

УДК 624.046

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК С ЛОКАЛЬНЫМ СМЯТИЕМ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

© 2024 г.

**Хазов П.А., Ведяйкина О.И.,
Помазов А.П., Кожанов Д.А.**

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

khazov.nngasu@mail.ru

Поступила в редакцию 10.11.2023

Приведены результаты экспериментального моделирования упругопластического деформирования изгибаемых массивных трубобетонных балок при трехточечном изгибе. Показано, что местные деформации и локальное смятие в подобных конструкциях оказывают значительное влияние на их работу. Проведен анализ применимости теории изгиба полый стальной балки по модели Бернулли. Выполнено сравнение несущей способности и напряженно-деформированного состояния полых стальных труб (по модели Бернулли и по результатам экспериментов) и трубобетонных балок, количественно оценен вклад бетонного сердечника в сопротивление изгибу при упругопластическом деформировании. Реальная несущая способность полый трубы при трехточечном изгибе не превышает 50% от расчетной, определенной теоретически, что говорит о невозможности применения классической модели изгиба при конструировании систем такого рода. Трубобетонная балка при этом не только обеспечивает полноценную работу металла в процессе деформирования, препятствуя его смятию, но и дает некоторый прирост несущей способности за счет включения в работу бетона сжатой зоны. Увеличение несущей способности балки за счет введения бетонного сердечника может достигать 70%. Несмотря на значительное утяжеление, изгибаемые трубобетонные стержни могут быть рекомендованы в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, при котором помимо поперечных изгибающих нагрузок возникают значительные продольные усилия, а также локальные силовые факторы, способствующие возникновению местных деформаций смятия, поскольку в отличие от тонкостенной полый трубы бетонный сердечник существенно препятствует таким воздействиям. По результатам исследования доказана потенциальная эффективность изгибаемых трубобетонных элементов для ряда конструкций.

Ключевые слова: трубобетон, трехточечный изгиб, модель Бернулли, теория изгиба балок, упругопластическое деформирование, трехосное сжатие бетона, сложное напряженно-деформированное состояние, эффективность трубобетона, несущая способность.

Введение

Сталебетонные стержни в последние десятилетия вызывают повышенный интерес отечественных [1–10] и зарубежных ученых [11–23], поскольку позволяют наиболее полно сочетать основные преимущества, свойственные как металлам, так и бетонам, при этом нивелируя или полностью устраняя их недостатки [2, 3, 10]. Так, стальные конструкции являются весьма прочными, но, в силу хороших упругих свойств, практически не демпфируют механическую энергию, что делает затруднительным их применение в условиях колебаний и вибраций и требует использования специальных систем вибро- и сейсмозащиты [11]. В свою очередь железобетонные элементы при соразмерной несущей способности являются гораздо более массивными, плохо сопротивляются накоплению повреждений, зарождению и развитию трещин. Применение сталебетонных элементов, образованных путем заключения железобетона или бетона в стальную обойму, также приводит к нелинейному приросту несущей способности за счет перехода сердечника в трехосное напряженное состояние [1, 4–10, 24–27]. Вопросы, связанные с деформированием и разрушением бетонов повышенной прочности при объемном сжатии [28, 29], в том числе при термомеханическом нагружении [30], в последние годы являются весьма актуальными.

К настоящему времени проведено много экспериментальных и численных исследований по изучению прочности и устойчивости трубобетонных конструкций (ТБК) при центральном и внецентренном сжатии [1–3, 5–7, 9, 10]. Однако работа при изгибе подобных стержней остается малоизученной. Основная причина этого – нерациональность применения ТБК в качестве несущего изгибаемого элемента – трубобетонной балки (ТББ) – в силу малого увеличения несущей способности при значительном утяжелении. Тем не менее в реальных условиях эксплуатации [8] практически невозможно выделить чисто сжатый элемент, а для анализа сжато-изогнутых элементов необходимо детальное изучение работы при чистом и поперечном изгибе стержней различной гибкости. Особый интерес вызывает изгиб массивных ТББ, характерный размер поперечного сечения которых составляет порядка 10% от длины, поскольку в таких элементах не всегда возможно применить классические модели балок Бернулли или Тимошенко. В первую очередь это обусловлено тем, что затруднительным становится распределение внутренних усилий на элементарные составляющие – момент и поперечную силу, а переход от усилий к напряжениям усложняется «композитностью» и внутренней статической неопределенностью сталебетонного сечения [1–3].

В условиях трехточечного изгиба в ТББ возникают значительные местные напряжения, приводящие, помимо общего искривления, к локальному деформированию в силовых точках (рис. 1).

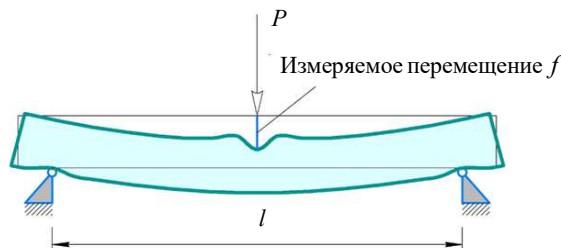


Рис. 1. Деформации образца ТБК в условиях трехточечного изгиба

Проведение экспериментальных исследований в этом случае является наиболее рациональным для оценки общего напряженно-деформированного состояния массивной ТББ при изгибе с локальным смятием.

В статье [31] рассматривается изгиб ТББ с применением балочной теории Бернулли и определяется эквивалентная изгибная жесткость. Основным недостатком исследования является идеализация и предположение о преобладании нормальных напряжений (изгибная модель балки Бернулли), что является весьма грубым приближением в силу обозначенных выше факторов.

Материалы и методы исследования

Для анализа напряженно-деформированного состояния проводилось экспериментальное и численное моделирование при трехточечном изгибе, для чего были изготовлены образцы ТББ длиной 700 мм с применением стальных труб с поперечными сечениями $\varnothing 76 \times 3$ и $\varnothing 102 \times 3,5$ мм марки 09Г2С. В качестве сердечника использовался мелкозернистый бетон класса В12.5. Марки и характеристики составляющих ТББ подтверждены испытаниями контрольных образцов на сжатие [2, 3].

На рис. 2 показана экспериментальная установка, где обозначено: 1 – исследуемый образец, 2 – подвижная грузовая траверса, 3 – статичная траверса, 4 – индикатор перемещений часового типа. В эксперименте принимался пролет длиной 600 мм, отношение длины l пролета к поперечному размеру образца D таково: $l/D = 7,89; 5,88$.

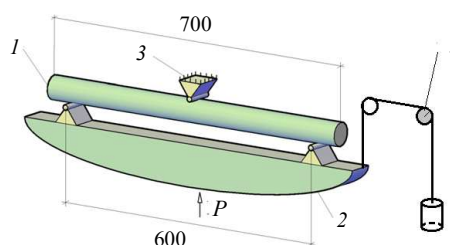


Рис. 2. Экспериментальная установка для испытаний ТБК на трехточечный изгиб

В процессе испытаний на образец 1 с помощью грузовой траверсы 2 подавалась плавная нагрузка. С помощью индикатора 4 регистрировалось общее сближение траверс, то есть искривление образца в результате чистого изгиба и локального смятия.

Для оценки вклада бетонного сердечника в деформирование образцов ТББ были дополнительно изготовлены контрольные образцы полых труб длиной 700 мм и поперечными сечениями $\varnothing 76 \times 3$ и $\varnothing 102 \times 3,5$ мм (марка стали 09Г2С). Необходимость этой части исследования продиктована тем, что из модели Бернулли следует, что полая труба имеет достаточно хорошие показатели при поперечном изгибе ввиду высоких значений моментов инерции недеформированного сечения. Тем не менее

исследования работы изгибаемых тонкостенных¹ конструкций показали, что локальное деформирование, искривление поперечного сечения и смятие металла является основополагающим в конструкциях такого типа и значительно снижает их общую жесткость и несущую способность [32]. На рис. 3 приводятся принципиальный вид деформированного состояния тонкостенной балки и различие деформации по модели Бернулли и в реальной конструкции.

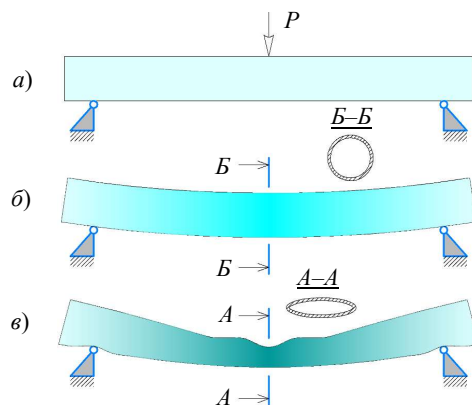


Рис. 3. Расчетная схема изгибаемого элемента (а), схема деформаций по модели Бернулли (б) и с учетом искривления сечений и локального смятия (в)

Результаты экспериментального исследования

При проведении исследований образцы ТББ и полых труб доводились до разрушения или полной потери несущей способности. При этом измеряемые деформации заведомо не разделялись на изгибные и деформации смятия, поскольку в настоящем исследовании интерес представляет именно общее напряженно-деформированное состояние образца с локальным смятием при трехточечном изгибе. На рис. 4 показан характерный вид разрушения ТББ при трехточечном изгибе.



Рис. 4. Разрушение ТББ по нормальному сечению

На рис. 5 приводятся диаграммы упругопластического деформирования образцов ТББ, показывающие зависимость нагрузки на образце P от сближения траверс f , (см. рис. 1). По диаграммам видно, что на начальной стадии работа образцов близка

¹К тонкостенным балкам условно относится прокат с отношением внешнего размера D к толщине стенки более 12,5 [32] (в том числе трубы, а также иные замкнутые сечения с подобным соотношением характерных размеров). В приведенном исследовании все изучаемые сечения труб относятся к тонкостенным.

к упругой, причем переход к нелинейной зависимости наступает при одних и тех же перемещениях $f \approx 6$ мм. Условная нагрузка, принятая за критическую, определяется аналогично показателям временного сопротивления для стали [33], она соответствует переходу к пластическому деформированию, где нарастание деформаций происходит практически без увеличения нагрузки.

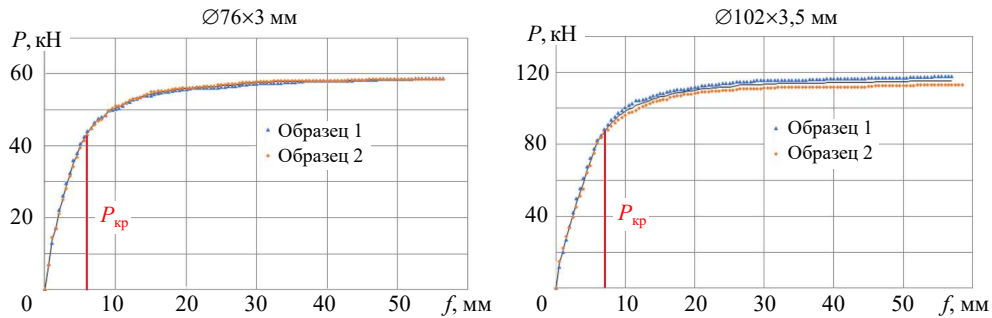


Рис. 5. Диаграммы деформирования образцов ТББ

Как и предполагалось, несмотря на разрушение по нормальному сечению (см. рис. 4), в балке присутствуют значительные местные деформации, обусловленные смятием стальной трубы, которые не привели к глобальному изменению формы и размеров поперечных сечений ТББ. Более того, практически на всем линейном участке диаграммы (см. рис. 5) изгибные деформации преобладали над смятием (рис. 6).



Рис. 6. Внешний вид образца при линейном деформировании

На рис. 7 приводится сравнение деформирования ТББ на линейном участке с деформированием полой трубы тех же размеров по балочной модели Бернулли (см. рис. 3б), согласно которой при отсутствии локальных деформаций диаграмма описывается зависимостью [34]:

$$f = \frac{Pl^3}{48EJ}, \quad (1)$$

где f, P, l – перемещение, нагрузка, длина пролета балки; $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа – модуль Юнга материала трубы; $J = \pi(D^4 - d^4)/64$ – осевой момент инерции сечения трубы (D, d – наружный и внутренний диаметры), а несущая способность может быть определена из условия Навье [34]:

$$\frac{M}{W} = \frac{M}{J} \cdot \frac{D}{2} \leq R_c, \quad (2)$$

где $M = Pl/4$ – максимальный изгибающий момент в сечениях балки; $W = J/y_{\max}$ – момент сопротивления сечения ($y_{\max} = D/2$ – расстояние от центра тяжести до наиболее удаленной точки сечения).

лее удаленной точки сечения), $R_c = 320$ МПа – расчетное сопротивление пределу текучести стали марки 09Г2С [33].

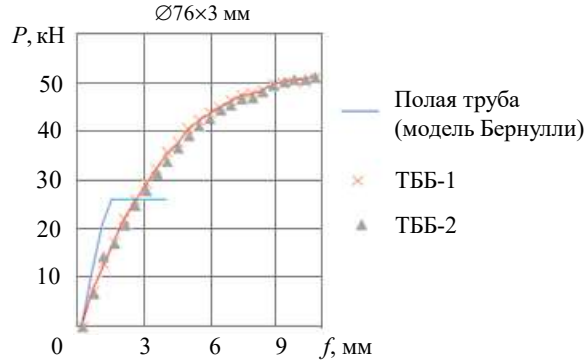


Рис. 7. Диаграмма деформирования полый трубы и трубобетонных образцов

На диаграмме зависимости $P(f)$ для полый стальной трубы $\varnothing 76 \times 3$ мм линейно возрастающий участок соответствует (1), горизонтальный участок – формуле (2). В соответствии с допущением модели Бернулли, рассчитываемая полая труба должна быть жестче, чем испытываемый трубобетонный образец, что не соответствует полученным экспериментальным данным. В действительности модель Бернулли хорошо описывает поведение балок сплошного сечения, но балки с тонкостенным сечением не подчиняются этим законам даже при наличии бетонного заполнения. По диаграммам видно, что по сравнению с изгибной моделью деформирования Бернулли наличие в трубе бетонного сердечника приводит к усилению конструкции. При этом следует учитывать, что реальная работа тонкостенной трубы при трехточечном изгибе заметно отличается от поведения балочной модели Бернулли. В конструкции трубобетонного сечения, которое является внутренне статически неопределимым, происходит перераспределение напряжений и часть напряжений воспринимается бетоном, за счет чего происходит прирост несущей способности.

На рис. 8 представлены экспериментальные диаграммы деформирования и вид образцов полый трубы после испытаний.

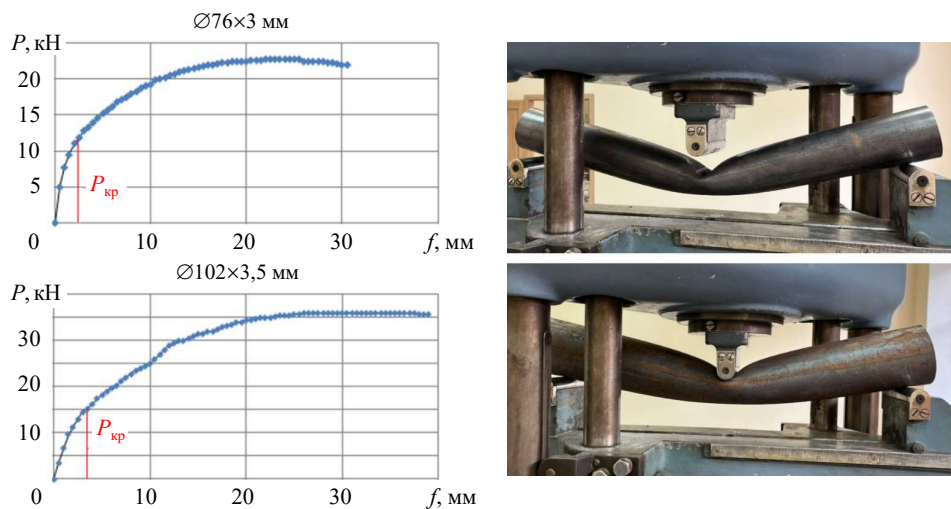


Рис. 8. Диаграммы деформирования и вид образцов полый трубы после испытаний

Результаты, полученные экспериментально, говорят о том, что фактические значения несущей способности полой трубы, соответствующие началу перехода в пластическое состояние [33], значительно ниже расчетных значений по (2).

В таблице 1 приводится сравнительный анализ несущей способности ТББ и полых труб по модели Бернулли и по экспериментальным данным (после значения несущей способности приводится процент по отношению к модели Бернулли). По данным, приведенным в таблице 1, видно, что увеличение диаметра критически влияет на несущую способность полого образца, это объясняется увеличением гибкости его сечения и резким ростом влияния деформаций смятия.

Таблица 1

Сравнение несущей способности полых и трубобетонных балок

Размер образца, мм	Несущая способность, кН		
	ТББ (рис. 5)	Полая труба	
		Модель Бернулли (формула 2)	Эксперимент (рис. 8)
Ø76×3	44 (169%)	26 (100%)	12 (46%)
Ø102×3,5	87 (158%)	55 (100%)	15 (27%)

На рис. 9 показано сравнение реальных диаграмм деформирования ТББ и полой трубы при трехточечном изгибе. Как видно из диаграмм, наличие сердечника в тонкостенной изгибаемой трубе значительно улучшает ее прочностные и деформационные характеристики. Также следует заметить, что, несмотря на пластические свойства бетона, заключенного в сердечник, деформирование ТББ по своей природе скорее напоминает поведение металлов (например, с явной пластической зоной на графиках, см. рис. 9), в то время как полая труба за счет смятия и искривления поперечных сечений сразу деформируется нелинейно, что усложняет расчет при проектировании подобных конструкций.

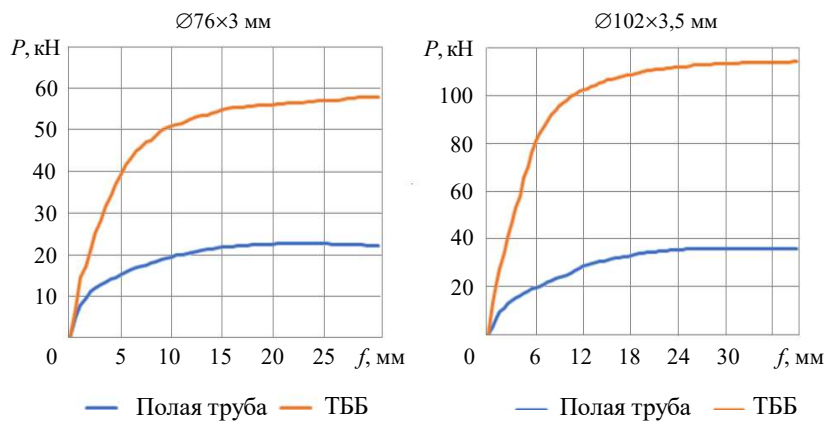


Рис. 9. Экспериментальные диаграммы деформирования ТББ и полой трубы

Заключение

По результатам экспериментального исследования установлено, что наличие бетонного сердечника в первую очередь обеспечивает сопротивление металлической трубы смятию и локальному деформированию сечения. Вклад бетонного сердечника в несущую способность для двух диаметров составил около 60% по сравнению с моделью Бернулли, а по сравнению с экспериментально испытанной полой трубой

несущая способность возросла примерно в 3 раза. Несмотря на значительное утяжеление, применение изгибаемых трубобетонных конструкций может оказаться целесообразным, если наряду с изгибом в сечениях возникают сжимающие усилия (например, колонны многоэтажных зданий), поскольку бетонный сердечник значительно усиливает конструкции такого рода [1–3].

Применение классических моделей изгиба балок в случае с тонкостенными трубными конструкциями нерационально и дает излишние запасы, поскольку не учитывает локальное смятие и деформирование сечений. Расчет массивных изгибаемых ТББ следует выполнять с учетом локальных деформаций.

Список литературы

1. Хазов П.А. Трехосное напряженное состояние бетона при продольном деформировании трубобетонных образцов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. №3. С. 312–322. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2023-85-3-312-322>.
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. 16–24.
3. 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.
4. 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>.
5. Кришан А.Л., Римшин В.И., Рахманов В.А. и др. Несущая способность коротких трубобетонных колонн круглого сечения. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. Т. 4. №370. С. 220–225.
6. Кришан А.Л., Гареев М.Ш., Мухаметова Ф.И., Ситина Ю.А. Результаты исследования НДС сжатых трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2005. №4. С. 74–77.
7. Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов. *Бетон и железобетон*. 2008. №2. С. 22–25.
8. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2009. №4. С. 75–80.
9. Кришан А.Л., Суровцев М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2013. Т. 21. №1. С. 90–92.
10. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона. *Фундаментальные исследования*. 2011. №12-3. С. 580–583.
11. 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).
12. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
13. Yiyang Lu, Na Li, Shan, Hongjun Liang. 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>.
14. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N., Ye J. 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>.
15. 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>.

16. 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. 6645757-1 – 6645757-12. <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
17. Jiantao Wang, Qing Sun, Junxin Li. 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>.
18. 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. P. 107751-1 – 107751-17. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107751>.
19. 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>.
20. Terry P.J., Bradford M.A., Gilbert R.I. Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes. In: *Tubular structures VI*. Eds. P. Grundy, A. Holgate, B. Wong. London. 2021. P. 293–298. <https://doi.org/10.1201/9780203735015>.
21. 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. P. 106720-1 – 106720-20. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106720>.
22. 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>.
23. 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>.
24. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Определение прочности и ориентации площадок разрушения бетона при различных видах объемного напряженного состояния. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Vol. 11. Iss. 4. P. 52–61.
25. Карпенко Н.И., Корсун В.И., Карпенко С.Н., Анущенко А.М. Критерий прочности бетона при трехосном сжатии. *Приволжский научный журнал*. 2022. №4. С. 8–16.
26. 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>.
27. 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>.
28. 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>.
29. 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>.
30. 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>.
31. Хазов П.А., Ведяйкина О.И., Хохлова И.С., Артемьева Д.В. Деформирование и разрушение трубобетонных образцов при поперечном изгибе. *Приволжский научный журнал*. 2023. №2(66). С. 69–74.
32. Лампси Б.Б. *Прочность тонкостенных металлических конструкций*. М.: Стройиздат, 1987. 279 с.
33. *СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81**. М.: Стандартинформ, 2022. 148 с.
34. Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 543 с.

References

1. Khazov P.A. Trekhosnoe napryazhennoe sostoyanie betona pri prodolnom deformirovaniy trubobetonnykh obraztsov [Triaxial stress state of concrete under longitudinal deformation of tube-concrete samples]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2023. Vol. 85. No 3. P. 312–322 (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. 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. No 63. P. 36–43 (In Russian).
4. 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).
5. 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 [Textile Industry Technology]*. 2017. Vol. 4. No 370. P. 220–225 (In Russian).
6. 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 imeni G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2005. No 4. P. 74–77 (In Russian).
7. 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. P. 22–25 (In Russian).
8. Krishan A.L. Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [The concrete-filled steel tube columns for high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*. 2009. No 4. P. 75–80 (In Russian).
9. Krishan A.L., Surovtsev M.M. Eksperimentalnye issledovaniya prochnosti gibkikh trubobetonnykh kolonn [Experimental reserches of strength of flexible concrete-filled tube (cft) columns]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2013. Vol. 21. No 1. P. 90–92 (In Russian).
10. Nesvetayev G.V., Rezvan I.V. Otsenka prochnosti trubobetona [Resistibility evaluation of the composite columns]. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2011. No 12-3. P. 580–583 (In Russian).
11. 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).
12. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
13. Yiyang Lu, Na Li, Shan, Hongjun Liang. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Const. Build. Mater.* 2015. Vol. 95. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114>.

14. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N., Ye J. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin Walled Struct.* 2014. Vol. 77. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.015>.
15. 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>.
16. 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. 6645757-1 – 6645757-12. <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>
17. Jiantao Wang, Qing Sun, Junxin Li. 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>.
18. 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 Res.* 2023. Vol. 201. P. 107751-1 – 107751-17. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107751>.
19. 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>.
20. Terry P.J., Bradford M.A., Gilbert R.I. Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes. In: *Tubular structures VI*. Eds. P. Grundy, A. Holgate, B. Wong. London. 2021. P. 293–298. <https://doi.org/10.1201/9780203735015>.
21. 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. P. 106720-1 – 106720-20. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106720>.
22. 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>.
23. 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>.
24. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Opredelenie prochnosti i orientatsii ploshchadok razrusheniya betona pri razlichnykh vidakh obemnogo napryazhennogo sostoyaniya [Determination of the strength and orientation of destruction concretes surfaces for different types of bulk stress state]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Vol. 11. Iss. 4. P. 52–61 (In Russian).
25. 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. No 4. P. 8–16 (In Russian).
26. 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>.
27. Markov I.P., Konstantinov A.Yu. Dinamicheskie ispytaniya ob'emno-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).
28. 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>.
29. 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>.
30. 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>.
31. Khazov P.A., Vedyaykina O.I., Khokhlova I.S., Artemyeva D.V. Deformirovanie i raz-

rushenie trubobetonnykh obraztsov pri poperechnom izgibe [Deformation and destruction of concrete-filled steel tube samples during transverse bending]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [The Privolzhsky Scientific Journal]. 2023. No 2(66). P. 69–74 (In Russian).

32. Lamps B.B. *Prochnost tonkostennykh metallicheskih konstruksiy* [Strength of Thin-walled Metal Structures]. Moscow. Stroyizdat Publ. 1987. 279 p. (In Russian).

33. SP 16.13330.2017. *Stalnye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-23-81** [Steel Structures. Updated edition SNIIP II-23-81*]. Moscow. Standartinform Publ. 2022. 148 p. (In Russian).

34. Feodosyev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow. MGTU Publ. 2016. 543 p. (In Russian).

ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF STEEL-CONCRETE BEAMS WITH LOCAL CRUMPLING DURING THREE-POINT BENDING

Khazov P.A., Vedyajkina O.I., Pomazov A.P., Kozhanov D.A.

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

khazov.nngasu@mail.ru

Received by the Editor 2023/11/10

The study presents the results of experimental modeling of elastoplastic deformation of bent massive concrete filled steel tube beams under three-point bending. It has been shown that local deformations and local crushing in such structures have a significant impact on their behavior. The applicability of the theory of bending of a hollow steel beam according to the Bernoulli model is analyzed. A comparison has been made of the bearing capacity and stress-strain state of hollow steel tubes (according to the Bernoulli model and the results of experiments) and concrete filled steel tube beams, and the contribution of the concrete core to the bending resistance during elastoplastic deformation has been quantitatively assessed. The actual load-bearing capacity of a hollow pipe during three-point bending does not exceed 50% of the calculated theoretically determined one, which indicates the impossibility of using the classical bending model when designing systems of this kind. In this case, the concrete filled steel tube beam not only ensures the full functioning of the metal during the deformation process, preventing its disruption, but also provides some increase in load-bearing capacity due to the inclusion of a compressed zone in the concrete work. The increase in the load-bearing capacity of a beam due to the introduction of a concrete core can reach 70%. Despite their significant weight, bendable tube-concrete rods can be recommended in conditions of a complex stress-strain state, in which, in addition to transverse bending loads, significant longitudinal forces arise, as well as local force factors that contribute to the occurrence of local crushing deformations, since, unlike a thin-walled hollow tube, concrete the core significantly prevents these effects. Based on the results of the study, the potential effectiveness of flexible tube-concrete elements for a number of structures was proven.

Keywords: concrete-filled steel tube, Bernoulli model, beam bending theory, elastic-plastic deformation, triaxial compression of concrete, complex stress-strain state, efficiency of tube concrete, load bearing capacity.