. Бетонный образец в условиях осевого сжатия (а), принцип возникновения трехосного сжатия в трубобетонном образце (б)

Сложное напряженное состояние может возникать в целом ряде конструкций сложной конфигурации, в массивных железобетонных конструкциях [10–13], трубобетонных колоннах [7, 14–32]. Работа бетона, находящегося в условиях трехосного сжатия, значительно отличается от работы при осевом сжатии. В первую очередь практически отсутствует хрупкое разрушение материала, а его пластические свойства выходят на первый план. Критерии прочности бетона заметно усложняются в зависимости от типа сложного напряженного состояния, соотношения главных напряжений и их знака. Разработке этих критериев посвящено большое количество публикаций [10–13, 33–36].

Рассматривая работу бетона в составе трубобетонных колонн, можно отметить, что трехосное напряженное состояние создается в нем за счет наличия трубы-оболочки, ограничивающей поперечное деформирование (по Пуассону) и потенциальное разрушение в этом направлении (см. рис. 1б). Создание такого напряженного состояния не требует особых способов приложения нагрузки [7, 36–39].

Подготовка к испытаниям

Будем называть далее дифференцированной несущей способностью образца несущую способность отдельных составляющих трубобетонного образца, например, полый трубы или бетонного цилиндра, геометрически совпадающего с сердечником; интегрированной несущей способностью – несущую способность композитного трубобетонного образца.

В статье [1] показано, что интегрированная несущая способность всех составляющих трубобетонного образца значительно превосходит соответствующие дифференцированные значения, что делает трубобетон эффективной композитной конструкцией.

Количественный вклад бетона при его переходе к трехосному сжатию в составе трубобетонных образцов получен в серии испытаний, проводимых в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. Для проведения испытаний были изготовлены 3 типоразмера образцов длиной 100 мм (рис. 2а), а также образцы бетона и полый трубы, необходимые для определения дифференциальной несущей способ-

ности. На рис. 2б обозначено: 1 – испытуемый образец; 2 – подвижная загружающая пластина; 3 – неподвижная загружающая пластина; 4 – индикатор для регистрации сближения пластин. Эксперименты проводились с применением пресса П-125 с максимальной сжимающей нагрузкой 1250 кН.

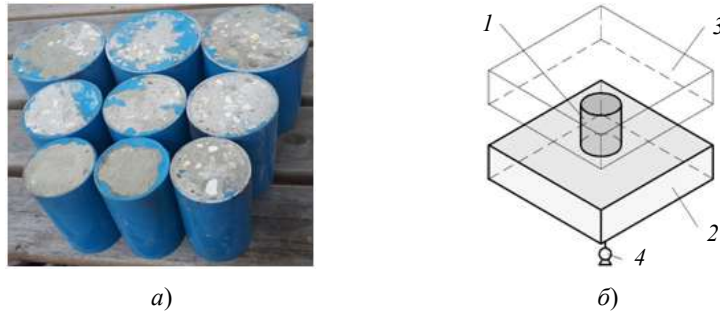


Рис. 2. Образцы для испытаний (а) и принципиальная схема экспериментальной установки (б)

Насыщение образцов бетонной смесью проводилось с избытком 5–10 мм, затем выполнялась торцовка алмазным диском и напильником. Покраска боковой поверхности образцов выполнялась с целью визуального отслеживания возникающих поперечных деформаций.

Результаты исследования

На рис. 3 приводятся диаграммы деформирования трубобетонных образцов и их сравнение с дифференцированными диаграммами для стальной трубы.

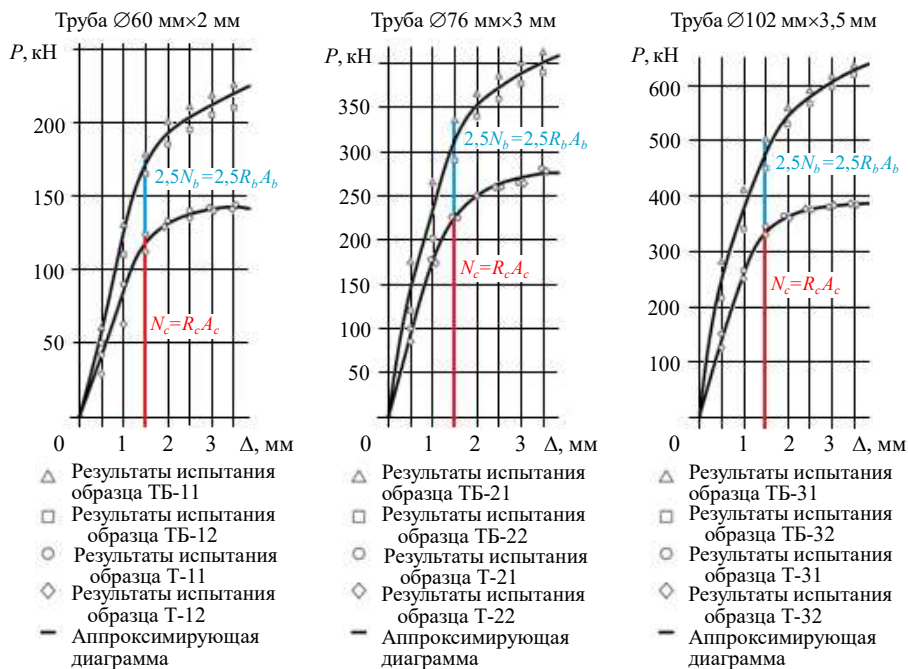


Рис. 3. Диаграммы продольного деформирования образцов, P – текущая нагрузка, Δ – сближение торцов образца

Прирост несущей способности для трубобетонного образца во всех случаях в 2,5 раза превышает дифференцированную несущую способность бетонного сердечника, что позволяет упростить предложенную в [19] формулу

$$N_{tb} = (cR_b + d)A_b + \alpha R_c A_c, \quad (1)$$

выражая полную несущую способность как

$$N_{tb} = 2,5R_b A_b + R_c A_c, \quad (2)$$

где N_{tb} – интегрированная несущая способность трубобетонного образца; R_b, R_c – расчетные сопротивления бетона и стали; A_b, A_c – площади поперечных сечений бетонного сердечника и материала трубы; c, d – константы, учитывающие упрочнение бетона за счет эффекта обоймы; α – коэффициент, учитывающий упрочнение трубы, связанный с ограниченной потерей местной устойчивости. Формула (2) может быть представлена в виде:

$$N_{tb} = 2,5N_b + N_c, \quad (3)$$

где $N_c = R_c A_c$ – дифференцированная несущая способность стальной трубы, $N_b = R_b A_b$ – дифференцированная несущая способность бетонного сердечника.

Как было сказано ранее, для определения дифференцированной несущей способности и расчетного сопротивления стали и бетона были изготовлены дополнительные образцы (6 стальных и 6 бетонных образцов). Значения расчетных сопротивлений, полученные в результате экспериментов и их обработки, составили $R_c = 319,8$ МПа, $R_b = 10,46$ МПа.

В таблице 1 приводится сравнение результатов испытаний с результатами, полученными по формуле (3).

Таблица 1

Размеры трубы, мм	Дифференцированная несущая способность, кН		Интегрированная несущая способность трубобетонного образца N_{tb} , кН		
	Стальная труба, $N_c = R_c A_c$	Бетонный сердечник, $N_b = R_b A_b$	По формуле (3)	По результатам экспериментов	Расхождение
Ø60×2	116,41	25,79	180,89	178,50	1,3%
Ø76×3	220,02	40,30	320,77	335,00	4,2%
Ø102×3,5	346,34	75,7	535,59	512,00	4,4%

Площадь сечения сердечника A_b определялась по внутреннему диаметру трубы.

Анализ диаграммы (см. рис. 3) показывает, что добиться падения нагрузки не удалось ни в одном случае, несмотря на явно критические деформации образцов (рис. 4).

После испытаний все образцы были вскрыты путем роспуска стальной оболочки (рис. 5). Вне зависимости от итоговой продольной деформации (длина испытанных образцов составляла от 40 до 70 мм, до испытания – 100 мм (см. рис. 4)) бетон не разрушился, как этого можно ожидать от хрупкого материала. Как и предполагалось, в условиях трехосного сжатия свойства бетона кардинально изменились, в отличие от хрупкого разрушения при осевом сжатии (см. рис. 1), в составе трубобетонного образца бетон ведет себя как аморфный материал, способный практически безгранично деформироваться, заметно изменяя форму (см. рис. 5). По выделенному на рисунке фрагменту можно заметить полное отсутствие трещин.

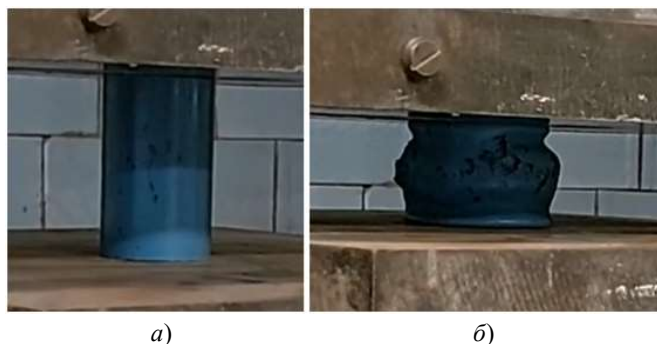


Рис. 4. Внешний вид образца перед началом (а) и после (б) испытаний



Рис. 5. Вскрытый образец после испытаний

Выводы

Анализируя результаты исследований, можно сделать следующие основные выводы.

Использование бетона при одноосном сжатии не устраняет главный недостаток каменных конструкций – их хрупкость. Переход к сложному напряженному состоянию позволяет увеличить потенциальную несущую способность бетона в несколько раз.

Показано принципиальное отличие деформирования бетона в приводимых условиях – аморфный характер поведения образца напоминает вязкое течение абсолютно пластических материалов, таких, как применяемый в строительной практике битум. Такие эффекты нивелируют основные недостатки каменных (и, в частности, бетонных) материалов, при этом сохраняя основные полезные качества, например, способность сопротивляться резонансным эффектам.

Переход трубобетонного образца в пластическое состояние (условная потеря несущей способности), наблюдаемый по диаграммам (см. рис. 3), происходит при одинаковых значениях продольной деформации (порядка 0,015), причем как у полых стальных образцов, так и у трубобетонных. Это означает, что потеря несущей способности обусловлена, в первую очередь, состоянием трубы, бетон играет лишь «поддерживающую» функцию, находясь при этом в запредельном состоянии. По достижении трубой критических значений деформации она переходит в пластическое состояние, что происходит и со всем образцом.

Список литературы

1. Хазов П.А., Ерофеев В.И., Лобов Д.М., Ситникова А.К., Помазов А.П. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений. *Приволжский научный журнал*. 2022. Т. 3. №63. С. 36–43.
2. Хазов П.А., Ерофеев В.И., Лобов Д.М., Помазов А.П., Ситникова А.К. Экспериментальное исследование расчетных длин и коэффициентов продольного изгиба композитных трубобетонных образцов. *Приволжский научный журнал*. 2022. Т. 4. №64. С. 16–26.
3. Гонов М.Е. Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №1. С. 130–148. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148>.
4. Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 442–457. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457>.
5. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Materials Physics and Mechanics*. 2021. Vol. 47. No 6. P. 962–967. DOI: 10.18149/MPM.4762021_14.
6. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali B.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates. *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol. 108. P. 71–80. DOI: 10.1007/978-3-030-13307-8_5. DOI: 10.1007/978-3-030-13307-8_5.
7. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Баландин В.В. Оценка радиальной деформации образца на основе теоретико-экспериментального анализа методики динамических испытаний материалов в жесткой обойме. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 378–387. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-4-378-387>.
8. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении. *Приволжский научный журнал*. 2014. №4 (32). С. 11–21.
9. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Смирнов И.В. Экспериментально-теоретическое исследование динамического деформирования и разрушения фибробетона. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. №4. С. 57–63.
10. Карпенко Н.И. *Общие модели механики железобетона*. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
11. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Определение прочности и ориентации площадок разрушения при различных видах объемного напряженного состояния. *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2015. Т. 11. №4. С. 52–61.
12. Марков И.П., Константинов А.Ю. Динамические испытания объемно-сжимаемого композиционного материала. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №3. С. 409–417. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-3-409-417>.
13. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Сравнительный анализ теорий пластичности при сложном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №4. С. 493–510. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-4-493-510.
14. Кришан А.Л., Римшин В.И., Рахманов В.А. и др. Несущая способность коротких трубобетонных колонн круглого сечения. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 4(370). С. 220–225.
15. Кришан А.Л., Гареев М.Ш., Мухаметова Ф.И., Ситина Ю.А. Результаты исследования НДС сжатых трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №4. С. 74–77.
16. Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов. *Бетон и железобетон*. 2008. №2. С. 22–25.
17. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2009. №4. С. 75–80.
18. Кришан А.Л., Суровцев М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1(21). С. 90–92.

19. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона. *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12 (Ч. 3). С. 580–583.
20. Lehman D.E., Kuder K.G., Gunnarson A.K., Roeder C.W., Berman J.W. Circular concrete-filled tubes for improved sustainability and seismic resilience. *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141. Iss. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001103](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001103).
21. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
22. Lu Y., Li N., Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114>.
23. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 77. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.015>.
24. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural behaviour of axially loaded concrete-filled steel tube columns during the top-down construction method. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. P. 3771-1–3771-15. <https://doi.org/10.3390/app12083771>.
25. 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. Vol. 2021. P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
26. Wang J., Sun Q., Li J. Experimental study on seismic behavior of high-strength circular concrete-filled thin-walled steel tubular columns. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 182. P. 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.098>.
27. Prasanta K., Arun C.B., Konjengbam D.S. Experimental investigation of partially confined concrete-filled steel tubular square columns under lateral cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 201. Article No 107751. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107751>.
28. Zhang T., Gong Y.Z., Ding F.X., Liu X.M., Yu Z.W. Experimental and numerical investigation on the behavior of concrete-filled rectangular steel tubes under bending. *Structural Engineering and Mechanics*. 2021. Vol. 78. No 3. P. 231–253. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.78.3.231>.
29. Terry P.J., Bradford M.A., Gilbert R.I. Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes. *International Symposium on Tubular Structures*. Melbourne, Australia. 14–16 Dec. 1994. P. 293–298.
30. Tran V.L., Thai D.K., Nguyen D.D. Practical artificial neural network tool for predicting the axial compression capacity of circular concrete-filled steel tube columns with ultra-high-strength concrete. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 151. Article No 106720. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106720>.
31. Lai M.H., Ho J.C.M. A theoretical axial stress-strain model for circular concrete-filled-steel-tube columns. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 125. P. 124–143. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.048>.
32. Wang Z.B., Tao Z., Han L.H., Uy B., Lam D., Kang W.H. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 135. P. 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.049>.
33. Карпенко Н.И., Корсун В.И., Карпенко С.Н., Анущенко А.М. Критерий прочности бетона при трехосном сжатии. *Приволжский научный журнал*. 2022. Т. 4. С. 8–16.
34. Korsun V., Kalmykov Yu., Niedoriezov A., Korsun A. The influence of the initial concrete strength on its deformation under triaxial compression. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. P. 959–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.190>.
35. *Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неоднородных напряженных состояниях*. М.: НИИЖБ, 1985. 72 с.
36. Корсун В.И., Недорезов А.В., Макаренко С.Ю. Сопоставительный анализ критериев прочности бетона. *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2014. Т. 10. №1. С. 65–78.
37. Geel van H.J.G.M. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research. *PhD Thesis*. Eindhoven, Netherlands. 1998. 178 p. <https://doi.org/10.6100/IR515170>.

38. He Z., Song Y. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. Iss. 1. P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.024>.

39. Sovjak R., Vogel F., Beckmann B. Triaxial compressive strength of ultra high performance concrete. *Acta Polytechnica*. 2013. Vol. 53. Iss. 6. P. 901–905. <https://doi.org/10.14311/AP.2013.53.0901>.

References

1. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lobov D.M., Sitnikova A.K., Pomazov A.P. Eksperimentalnoe issledovanie prochnosti kompozitnykh trubobetonnykh obraztsov malogabaritnykh secheniy [The experimental research of the strength of composite steel tube confined concrete samples of small-sized sections]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]*. 2022. Vol. 3 Iss. 63. P. 36–43. (In Russian).

2. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lobov D.M., Pomazov A.P., Sitnikova A.K. Eksperimentalnoe issledovanie raschetnykh dlin i koeffitsientov prodolnogo izgiba kompozitnykh trubobetonnykh obraztsov [Experimental study of reduced lengths and longitudinal bending coefficients of composite concrete-filled steel tube samples]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]*. 2022. Vol. 4. Iss. 64. P. 16–24. (In Russian).

3. Gonov M.E. Mekhanicheskie svoystva fibrobetonov pri dinamicheskom szhatii [Mechanical properties of fiber-reinforced concrete under dynamic compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2022. Vol. 84. Iss. 1. P. 130–148 (In Russian).

4. Gonov M.E. Kompleksnoe issledovanie svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom rastyazhenii i sreze [Comprehensive study of the properties of fine-grained concrete under dynamic tension and shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. Iss. 4. P. 442–457 (In Russian).

5. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Mater. Phys. Mech*. 2021. Vol. 47. No 6. P. 962–967. DOI: 10.18149/MPM.4762021_14.

6. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali B.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates. *Adv. Struct. Mater*. 2019. Vol. 108. P. 71–80. DOI: 10.1007/978-3-030-13307-8_5. DOI: 10.1007/978-3-030-13307-8_5.

7. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Balandin V.V. Otsenka radialnoy deformatsii obraztsa na osnove teoretiko-eksperimentalnogo analiza metodiki dinamicheskikh ispytaniy materialov v zhestkoy oboyme [Evaluation of radial deformation of a sample based on theoretical and experimental analysis of the methodology of dynamic testing of materials in a rigid cage]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 4. P. 378–387. (In Russian)

8. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Lamzin D.A. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom nagruzhении [Study of the mechanical properties of fine-grained concrete under dynamic loading]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]*. 2014. No 4 (32). P. 11–21. (In Russian)

9. Bragov A.M., Karikhaloo B.L., Petrov Yu.V., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Smirnov I.V. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya fibrobetona [Experimental and theoretical study of dynamic deformation and destruction of fiber concrete]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of Material]*. 2014. Vol. 80. No 4. P. 57–63. (In Russian)

10. Karpenko N.I. *Obschie modeli mekhaniki zhelezobetona [General Models of Reinforced Concrete Mechanics]*. Moscow. Stroyizdat Publ. 1996. 416 p. (In Russian).

11. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Opredelenie prochnosti i orientatsii ploschadok razrusheniya pri razlichnykh vidakh obyomnogo napryazhyonnogo sostoyaniya [Determination of the strength and orientation of destruction concretes surfaces for different types of bulk stress state]. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitelnykh konstruksiy [International Journal for Computational Civil and Structural Engineering]*. 2015. Vol. 11. Iss. 4. P. 52–61 (In Russian).

12. Markov I.P., Konstantinov A.Yu. Dinamicheskie ispytaniya obemno-szhimaemogo kompozitsionnogo materiala [Dynamic testing of volumetric compressible composite material]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 3. P. 409–417 (In Russian).
13. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Yu. Sravnitelnyy analiz teorii plastichnosti pri slozhnom nagruzhenii [Comparative analysis of plasticity theories under complex loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2022. Vol. 84. No 4. P. 493–510 (In Russian).
14. Krishan A.L., Rimshin V.I., Rakhmanov V.A. et al. Nesushchaya sposobnost korotkikh trubobetonnykh kolonn kruglogo secheniya [Bearing capacity of short concrete filled steel tube columns of circular cross-section]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*. 2017. No 4(370). P. 220–225 (In Russian).
15. Krishan A.L., Gareev M.Sh., Mukhametova F.I., Sitina Yu.A. Rezultaty issledovaniya NDS szhatykh trubobetonnykh elementov s predvaritelno obzhatym yadrom [The results of the study of the stress-strain state of compressed pipe-concrete elements with a pre-compressed core]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2005. Iss. 4. P. 74–77 (In Russian).
16. Krishan A.L., Zaikin A.I., Kupfer M.S. Opredelenie razrushayushchey nagruzki szhatykh trubobetonnykh elementov [Determination of the breaking load of compressed pipe concrete elements]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*. 2008. No 2(551). P. 22–25 (In Russian).
17. Krishan A.L. Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [The concrete-filled steel tube columns for high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktiv i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*. 2009. No 4. P. 75–80 (In Russian).
18. Krishan A.L., Surovtsev M.M. Eksperimentalnye issledovaniya prochnosti gibkikh trubobetonnykh kolonn [Experimental researches of strength of flexible concrete-filled tube (CFT) columns]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2013. No 1. P. 90–92 (In Russian).
19. Nesvetaev G.V., Rezvan I.V. Otsenka prochnosti trubobetona [Resistibility evaluation of the composite columns]. *Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental Research]*. 2011. No 12 (Pt. 3). P. 580–583 (In Russian).
20. Lehman D.E., Kuder K.G., Gunnarsson A.K., Roeder C.W., Berman J.W. Circular concrete-filled tubes for improved sustainability and seismic resilience. *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141. Iss. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001103](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001103).
21. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 2018. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
22. Lu Y., Li N., Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Constr. Build. Mater.* 2015. Vol. 95. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114>.
23. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin Wall. Struct.* 2014. Vol. 77. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.015>.
24. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural behaviour of axially loaded concrete-filled steel tube columns during the top-down construction method. *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12. Iss. 8. P. 3771-1–3771-15. <https://doi.org/10.3390/app12083771>.
25. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the performance of concrete-filled steel tube with different kinds of concrete infill. *Adv. Civ. Eng.* 2021. Vol. 2021. P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
26. Wang J., Sun Q., Li J. Experimental study on seismic behavior of high-strength circular concrete-filled thin-walled steel tubular columns. *Eng. Struct.* 2019. Vol. 182. P. 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.098>.
27. Prasanta K., Arun C.B., Konjengbam D.S. Experimental investigation of partially confined concrete-filled steel tubular square columns under lateral cyclic loading. *J. Constr. Steel Resh.* 2023. Vol. 201. Article No 107751. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107751>.

28. Zhang T., Gong Y.Z., Ding F.X., Liu X.M., Yu Z.W. Experimental and numerical investigation on the behavior of concrete-filled rectangular steel tubes under bending. *Struct. Eng. Mech.* 2021. Vol. 78. No 3. P. 231–253. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.78.3.231>.
29. Terry P.J., Bradford M.A., Gilbert R.I. Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes. *International Symposium on Tubular Structures*. Melbourne, Australia. 14–16 Dec. 1994. P. 293–298.
30. Tran V.L., Thai D.K., Nguyen D.D. Practical artificial neural network tool for predicting the axial compression capacity of circular concrete-filled steel tube columns with ultra-high-strength concrete. *Thin Wall. Struct.* 2020. Vol. 151. Article No 106720. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106720>.
31. Lai M.H., Ho J.C.M. A theoretical axial stress-strain model for circular concrete-filled-steel-tube columns. *Eng. Struct.* 2016. Vol. 125. P. 124–143. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.048>.
32. Wang Z.B., Tao Z., Han L.H., Uy B., Lam D., Kang W.H. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression. *Eng. Struct.* 2017. Vol. 135. P. 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.049>.
33. Karpenko N.I., Korsun V.I., Karpenko S.N., Anushchenko A.M. Kriteriy prochnosti betona pri trekhosnom szhatii [Strength criterion of concrete under triaxial compression]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]*. 2022. Vol. 4. P. 8–16 (In Russian).
34. Korsun V., Kalmykov Yu., Niedoriezov A., Korsun A. The influence of the initial concrete strength on its deformation under triaxial compression. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. P. 959–969. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.190>.
35. *Rekomendatsii po opredeleniyu prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik betona pri neodnoosnykh napryazhennykh sostoyaniyakh [Recommendations for Determining Strength and Deformation Characteristics of Concrete Under Non-Axial Stress Conditions]*. Moscow. NIIZhB Publ. 1985. 72 p. (In Russian).
36. Korsun V.I., Nedorezov A.V., Makarenko S.Yu. Sopostavitelnyy analiz kriteriev prochnosti betona [Comparative analysis of the strength criteria for concrete]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Modern Industrial and Civil Construction]*. 2014. Vol. 10. No 1. P. 65–78 (In Russian).
37. Geel van H.J.G.M. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research. *PhD Thesis*. Eindhoven, Netherlands. 1998. 178 p. <https://doi.org/10.6100/IR515170>.
38. He Z., Song Y. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures. *Cem. Concr. Res.* 2010. Vol. 40. Iss. 1. P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.024>.
39. Sovjak R., Vogel F., Beckmann B. Triaxial compressive strength of ultra high performance concrete. *Acta Polytech.* 2013. Vol. 53. Iss. 6. P. 901–905. <https://doi.org/10.14311/AP.2013.53.0901>.

TRIAxIAL STRESS STATE OF CONCRETE UNDER LONGITUDINAL DEFORMATION OF TUBE-CONCRETE SAMPLES

Khazov P.A.

*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

khazov.nngasu@mail.ru

Received by the Editor 2023/02/13

The effects that occur during the transition of concrete to a complex stress state, resulting from the limitation of transverse deformations due to the steel shell, are considered using experimental modeling. The studies were carried out on CFST samples of three standard sizes, as well as on differentiated samples of pure concrete and steel tube. Diagrams of work of samples under longitudinal compression and their comparison are given. The use of CFST structures turns out to be very effective not only as a result of saturation of the supporting structure with material, but due

to the mutual influence of the components of the structure on each other. A quantitative assessment and a qualitative justification for increasing the efficiency of the concrete core as part of a CFST element are given. It is shown that the increase in the bearing capacity of the sample due to the reinforcement of a simple tube with concrete is several times higher than the differentiated bearing capacity of the concrete core. This fact makes it possible to consider CFST structures as composite ones with a non-linear increase in strength due to the joint work of the system components. The transition of specimens to the plastic state of tube-concrete specimens occurs at the same values of longitudinal deformation as for hollow steel tubes, but at high load values. The effects that occur in concrete under the influence of a steel shell create a triaxial stress state, which makes it possible to multiply the bearing capacity of any brittle material. It is shown that concrete under conditions of such a stressed state behaves rather like an amorphous material, does not collapse at all stages of deformation, and there are practically no processes of crack initiation and its propagation in concrete.

Keywords: pipe concrete, strength criteria, triaxial compression of concrete, complex stress-strain state, efficiency of pipe concrete, load bearing capacity.