

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕТОННЫХ КОЛОНН МЕТОДОМ ГЛУБИННОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

*Приведены результаты экспериментальных исследований бетонных призм с использованием глубинных датчиков и тензорезисторов серии ВХ120-20АА-Х. Получены данные о характере развития продольных и поперечных деформаций на поверхности и внутри материала на различных этапах нагружения.*

**Ключевые слова:** модуль упругости, продольные деформации, глубинный датчик, сталебетонные конструкции.

**Введение.** В настоящее время разработка новых эффективных приборов и оборудования способствует развитию экспериментальных методов определения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций. В процессе эксплуатации объектов и при подготовке их к реконструкции возникает необходимость в определении фактического напряженного состояния строительных конструкций для назначения наиболее эффективных мер по их восстановлению.

Судить о напряженном состоянии можно по деформации тела, появившейся как результат совместного действия внешних сил и внутренних сил сопротивления. Такой подход оказывается возможным лишь для идеально упругого тела. Упругопластическое тело, находясь под постоянной нагрузкой, продолжает деформироваться с течением времени, и, значит, в разные моменты времени одним и тем же значениям напряжений соответствуют разные значения деформаций.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** Механизм разрушения бетона, как известно, связан с образованием и развитием микро- и макротрещин при действии нагрузки. Причиной появления первых микротрещин является концентрация напряжений вблизи дефектов структуры: пор, включений, дислокаций. Согласно современным представлениям микротрещины появляются при низких уровнях напряжений  $\sigma_c = 0,3f_{cm}$ . Разрушение бетона начинается с развития трещин в контактной зоне (матрица-заполнитель) с их последующим выходом в матрицу. Контактные трещины развиваются под действием сдвиговых, а трещины в матрице – растягивающих напряжений. В бетоне невысокой прочности трещины огибают зерна заполнителя, имея направление на контакте под углом к усилиям сжатия, а в матрице – параллельно им; в высокопрочном бетоне трещины пересекают зерна заполнителя и направлены параллельно усилиям сжатия [1, 2].

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** Большинство ученых обращали внимание на то, что бетон – материал грубо неоднородный и что даже при самых простых нагрузках в нем не возникают ни равномерные, ни одноосные напряженные состояния. Исходя из этого, значения напряжений, измеренные в определенном сечении бетонного элемента, можно использовать только для оценки напряженного состояния в этом сечении и после соответствующей статистической обработки. Следует учитывать, что наиболее опасное сечение (в смысле наступления предельного напряженного состояния) может оказаться в месте, где измерения не проводились. В настоящее время использование тензорезисторов дает возможность следить за развитием деформаций в конструкциях. Метод тензометрии заключается в определении напряженного состояния путем измерения деформаций, постоянных упругости и деформативности бетона с последующим вычислением напряжений. Этот метод нашел широкое применение в практике экспериментальных исследований строительных конструкций. Но отсутствие оборудования для проведения исследований в глубине бетонного массива не позволяет проводить работу по дальнейшей оптимизации поперечных сечений сталебетонных конструкций.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать конструкцию глубинного датчика для выявления закономерностей деформирования сталебетонных конструкций на всех стадиях нагружения при проведении экспериментальных исследований.

**Основной материал и результаты.** Данная статья является продолжением экспериментальных исследований авторов по изучению деформаций в бетонных и сталебетонных конструкциях [3, 4]. Исследователи указывают на то, что измеренные деформации должны с достаточной вероятностью представлять усредненные значения деформаций, соответствующие принятой модели. Измеряя деформации на малых базах (база тензорезисторов принимается в пределах от 5 до 100 мм), получаем информацию о деформациях локальных зон. Для того чтобы перейти от деформаций в локальных зонах к усредненным значениям, необходимо применить метод физического моделирования бетона в сочетании с математическим моделированием выявленных экспериментально закономерностей, т.е. найти аналитическую форму для их выражения.

При одноосном напряженном состоянии не составляет труда определить деформационные характеристики материалов теоретическим и экспериментальным способами. Однако возникают трудности при определении механических характеристик материалов конструкций, которые работают в условиях сложного напряженного состояния. К таким конструкциям относятся комбинированные сталебетонные элементы, в частности сталебетонные колонны. Согласно данным работ [5, 6], чтобы иметь полное представление о работе сталебетонного элемента как единой системы, необходимо решить вопрос о контактном взаимодействии ядра и оболочки. Поэтому для обеспечения несущей способности подобных комбинированных конструкций важно знать распределение деформаций в бетонном ядре, которое находится в состоянии трехосного сжатия.

Для решения подобного рода задач необходимо учитывать процесс развития деформаций не только на поверхности элемента конструкции, а и внутри материала, из которого изготовлена конструкция. С этой целью, для более подробного изучения поведения деформаций в бетоне, были проведены экспериментальные исследования на бетонных призмах с применением глубинных датчиков. Для подтверждения правильности работы и точности показаний глубинных датчиков выполнялась их тарировка на балке равного сопротивления. Для этого на балку равного сопротивления были наклеены тензорезисторы типа ВХ120-20АА-Х и глубинные датчики. По полученным данным можно говорить о хорошей сходимости опытных результатов. Из этого следует, что глубинные датчики работают с достаточной точностью и могут быть использованы в бетонных призмах для определения деформаций.

Глубинные датчики изготавливались по следующей технологии [7]. В сборно-разборную металлическую форму (ячейка для изготовления каждого датчика имеет размер 100×10×4 мм), смазанную солидолом, укладывался слой мастики толщиной 2 мм. Мастика состояла из смеси клея БФ-2 с цементом в соотношении 1:2. После высыхания (в теч. 24 ч) на нее наклеивались тензодатчики серии ВХ120-20АА-Х, на которые в свою очередь наносился второй слой мастики. Свободными оставались только участки головки датчика с выводами. После того как к выводам были подпаяны провода, осуществлялось изолирование этой части датчика. После полного высыхания мастики в теч. 24 ч датчики извлекались из формы и объединялись в розетку (рис. 1).



**Рисунок 1 – Внешний вид глубинных датчиков**

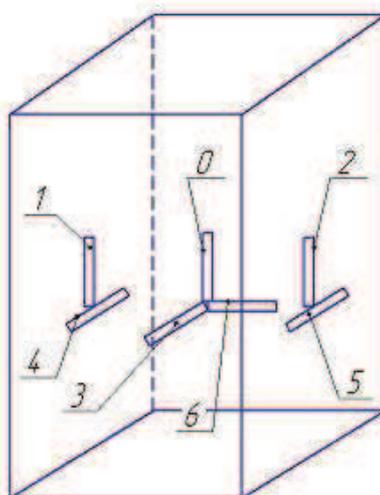
Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено две серии опытных образцов. При этом образцы 1-й серии твердели в обычных условиях, а образцы 2-й серии твердели в условиях всестороннего обжатия. Испытания призм с размерами ребер 150×150×600 мм проводились на 30-й день после бетонирования. Изготовление и испытание бетонных призм проводилось в соответствии с требованиями норм [8, 9].



**Рисунок 2 – Вид бетонных призм до испытания**

Бетонные призмы (класс бетона С20/25) испытывались на гидравлическом прессе ПММ-250 в лаборатории кафедры строительной механики и гидравлики Украинской государственной академии железнодорожного транспорта.

К образцам прикладывалась осевая нагрузка. В процессе испытания измерялись продольные и поперечные деформации. Для этого на грани кубиков в продольном направлении наклеивались тензорезисторы (рис. 2). Глубинные датчики в виде трехмерной розетки устанавливались в образцах во время бетонирования. Схема расположения датчиков представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Схема расположения датчиков**

Показания тензодатчиков снимали с помощью тензометрической станции ВМП-8. Нагрузку прикладывали по 20 кН в интервале от 0 до  $0,8F_d$ . Отсчеты по приборам снимались на каждой ступени нагрузки. Все образцы доводились до разрушения.



**Рисунок 4 – Вид бетонных призм после испытания**

Теоретические значения модуля упругости  $E_{cd}$  и относительных деформаций  $\varepsilon_c$  определяются так:

$$E_{cd} = E_{cm} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{1,1 \cdot f_{cm}}\right); \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1,1 \cdot f_{cm}}{E_{cm}} \ln\left(1 - \frac{\sigma}{1,1 \cdot f_{cm}}\right). \quad (2)$$

Значения начальных модулей упругости при сжатии бетона  $E_{cm} = E_c$  равны отношению нормального напряжения  $\sigma$  к относительной деформации  $\varepsilon$  при величине  $\sigma < 0,3f_{cm}$ . С ростом напряжений в бетоне величина модуля деформации уменьшается. При напряжениях  $\sigma < 0,5f_{cm}$  упругая деформация составляет обычно более 0,8 полной деформации. В работах [10–12] отмечается, что зависимость «деформации – напряжение» при кратковременном центральном сжатии бетона с большой достоверностью имеет линейный характер. В наших экспериментальных исследованиях принимаем, что в пределах от 0 до  $\sigma < 0,3f_{cm}$  зависимость между деформациями и напряжениями линейная.

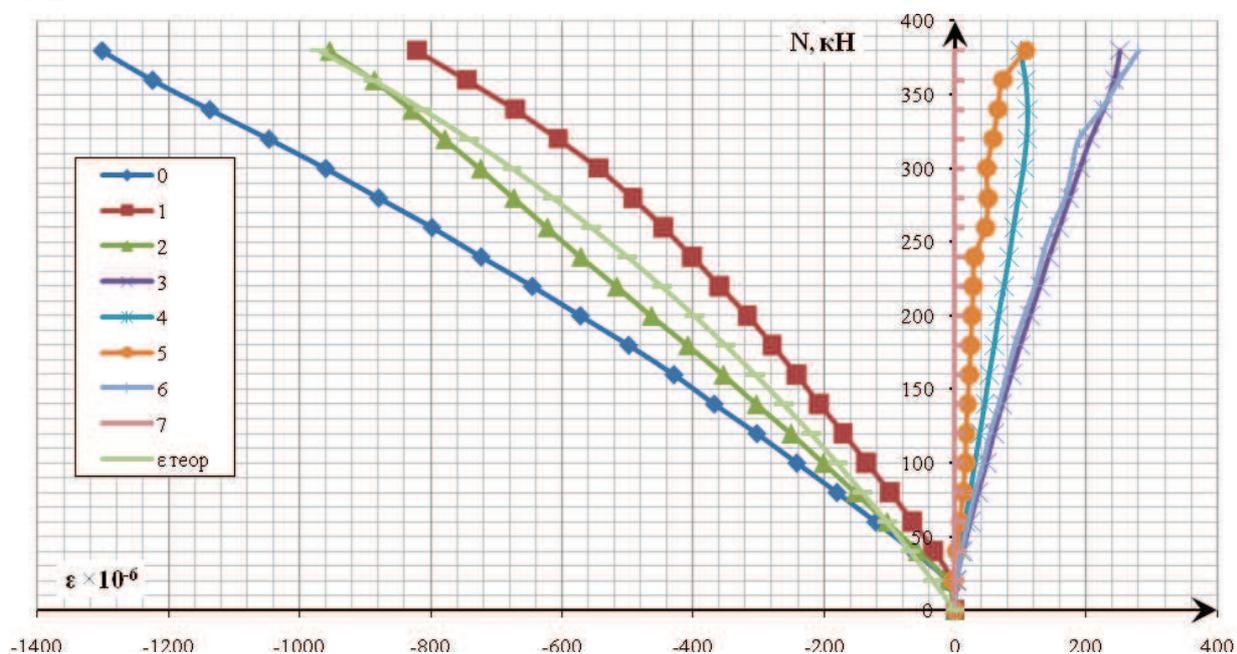
По результатам испытаний двух серий образцов были построены графики зависимостей относительных деформаций от действующей нагрузки. Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что относительные деформации внутри бетонных призм больше, чем на поверхности, не зависимо от условий твердения бетона.

Результаты испытания бетонных призм приведены на рисунках 5 и 6.

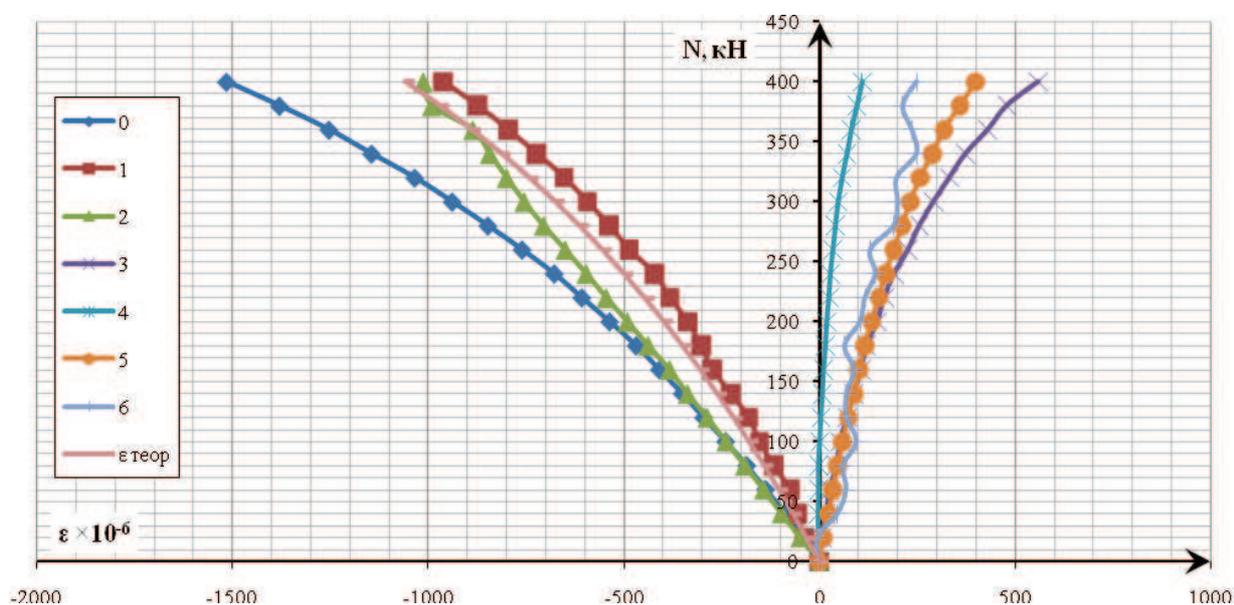
В результате испытания бетонных призм были получены данные о характере развития относительных деформаций на поверхности и внутри бетона на различных этапах нагружения.

В экспериментальных образцах второй серии, которые твердели в условиях всестороннего обжатия, наблюдалось увеличение прочности бетона на 10% по сравнению со стандартными призмами. Такое явление оказывает положительный эффект при применении

сталебетонных конструкций, в которых бетонное ядро набирает прочность в условиях всестороннего обжатия. В ходе эксперимента велось наблюдение за характером развития деформаций и трещинообразования каждой серии образцов. На образцах первой серии появление трещин наблюдалось при нагрузке равной  $0,5F_d$ . Появление трещин на образцах второй серии наблюдалось при достижении нагрузкой величины  $0,8 \div 0,9F_d$ . После чего следовало резкое развитие трещин по всему образцу и, как следствие, быстрое разрушение бетона.



**Рисунок 5 – График относительных деформаций первой серии образцов**



**Рисунок 6 – График относительных деформаций второй серии образцов**

Отношения поперечных деформаций к продольным, рассчитанные по показаниям глубинных датчиков, изменялись в пределах от 0,2 до 0,35. Это свидетельствует о том, что при механическом нагружении трещины в первую очередь образуются на поверхности. Трещинообразованию в материале предшествует разрыв и появление нарушений

сплошности структуры материала вследствие возрастания деформаций по площадкам или объемам. Это говорит о том, что места появления микротрещин являются концентраторами напряжений.

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность использования полученной конструкции глубинного датчика для выявления закономерностей деформирования сталебетонных конструкций на всех стадиях нагружения. Для обеспечения несущей способности комбинированных конструкций важно знать распределение деформаций в бетонном ядре, которое обжато стальной обоймой.

Полученные результаты позволяют перейти к экспериментальным исследованиям сталебетонных конструкций различной длины и формы поперечного сечения с использованием не только наружных датчиков, но и глубинных для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций, что необходимо для дальнейшей оптимизации поперечных сечений комбинированных конструкций.

#### Литература

1. Берг О.Я. *Физические основы теории прочности бетона и железобетона* / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
2. В. Haranki. *Strength, Modulus of Elasticity, Creep and Shrinkage of Concrete* / В. Haranki // *Thesis of Master of Engineering*. – University of Florida, 2009. – 176 p.
3. Ватуля Г.Л. *Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков* / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагурия, Д. Г. Петренко // *Материалы Международной научно-практической конференции*. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – С. 375–380.
4. Ватуля Г.Л. *Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков* / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагурия, Д. Г. Петренко // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. – Харків, 2013. – Вип. № 138 – С. 231–235.
5. *Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций* / [Чихладзе Э.Д., Ватуля Г.Л., Китов Ю.П. и др.]; под ред Э.Д. Чихладзе. – Киев: Транспорт Украины, 2006. – 104 с.
6. Ватуля Г.Л. *Экспериментальные исследования сталебетонных брусьев с составной обоймой при осевом сжатии* / Г. Л. Ватуля, И. Р. Адамян // *Залізничний транспорт України*. – 2001. – №6. – С.41–44.
7. Пат. 79575 Україна, МПКG 01 В 7/16. *Глибинний тензодатчик* / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагурия, Д. Г. Петренко; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 12536; заявл. 02.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
8. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. *Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками*. – Київ: НДІБК. – 2009.
9. EN 1994-1-1 (2004): *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Brussels, 2004. – 315 p.
10. P. Bamforth. *Properties of Concrete for use in Eurocode 2. How to optimise the engineering properties of concrete in design to Eurocode 2* / P. Bamforth, J. Gibbs, T. Harrison // *The Concrete Centre Surrey*, 2008. – 53 p.
11. *Прочность и деформативность бетона средних классов по результатам испытаний* / С. Д. Семенюк, И. С. Фролков, М. Г. Мамочкина, Г. А. Дивакова // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – Могилев, 2013. – Вып. № 3 – С. 92–100.
12. Зиновьев В.Н. *Определение микротрещинообразования бетона при сжатии тензометрическим методом* / В. Н. Зиновьев // *Известия калининградского государственного технического университета*. – Калининград, 2010. – Вып. №17. – С. 118–122.

Г.Л. Ватуля, к.т.н., доцент  
Є.І. Галагурия, к.т.н., доцент  
Д.Г. Петренко, аспірант  
І.В. Биченок, студент

Українська державна академія залізничного транспорту

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАТИВНОСТІ БЕТОННИХ КОЛОН МЕТОДОМ ГЛИБИННОЇ ТЕНЗОМЕТРІЇ

Наведено результати експериментальних досліджень бетонних призм з використанням глибоких датчиків і тензорезисторів серії BX120-20AA-X. Отримано дані щодо характеру розвитку поздовжніх і поперечних деформацій на поверхні й усередині матеріалу на різних етапах навантаження.

**Ключові слова:** модуль пружності, поздовжні деформації, глибокий датчик, сталобетонні конструкції.

G. Vatulia, Ph.D., Associate Professor  
E. Galaguria, Ph.D., Associate Professor  
D. Petrenko, Graduate Student  
I. Bychenok, Student

Ukrainian State Academy of Railway Transport

## STRAIN ANALYSIS OF CONCRETE COLUMNS BY THE METHOD OF DEEP TENSOMETRY

The results of experimental researches of concrete prisms using deep sensors and strain gages series BX120-20AA-X were presented in the article. The authors obtain the data concerning the longitudinal and transverse strain behavior on the surface and inside the material at various stages of loading.

**Keywords:** modulus of elasticity, longitudinal strain, deep sensors, steel concrete structures.

Надійшла до редакції 18.09.2014

© Г.Л. Ватуля, Е.І. Галагурия, Д.Г. Петренко, І.В. Биченок