

4. Tefpers, R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars / R. Tefpers // *Magazine of Concrete Research*. – March 1979. – Vol. 31. – Iss. 106. – P. 3–12.
5. Защита строительных конструкций от коррозии. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.01-111-2008 (02250). – Введ. 01.01.2009. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2009. – 94 с.
6. Мосты и трубы. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-232-2011 (02250). – Введ. 01.11.2019. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2011. – 304 с.
7. Lindvall, A. Chloride ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt / A. Lindvall, A. Andersen, L.-O. Nilsson // *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*. – Paris, 2000. – P. 85–103.
8. Lindvall, A. Mapping of the chloride load around two Swedish reinforced concrete bridges / A. Lindvall // *Publication P-02:2, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology*. – Goteborg, 2002. – P. 52.
9. DuraCrete (1998a). *Modelling of Degradation // Document BE95-1347/R4-5. The European Union – BriteEuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda*. – 1998.
10. DuraCrete (1999f). *Quantification of the environmental parameters in the carbonation and chloride ingress models // Document BE95-1347/TG4/C. The European Union – BriteEuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Prepared at Chalmers University of Technology, Göteborg*. – 1999.
11. Blomqvist, G. Airborne spreading and deposition of de-icing salt – a case study / G. Blomqvist, E.-L. Johansson // *The Science of the Total Environment*. – 1999. – Vol. 235. – P. 161–168.
12. Eliasson, Å. Spridningavvägsaltkringsvägar (The spread of de-icing salts around roads) / Å. Eliasson // *Project work 20p, Naturgeografiskainstitutionen, Göteborgsuniversitet, Göteborg*, 1996. (in Swedish).
13. McBean, E. Migration pattern of de-icing salts from roads / E. McBean, S. Al-Nassri // *Journal of Environmental Management*. – 1987. – Vol. 25. – P. 231–238.
14. Fagerlund, G. Karteringavkloridbelastning vid Riksväg 40 – Resultatfran 5 vintersasoner (Mapping of the chloride load around a Swedish main road exposed to de-icing salts – Results after 5 winter seasons): Report TVBM-7162 / G. Fagerlund, J. Svard // *Division of Building Materials, Lund Technical University*. – Lund, 2001. – P. 12.
15. Талецкий, В.В. Нарушения несущих железобетонных конструкций путепроводов, вызванные хлоридной агрессивней / В.В. Талецкий, А.В. Степанова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 19-20 апреля 2012 г. В 2 ч.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 127.

УДК 624.016

*Стороженко Л.И., Ермоленко Д.А., Демченко О.В.*

## **РАБОТА ПОД НАГРУЗКОЙ СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УСИЛЕННЫМИ ЯДРАМИ**

Трубобетон является комплексной конструкцией, состоящей из стальной трубы и бетонного ядра, работающей совместно. Трубобетонные конструкции очень надежны в эксплуатации. В предельном состоянии они не теряют несущую способность мгновенно, как обычные железобетонные элементы, а еще долгое время способны выдерживать возрастающую нагрузку [1]. Прочность бетонного ядра, стесненного стальной оболочкой, как обоймой, значительно превышает приземную. Использование в строительстве трубобетонных конструкций, вместо железобетонных, дает возможность экономии стали и бетона [2]. И, таким образом, уменьшить вес сооружений, многократно повысить технические показатели традиционных стержневых конструкций, что особенно важно в строительстве многоэтажных, многопролетных объектов. Это также позволяет в условиях нехватки строительных площадей в крупных и средних городах решать целый ряд проблем в вопросах проектирования и производства строительных работ [3]. Кроме того, открывается перспектива использования в

трубобетонных колоннах высокопрочных бетонов, что также позволит существенно снизить размеры поперечных сечений конструкций, а следовательно, и общие затраты на строительство [4]. Но остается неоднозначным ответ на вопрос об эффективности применения бетонов высокой и сверхвысокой прочности и выявление особенностей деформирования и установления истинной работы трубобетонных стержней при действии сжимающей нагрузки в зависимости от физико-механических характеристик материала сердечника.

Основной целью экспериментальных исследований трубобетонных элементов, при кратковременном воздействии статической нагрузки, было изучение влияния прочности бетонного заполнения, способа передачи нагрузки на несущую способность и напряженно-деформированное состояние трубобетонных элементов.

Была разработана программа экспериментальных исследований: образцы серий ТБ нагружались на комплексное сечение; в серии БТ нагрузка передавалась на бетонный сердечник. Высота опытных образцов составляла 640 мм ( $L/D = 4$ ). Оболочка выполнена из стальных труб  $\varnothing 159$  с толщиной стенки 3,5 и 4 мм. Механические характеристики материала трубы-оболочки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики материалов труб-оболочек

Номер трубы	Сечение, мм	Предел текучести $\sigma_u$ , МПа	Предел временного сопротивления $\sigma_v$ , МПа	Несущая способность трубы, кН
1	159×3,5	256	339	420
2	159×4,0	347	431	650

Было разработано пять составов бетонов с разной прочностью и водоцементным отношением (В/Ц) – 0,29; 0,25; 0,24; 0,23. Характеристики разработанных составов бетонов приведены в таблице 2.

При загрузке фиксировались два характерных усилия для трубобетона [3]: усилие  $N_1$  – достижение материалом оболочки предела текучести; усилие  $N_2$  – максимальное усилие.

При достижении величины разрушающего усилия  $N_2$  все опытные образцы имели значительное превышение несущей способности трубобетонные элементы над суммарной от 7 до 28 %.

Таблица 2 – Характеристики составов бетонов

Номер состава бетона	Прочность по кубам $\sigma_{куб}$ , МПа	Прочность по цилиндрам $\sigma_{цил}$ , МПа	Призмная прочность $\sigma_c$ , МПа	Модуль упругости $E_0 \times 10^5$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu_0$	Предельная деформация $\epsilon_c \times 10^{-5}$
1	36,4	36,9	32,5	0,265	0,21	148
2	63,5	63,0	54,3	0,323	0,18	191
3	71,9	75,4	65,0	0,367	0,19	221
4	77,6	81,5	70,3	0,393	0,19	218
5	86,9	93,4	80,5	0,401	0,19	223

Для того, чтобы сопоставить влияние исследуемых факторов на прочность трубобетонных элементов, были вычислены коэффициенты эффективности конструктивного элемента [5], значения которых приведены в таблице 3.

$$m1 = \frac{N_1}{N_v + N_c}; \quad m2 = \frac{N_2}{N_u + N_c},$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – соответствующее усилие в опытном образце;  $N_v$  и  $N_u$  – соответственно усилие в момент текучести и максимальное усилие в трубе-оболочке;  $N_c$  – несущая способность бетонного ядра.

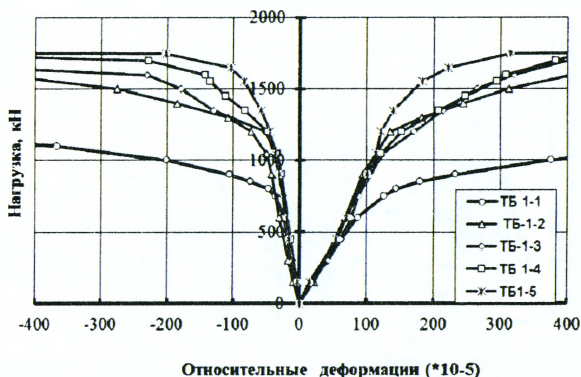
Значения коэффициенты эффективности конструктивного элемента приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытания опытных образцов

Марка образца	Несущая способность ( $N_1$ ), кН	Несущая способность ( $N_2$ ), кН	Отношение $N_2/N_1$	$m_1$	$m_2$	$\eta$
ТБ-1-1	825	1250	1,52	0,81	1,23	0,68
ТБ-1-2	1300	1645	1,27	0,92	1,17	0,89
ТБ-1-3	1385	1705	1,23	0,87	1,07	0,82
ТБ-1-4	1450	1810	1,18	0,86	1,07	0,81
ТБ-1-5	1650	1770	1,07	0,88	0,94	0,84
ТБ-2-2	1350	1775	1,32	0,88	1,16	0,81
ТБ-2-3	1600	2020	1,26	0,93	1,17	1,03
ТБ-2-4	1700	2090	1,23	0,93	1,15	1,05
ТБ-2-5	1900	2400	1,26	0,95	1,20	0,93
БВТ-1-6	900	1275	1,42	0,89	1,25	0,80
БВТ-1-7	1300	1530	1,18	1,00	1,09	0,99
БВТ-1-8	1600	1750	1,09	1,00	1,10	1,00
БВТ-1-9	1850	2130	1,15	1,09	1,26	1,12
БВТ-1-10	2000	2275	1,14	1,06	1,21	1,08

В процессе испытания экспериментальных образцов фиксировались продольные деформации укорочения (+) и поперечные деформации удлинения (-). По этим данным были построены зависимости  $N - \varepsilon$ , на рисунках 1 и 2 приведена зависимость продольных и поперечных относительных деформаций для центрально сжатых образцов серии ТБ-1 и серии ТБ-2 от нагрузки нагруженных на комплексное сечение.

В начале нагружения зависимость  $N - \varepsilon$  близка к линейной, затем графики принимают криволинейный характер, что объясняется особенностями деформирования стали и бетона. Поперечные деформации при небольших нагрузках развиваются незначительно, а по мере приближения к предельному состоянию сильно возрастают. Это свидетельствует о росте напряжений в поперечном направлении.



Начало увеличения объема образца примерно совпадает с началом текучести трубы в продольном направлении.

Рисунок 1 – Зависимость продольных и поперечных деформаций трубобетонных элементов серии ТБ-1 от нагрузки  $N$ , передаваемой на комплексное сечение при заполнении различными по прочности бетонами

Из рисунка 2 можно видеть, что развитие продольных деформаций имеет прямолинейный характер от начала загрузки до величины  $(0,6 \div 0,7) N_1$ . А затем наблюдается нарушение пропорциональности в сторону увеличения деформа-

ций. При нагрузках  $0,6 N_1$  труба деформируется упруго, а в бетоне начинают развиваться пластические деформации. С увеличением нагрузки в бетоне начинают появляться микротрещины, увеличивается боковое давление между бетоном и оболочкой, что приводит к росту поперечных деформаций. При дальнейшем увеличении нагрузки до  $0,9 N_1$  продольные напряжения в трубе достигают предела текучести. С начала это явление носит локальный характер – на поверхности трубы лаковое покрытие теряет «глянец». При этом в бетонном ядре продолжается образование трещин в плоскостях, параллельных плоскости действия усилия.

При нагрузках, близких к  $0,8 N_2$ , в месте приложения нагрузки наблюдается образование среза бетонного сердечника по плоскости и рост объема образца, что свидетельствует об увеличении поперечных деформаций примерно  $(150 \div 200) \times 10^{-5}$ . В таком состоянии трубобетонный элемент еще способен воспринимать возрастающую нагрузку, хотя наблюдаются значительные продольные деформации. В момент достижения  $N_2$  продольные деформации некоторых

экспериментальных образцов составляли  $(10 \div 15) \%$ , что значительно превышает деформации, допустимые при эксплуатации конструкции.

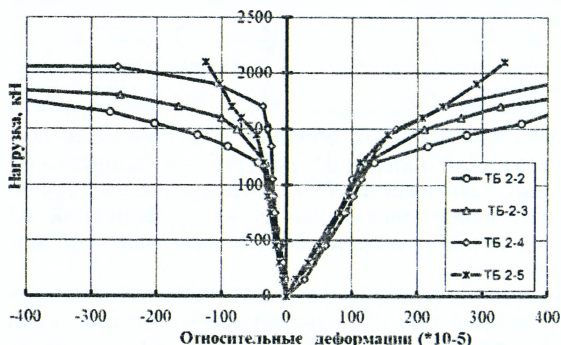


Рисунок 2 – Зависимость продольных и поперечных деформаций трубобетонных элементов серии ТБ-2 от нагрузки  $N$ , передаваемой на комплексное сечение при заполнении различными по прочности бетонами

На рисунке 3 изображена зависимость продольных и поперечных относительных деформаций экспериментальных центрально сжатых образцов серии БВТ-1, в которых нагрузка передавалась на бетонное ядро.

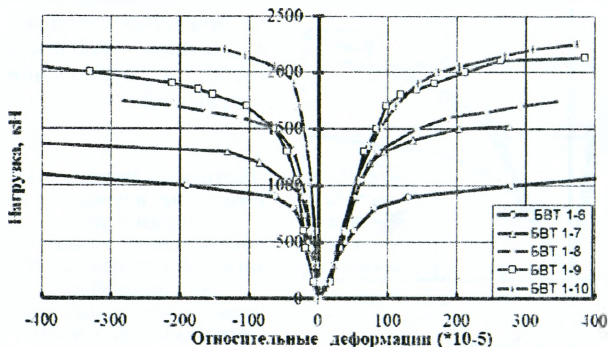


Рисунок 3 – Зависимость продольных и поперечных деформаций трубобетонных элементов от нагрузки  $N$ , передаваемой на бетон при заполнении различными по прочности бетонами

Следует отметить что деформативность исследованных образцов зависит от способа передачи нагрузки. Так при нагружении на бетонное ядро наблюдалось уменьшение продольных деформаций в сравнении с нагружением на комплексное сечение. Развитие продольных деформаций имеет прямолинейный характер

от начала загрузки до величины  $(0,8 \div 0,9) N_1$ . А затем наблюдается нарушение пропорциональности в сторону увеличения деформаций. При передаче нагрузки на бетон по сравнению с передачей на комплексное сечение также увеличивается несущая способность труббетонных образцов  $N_1$  от 7 до 17 %.

О характере разрушения труббетонных образцов можно судить по фотографиям, приведенным на рисунках 4–5. Интересно, что в случае передачи нагрузки на комплексное сечение и на бетонное ядро при заполнении сердечника высокопрочными бетонами характер разрушения образцов был практически одинаковым и характеризовался срезом бетонного ядра по плоскости, под углом пересекающей продольную ось.

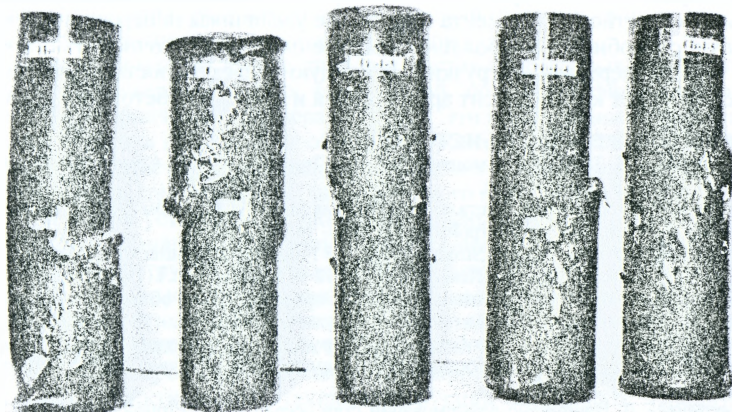


Рисунок 4 – Характер разрушения образцов серии ТБ-1 (комплексное сечение)

В зависимости от прочности ядра форма разрушения несколько разная, образцы серии БВТ-1-6 с составом бетона 1 разрушались вследствие поперечного расширения в середине сечения и на момент достижения предельного состояния не имели гофр, образцы серии ТБ-1-1 с составом бетона 1 разрушались вследствие искривления образца и образования поперечной гофры в среднем сечении.

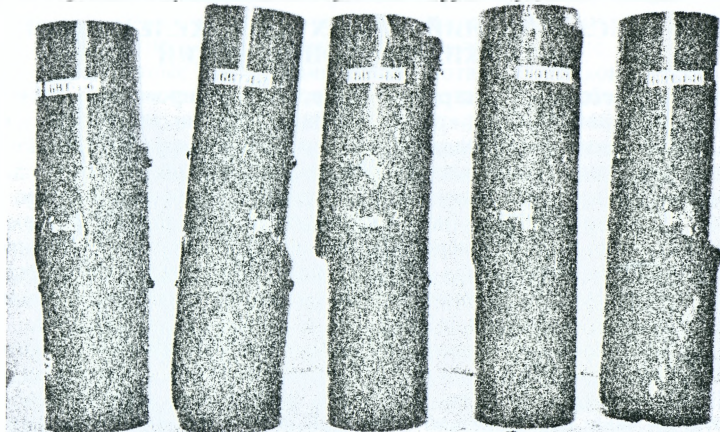


Рисунок 5 -- Характер разрушения образцов серии БВТ-1 (нагрузка передавалась на бетон)

Разрушение образцов серий ТБ-1 и БВТ-1 с составами бетона 2, 3, 4, 5 отношением  $t/D = 0,022$  происходило путем плавного равномерного среза бетонного сердечника по внутренней поверхности оболочки. При возрастании нагрузки и достижении максимального усилия  $N_2$  образцы характеризовались развитием срезов под углом 20–35°.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что использование высокопрочных бетонов в качестве ядра трубобетонных элементов позволяет полностью использовать прочностные свойства стали. Кроме того, использование в трубобетонных конструкциях высокопрочных бетонов также позволяет улучшить его эксплуатационные характеристики и существенно повысить несущую способность конструктивного элемента в целом, не увеличивая поперечного сечения. На несущую способность наибольшее влияние оказывает прочность бетонного ядра и способ передачи нагрузки. На общую эффективность конструктивного элемента влияет коэффициент армирования и прочность бетонного ядра.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стороженко, Л.І. Трубобетон: монографія / Л.І. Стороженко, Д.А. Єрмоленко, О.І. Лапенко – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 306 с.
2. Кикин, А.И. Конструкции из стальных труб заполненных бетоном / А.И. Кикин, Р.С. Санжаровский, В.А. Труль – М.: Стройиздат, 1974. – 145с.
3. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns / Ke Feng Tan, Lai Bao Liu// Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
4. Кришан, А.Л. Сталетрубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром / А.Л. Кришан, М.Ш. Гареев, А.И. Сагалатов // Бетон и железобетон. – 2004. – № 6. – С. 11–14.
5. Стороженко, Л.І. Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація / Л.І. Стороженко, В.М. Сурдін, В.І. Єфіменко, В.І. Вербицький – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – 448 с.
6. Стороженко, Л. Напружено-деформований стан осердя трубобетонних елементів / Л.І. Стороженко, Д.А. Єрмоленко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Вып. № 56. – Дн-вск.: ПГАСА, 2010. – С. 504–509.

УДК 624.015.5

*Стороженко Л.И., Мурза С.А., Нижник А.В., Дрижурек Ю.В.*

#### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИБКИХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сталежелезобетонные конструкции с жестким армированием имеют много преимуществ, главное из них - это отсутствие опалубки, возможность изготавливать комплексные конструкции, в которых совместно работают железобетон и стальные профили. Уже доказано, что их рационально применять для перекрытия больших пролетов (плиты, балки, ригели, фермы и т.д.), стоек, воспринимающих большие нагрузки (колонны промышленных и гражданских зданий, опоры ЛЭП и т.д.), в инженерных сооружениях. Поперечные сечения таких конструкций могут быть самые разнообразные. При использовании сталежелезобетонных конструкций уменьшается масса зданий, очень часто можно обойтись без опалубки, закладных деталей.

При исследовании и строительстве таких конструкций важным становится фактор устойчивости. Значение расчета на устойчивость для указанных конструкций существенно возросло, поскольку разрушение сталежелезобетонных конструкций чаще всего связано с потерей общей устойчивости конструкции или их отдельных конструктивных элементов.