



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.45-56

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Разработка датчика напряжений твердых тел

Н.Н. Трекин^{1*}, Э.Н. Кодыш², С.Д. Шмаков^{2,3}, А.Б. Чаганов⁴, А.В. Черепанов^{2,4}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация*

² *АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Москва, Российская Федерация*

³ *Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация*

⁴ *Вятский государственный университет» (ВятГУ), Киров, Российская Федерация*

* otk@yandex.ru

Ключевые слова: датчик напряжения, эксперимент, особое предельное состояние, железобетонные конструкции

История статьи

Поступила в редакцию: 24.08.2023

Доработана: 23.10.2023

Принята к публикации: 30.10.2023

Для цитирования

Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д., Чаганов А.Б., Черепанов А.В. Разработка датчика напряжений твердых тел // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 1. № 5. С. 45–56.

Аннотация. В публикации представлены результаты опытного конструирования корпуса закладного датчика напряжений, позволяющего определять напряжения в сечении масштабных лабораторных монолитных конструкций, выполненных на основе минеральных и полимерных вяжущих (бетон, гипс и т.п.). Задачами конструирования являлась разработка конструктивного решения корпуса датчика напряжения на основе тензорезисторов, имеющего малые размеры, низкую стоимость изготовления, а также высокую разрешающую способность и стабильность показаний на всем участке чувствительности (напряжение до 400 кг/см²).

Датчик напряжения позволяет с высокой точностью определять напряжение в лабораторных конструкциях, не оказывая значительного влияния на напряженно-деформированное состояние сечения на разных этапах работы конструктивного элемента.

Трекин Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4721-2525, e-mail: otk@yandex.ru.

Эмиль Наумович Кодыш, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46, корп. 2; eLIBRARY SPIN-код: 1559-5834, e-mail: otk@yandex.ru.

Сергей Дмитриевич Шмаков, аспирант, младший научный сотрудник отдела конструктивных систем № 1, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46, корп. 2; eLIBRARY SPIN-код: 9869-1115, e-mail: sergey3456789@gmail.com.

Алексей Борисович Чаганов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства, ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет» (ВятГУ), 610000, Кировская область, г. Киров, ул. Московская, д. 36; eLIBRARY SPIN-код: 3395-2629, e-mail: chabpilot@yandex.ru.

Андрей Викторович Черепанов, аспирант, ведущий инженер-конструктор отдела конструктивных систем № 2, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46, корп. 2; eLIBRARY SPIN-код: 8360-9637, e-mail: a.cherepanov@cniipz.com.

© Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д., Чаганов А.Б., Черепанов А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Development of a Stress Sensor for Solids

N.N. Trekin^{1*}, E.N. Kodysh², S.D. Shmakov^{2,3}, A.B. Chaganov⁴, A.V. Cherepanov^{2,4}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

² Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Moscow, Russian Federation

³ Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

⁴ Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

* otk@yandex.ru

Keywords: stress sensor, experiment, special limit state, reinforced concrete structures

Article history

Received: 24.08.2023

Revised: 23.10.2023

Accepted: 30.10.2023

For citation

Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Cherepanov A.V. Development of a Stress Sensor for Solids. *Reinforced concrete structures*. 2024; 1(5):45-56.

Abstract. The paper presents the results of experimental design of a cortex of the embedded stress sensor, which allows to determine stresses in the cross-section of large-scale laboratory monolithic structures made on the basis of mineral and polymer binders (concrete, gypsum, etc.). The objectives of the design were to develop a constructive solution of the stress sensor housing based on strain gauges, which has small dimensions, low manufacturing cost, as well as high resolution and stability of readings over the entire sensitivity area (stress up to 400 kgf/cm²). The stress sensor allows to determine the stress in laboratory structures with high accuracy, without significantly affecting the stress-strain state of the section at different stages of operation of the structural element.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения приобретает особую актуальность ввиду участвовавших в последние десятилетия случаев воздействий на конструкции зданий и сооружений, не предусмотренных нормативной документацией, приводящих к их обрушению. К подобным воздействиям можно отнести террористические акты, взрывы бытового газа и механическое разрушение опор зданий и сооружений вследствие, например, наезда автотранспорта.

Проектирование зданий и сооружений с учетом защиты от прогрессирующего обрушения приводит к удорожанию строительства. Снижению стоимости, наравне с совершенствованием конструктивных решений для защиты от прогрессирующего обрушения, способствует развитие методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на стадии, близкой к максимальной несущей способности, и стадии разрушения (разупрочнения), т.е. совершенствования критериев особого предельного состояния.

Nikolai Nikolaevich Trekin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavlshosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4721-2525, e-mail: otk@yandex.ru.

Emil Naumovich Kodysh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Scientific Officer, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Dmitrovskoe shosse, 46, building 2, Moscow 12723, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1559-5834, e-mail: otk@yandex.ru.

Sergey Dmitrievich Shmakov, PhD student, Junior Researcher, Department of Structural Systems No. 1, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Dmitrovskoe shosse, 46, building 2, Moscow 12723, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9869-1115, e-mail: sergey3456789@gmail.com.

Aleksey Borisovich Chaganov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Construction Production, Vyatka State University, 36, Moskovskaya street, Kirov city, Kirov region 610000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3395-2629, e-mail: chabpilot@yandex.ru.

Andrey Viktorovich Cherepanov, PhD student, Lead Design Engineer of Structural Systems Department No. 2, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Dmitrovskoe shosse, 46, building 2, Moscow 12723, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8360-9637, e-mail: a.cherepanov@cniipz.com.

Критерии особого предельного состояния для железобетонных конструкций, действующие в Российской Федерации, представлены в СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». Стоит отметить, что назначение критериев особого предельного состояния производилось исходя из имеющихся ограниченных экспериментальных данных, а также опыта эксплуатации, проектирования и обследования технического состояния объектов строительства [1, 2]. Ряд работ показывает, что установленные критерии содержат некоторые резервы надежности [3–13].

Однако для их уточнения необходимо проведение дополнительных исследований, позволяющих изучить изменение напряженно-деформированного состояния плоского сечения железобетонного элемента на стадии, близкой к максимальной несущей способности и за ее пределами (стадии разупрочнения).

Рассматривая работу изгибаемого железобетонного элемента, стоит отметить ряд особенностей, связанных с экспериментальным определением напряженно-деформированного состояния. В оптимально армированном сечении изгибаемого элемента напряжения бетона и арматуры будут достигать значений, близких к разрушающим, что приводит к образованию трещин, лещадок и выколу сжатых слоев бетона, расположенных в сечениях с наибольшими напряжениями. Кроме того, необходимо учитывать характер работы изгибаемых железобетонных конструкций, а именно образование так называемых «блоков» [14], когда каждое конкретное сечение имеет свое специфическое напряженно-деформированное состояние.

Оценку напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) плоского сечения целесообразно производить в «блоке», имеющем наибольшие нормальные напряжения. В настоящее время оценку напряженно-деформированного состояния (связь между механическим напряжением и возникающей деформацией) сечения производят при помощи тензометров. По принципам действия такие устройства подразделяются на механические, электрические, оптические, пневматические и акустические [15].

Применение механических тензометров для оценки НДС сечения на стадии, близкой к максимальной несущей способности конструктивного элемента, крайне осложнено, т.к. поверхность изгибаемого элемента разрушается, а применение электрических тензорезисторов, расположенных на боковой поверхности изгибаемого элемента, нецелесообразно после образования в рассматриваемом сечении лещадок и выколов бетона. Решить проблему оценки напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента позволяет применение датчиков напряжения, размещенных внутри сечения железобетонного элемента.

Датчики, предназначенные для определения напряжений внутри монолитных бетонных и железобетонных конструкций, применяются начиная со второй половины XX в., например в экспериментальной работе ЦНИИСК им. Кучеренко [16] в массивное сечение железобетонного элемента устанавливались магнитоупругие датчики (см. рис. 1).

Информации о технических характеристиках применяемого датчика, а также о методах его изготовления найти не удалось, после чего была предпринята попытка найти современное устройство заводского изготовления, пригодное для установки в сечении лабораторного образца (масштабной модели строительной конструкции). Особенности экспериментального исследования на основе масштабных (уменьшенных) моделей строительных конструкций является необходимость учета влияния размеров и формы закладных датчиков на напряженно-деформированное состояние сечения. Имеющиеся в настоящее время решения заводского изготовления (струнные закладные датчики, закладные датчики на основе тензорезисторов, например, [17, 18]), как правило, предназначены для проведения мониторинга полноразмерных строительных конструкций и не предназначены к размещению в масштабные модели опытных конструкций (не имеют нужной разрешающей способности ввиду своих габаритов, а также оказывают значимое влияние на НДС сечения).

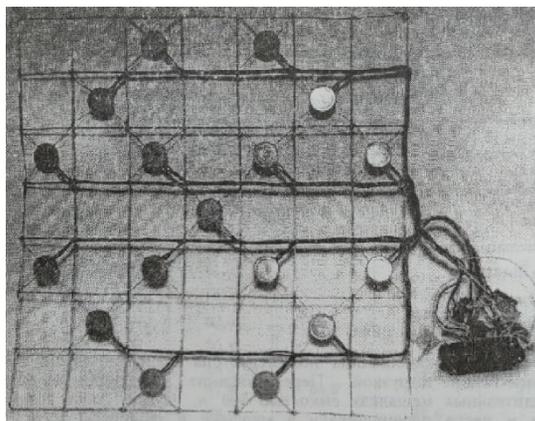


Рис. 1. Датчики напряжения типа ДК, разработанные НИИ строительства ЭССР [16]
Figure 1. Stress sensors of the DK type, developed by the Research Institute of Construction of the ESSR [16]

Отдельно необходимо отметить высокую стоимость данных датчиков и отсутствие возможности повторного применения, что в случае с лабораторными исследованиями играет значимую роль ввиду необходимости применения большого количества таких датчиков на каждой исследуемой конструкции.

МЕТОД

Экспериментальная часть

В связи с отсутствием в настоящее время конструкций заводского изготовления, подходящих по всем параметрам, была предпринята попытка разработки датчика напряжения собственной конструкции на основе тензорезисторов.

При разработке корпуса была рассмотрена гипотеза, что наиболее простым и надежным решением будет являться размещение тензорезистора внутри упругого корпуса из однородного компаунда (эпоксидной смолы). Равномерные деформации корпуса, а соответственно и тензорезистора, должны приводить к высокой стабильности показаний датчика напряжения. Малые размеры и толщина тензорезистора позволяли изготовить датчик малых габаритов, что практически исключало влияние такого датчика напряжения на НДС сечения лабораторной конструкции, а также позволяло практически полностью исключать изгибную деформацию датчика, поскольку в этом случае интерпретация измерений существенно осложнялась.

Конструкция датчика, отвечающая рассмотренным требованиям, представляла из себя цилиндр из эпоксидной смолы диаметром 10 мм и высотой 8 мм, внутри которого поперек был размещен тензорезистор с базой $3 \times 1,5$ мм. Круглая форма корпуса датчика была принята с целью обеспечения равномерности деформаций. Габаритные размеры корпуса датчика обусловлены габаритными размерами применяемых тензорезисторов. Тензорезистор, размещенный внутри корпуса поперек, при продольном деформировании корпуса (касательных напряжениях) деформировался исключительно в своем продольном направлении (растягивался, либо сжимался), что также облегчало интерпретацию получаемых данных. Высота корпуса, приближенная по значению к диаметру, обеспечивала снижение изгибных деформаций.

В качестве компаунда при изготовлении корпуса датчика была выбрана эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Выбор данных материалов был обусловлен: легкодоступностью и их низкой стоимостью; технологичностью (отверждение смолы производилось без термической обработки); диэлектрическими свойствами; химической устойчивостью к компонентам бетона [19], а также механическими свойствами полимеризованного материала (разрушающее напряжение при сжатии — до 113 МПа, модуль упругости 2500–3500 МПа [20]).

Было изготовлено 15 датчиков первой партии. При их изготовлении был выявлен ряд дефектов: смещение тензорезисторов внутри корпуса датчика, возникающее в период полимеризации эпоксидной смолы сразу по нескольким осям и углам поворота; отклонение от плоскости одной из поверхностей датчика (примерно в 40 % случаев); непостоянство структуры полимеризованной смолы (была выявлена при подсвечивании корпуса датчика лазером); инородные включения (пыль, вовлеченные пузырьки воздуха).

Для проверки работоспособности датчиков, а также влияния выявленных дефектов была проведена тарировка датчиков известным весом.

В ходе анализа результатов было выявлено, что смещение тензорезистора внутри корпуса датчика оказывает наибольшее влияние на полученные результаты. Для исключения данного фактора был разработан кондуктор для фиксации положения тензорезистора внутри корпуса (см. рис. 2).



Рис. 2. Кондуктор для фиксации положения тензорезистора внутри корпуса: *a* — тензорезистор внутри кондуктора; *b* — готовые датчики с кондуктором

Figure 2. A conductor for fixing the position of the strain gauge inside the cage: *a* — a strain gauge inside the conductor; *b* — ready-made sensors with a conductor

Данное конструктивное решение также было проверено при тарировании известным весом, а также на испытательных образцах в виде бетонных призм $100 \times 100 \times 300$ мм и кубов $100 \times 100 \times 100$ мм, выполняемых для определения класса бетона по прочности. Производилось по 3 нагружения каждой призмы до значения нагрузки 8 тонн. Показания тензорезисторов при испытаниях фиксировались прибором Терем-4.0. Нагружение производилось на прессе П-50. Результаты испытания представлены на рис. 3.

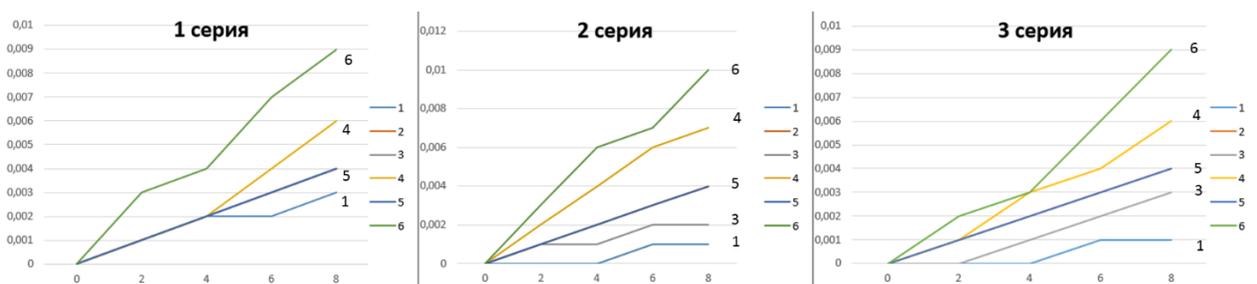


Рис. 3. Показания датчиков с кондуктором (по горизонтали — нагрузка в тоннах, по вертикали — условные единицы, показания тензостанции)

Figure 3. Sensor readings with a conductor (horizontally — load in tons, vertically — conventional units, load station readings)

Анализ полученных данных привел к следующим выводам:

1. Большинство датчиков показывают нелинейные приращения при линейном нагружении.

2. Все типы датчиков демонстрируют нерегулярность показаний. Одни и те же датчики показывают разные значения при одинаковых нагрузках в последовательных испытаниях.

Предпринятые усилия по улучшению сходимости показателей при тарировании значительных результатов не дали. По причине значительной сложности при работе с полимерными смолами, а также невозможности получения качественного и стабильного (повторяемого) результата при изготовлении корпусов в имеющихся условиях лаборатории было принято решение об отказе от данного материала.

Работа со смолой позволила выработать ряд требований к материалу и конструкции датчика напряжения:

- высокая повторяемость физических и механических свойств корпуса датчика, необходимая для получения стабильных показателей напряжения от образца к образцу;
- высокая конструктивная прочность материала и корпуса датчика, предназначенного для работы при напряжениях, равных 400 кг/см^2 и выше;
- низкая стоимость изготовления и возможность легкой механической обработки материала.

Рассматривая данные факторы, было принято решение о применении металлических сплавов, а именно дюралюминия марки «Д16Т».

Применение металлического сплава означало невозможность размещения тензорезистора внутри корпуса датчика с соблюдением равномерного контакта между корпусом и пластиной тензорезистора. Рассматривая готовые металлические профили, доступные для приобретения, в качестве основы корпуса было принято решение использовать круг диаметром 12 мм и высотой 14 мм. Геометрические размеры корпуса датчика, как и в случае с корпусом из эпоксидной смолы, были обусловлены геометрическими размерами тензорезистора и технологическими особенностями его наклейки и размещения проводов. Учитывая различия в модуле упругости бетона и дюралюминия, было принято решение о теоретической проверке влияния датчиков на НДС сечения. В среде SCAD Office методом конечных элементов производилось моделирование испытания бетонной призмы сечением $100 \times 100 \text{ мм}$ на сжатие. Максимальная сжимающая нагрузка, приложенная равномерно, составляла 200 кг/см^2 .

Проведенное исследование показало, что влияние датчиков статистически незначимо (см. рис. 4–6). Расчет производился в линейной постановке.

Была изготовлена партия датчиков, представляющих из себя цилиндр с наклеенным на него в продольном направлении тензорезистором. Тарирование датчиков данной конструкции известным весом показало высокую стабильность результатов показаний, однако была отмечена потребность в повышении чувствительности датчика без увеличения габаритных размеров датчика.

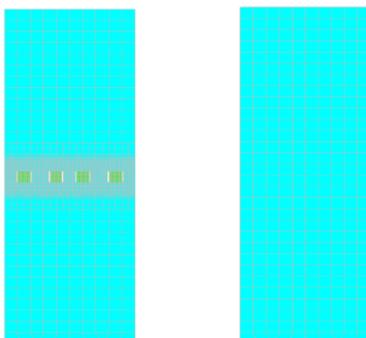


Рис. 4. Расчетные схемы призм с датчиками и без них

Figure 4. Calculation schemes of prisms with and without sensors

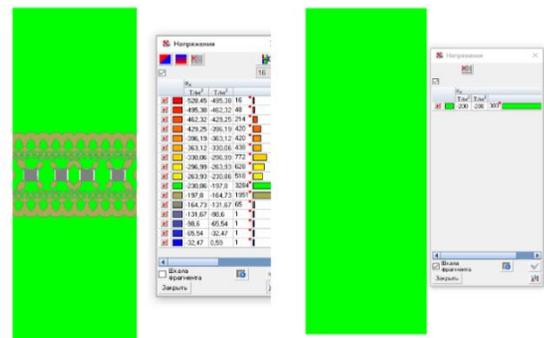


Рис. 5. Внутренние напряжения в призмах с датчиками и без них

Figure 5. Internal stresses in prisms with and without sensors

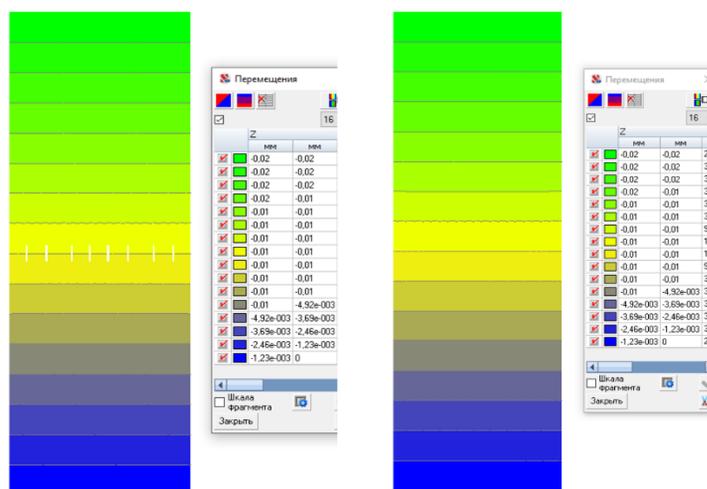


Рис. 6. Перемещения в призмах с датчиками и без них
Figure 6. Movements in prisms with and without sensors

Рассматривая применяемые в промышленности тензодатчики, было отмечено, что практически все конструктивные решения имеют места ослабленного сечения, которые являются естественными концентраторами деформаций, где и располагают тензорезисторы, тем самым значительно увеличивая чувствительность датчика (см. рис. 7).

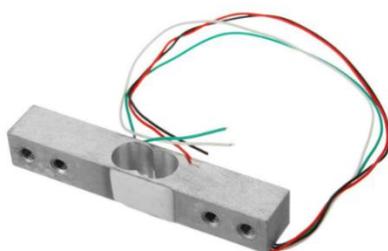


Рис. 7. Тензодатчик с зоной концентрации деформации
Figure 7. Strain gauge with strain concentration zone

Для повышения чувствительности датчика напряжения было использовано конструктивное решение в виде цилиндра переменного сечения, напоминающее по форме песочные часы, т.е. в дюралюминиевом цилиндре была выполнена проточка шейки, расположенной посередине сечения (см. рис. 8), на которой и располагался тензорезистор.



Рис. 8. Внешний вид датчика:
a — датчик с постоянным сечением; *b* — датчик переменного сечения
Figure 8. Sensor appearance:
a — a sensor with a constant cross-section; *b* — a sensor with a variable cross-section

Для теоретической проверки работоспособности конструктивного решения в ПК Midas было выполнено численное моделирование деформирования образца методом конечных элементов. Моделирование производилось на примере сжатия бетонной призмы сечением 100×100 мм и максимальной сжимающей нагрузки 1000 кг/см^2 . Расчет проводился в трехмерной нелинейной постановке. Результат расчета подтвердил гипотезу о том, что в датчике постоянного сечения деформации распределяются практически равномерно, в то время как в датчике с переменным сечением деформации концентрируются в зоне «шейки» (см. рис. 9).

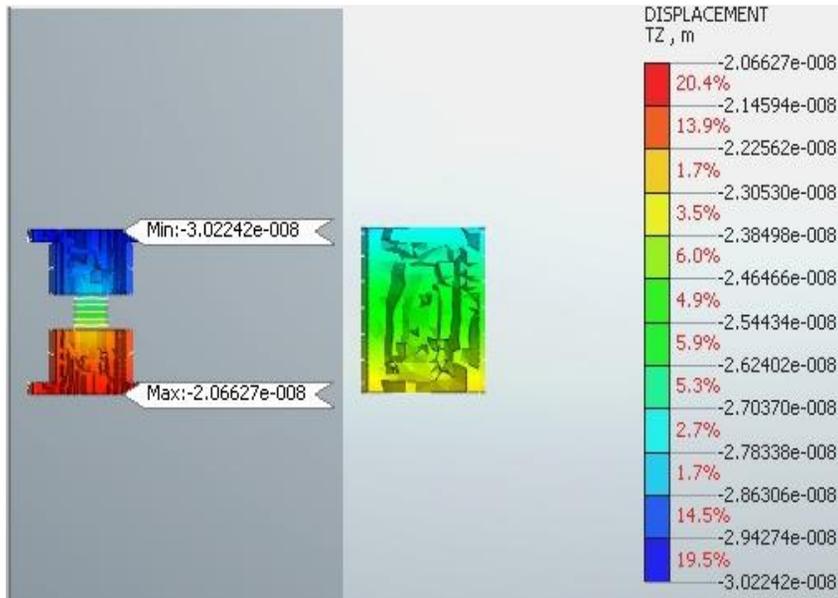


Рис. 9. Результаты численного моделирования формы датчика напряжения
Figure 9. Results of numerical simulation of the shape of the voltage sensor

Рассматриваемые образцы датчика были испытаны в кубах из высокопрочного гипса марки Г-16 размерами $100 \times 100 \times 100$ мм. Для проведения эксперимента были подготовлены два типа датчиков напряжения:

1 — датчики, выполненные в форме цилиндра из дюралюминия, у которого были отфрезерованы две противоположные продольные грани, предназначенные для повышения качества наклейки тензорезисторов (см. рис. 8, а);

2 — датчики в форме «песочные часы», имеющие площадку («шейку») повышенной деформативности размерами $3 \times 3 \times 5$ мм (глубина \times ширина \times высота) (см. рис. 8, б).

Конструкция выточенной шейки корпуса позволяла разместить тензорезисторы только поперек направления деформирования, что привело к снижению чувствительности тензорезистора в 2,94 раза (коэффициент Пуассона дюралюминия равен 0,34) и было скорректировано в следующей партии датчиков.

Перед заливкой датчиков в кубы производилось их тарирование статической нагрузкой с применением динамометра. Тарирование производилось ступенчатым нагружением датчика до нагрузок в 60 кгс/см^2 по циклу «загружение – разгружение» (см. рис. 10). После отбора датчиков с наиболее стабильными показателями производилась их заливка в гипсовые кубы. Для исключения возможности перемещения датчиков при заливке формы был разработан кондуктор для их позиционирования, изготовленный методом FDM из пластика ABS (см. рис. 11).

Датчики фиксировались в кондукторе по два и размещались внутри опалубочной формы (см. рис. 12). После набора прочности в течение суток проводились испытания на сжатие по циклу «загружение – разгружение» до нагрузок в 180 кгс/см^2 . Полученные данные приведены на рис. 13, 14.

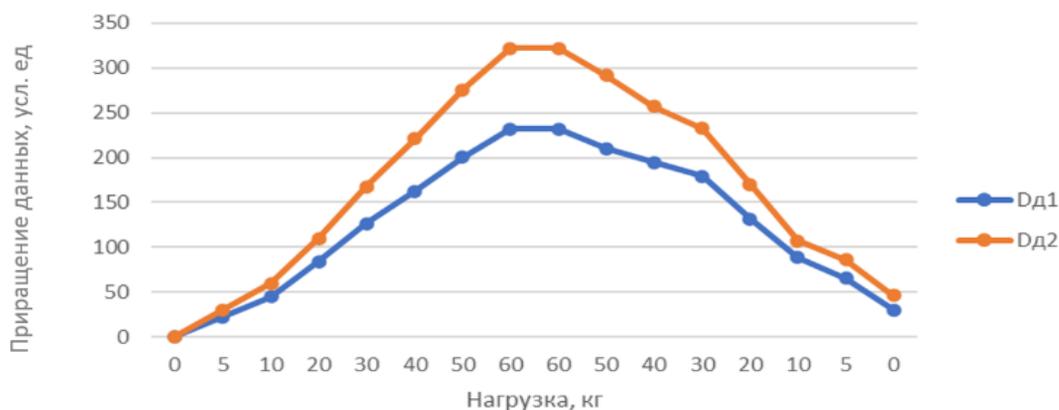


Рис. 10. График показаний датчика Д6 в ходе тарирования
Figure 10. Graph of D6 sensor readings during calibration

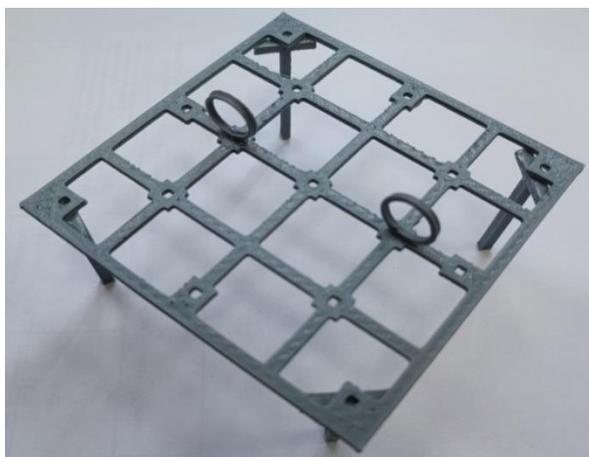


Рис. 11. Кондуктор для позиционирования датчиков давления

Figure 11. Conductor for positioning pressure sensors



Рис. 12. Датчики в кондукторе внутри опалубочной формы (в процессе заливки)

Figure 12. Sensors in the conductor inside the form-work mold (in the process of pouring)

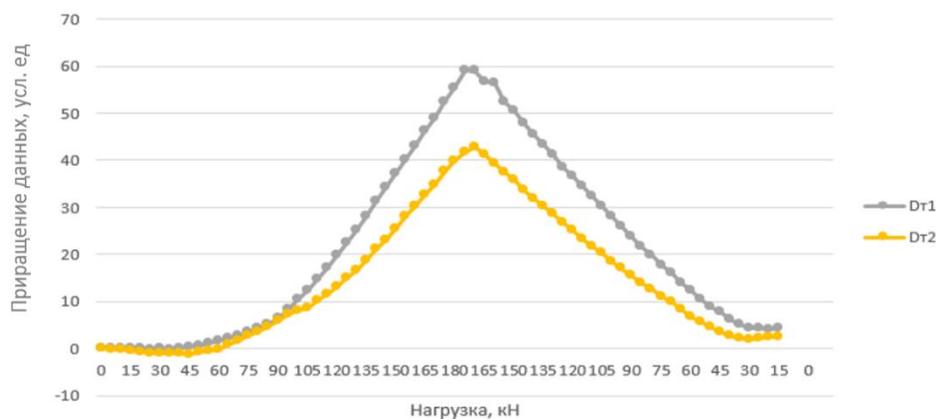


Рис. 13. График приращений показаний прибора при испытании по циклу «нагрузка – разгрузка» датчика постоянного сечения Д3 (в условных единицах)

Figure 13. Graph of increments of instrument readings during testing according to the “loading – unloading” cycle of a sensor of constant cross section D3 (in conventional units)

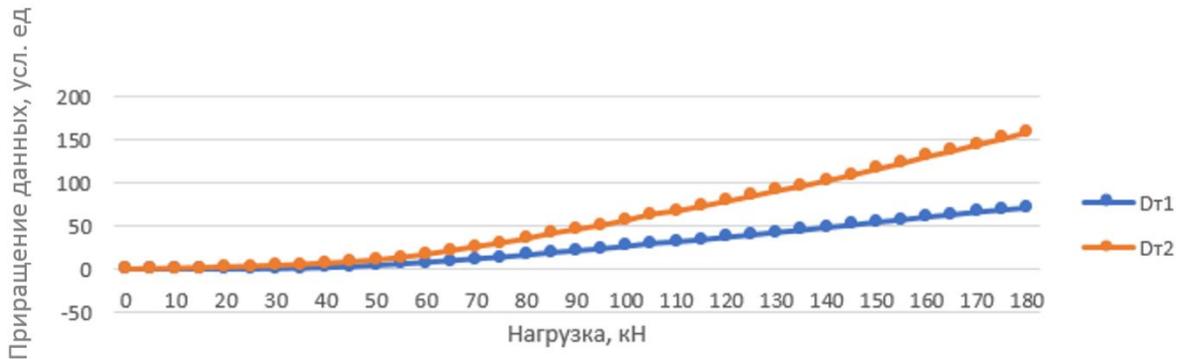


Рис. 14. График приращений показаний прибора при испытании по циклу «нагружение» датчика переменного Д7 (в условных единицах)

Figure 14. Graph of increments of instrument readings during testing according to the “loading” cycle of the variable cross section sensor D7 (in conventional units)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано и проверено конструктивное решение корпуса датчика напряжения на основе тензорезисторов, имеющее малые размеры, низкую стоимость изготовления, высокую разрешающую способность и стабильность показаний на всем участке чувствительности (напряжение до 400 кгс/см²).

Представлены конструктивные решения датчика напряжений с постоянным и переменным сечением. Отличаясь повышенной трудоемкостью изготовления, последнее решение имеет значительно большую чувствительность в сравнении с датчиком постоянного сечения (более чем 3-кратное).

Разработанные датчики напряжения имеют по два тензорезистора на противоположных гранях и перед заливкой тарируются с получением соответствующих коэффициентов для каждого из тензорезисторов (см. рис. 10), что обеспечивает возможность интерпретации данных, получаемых при работе в строительной конструкции, несмотря на некоторые отклонения на графиках. Применение тарировочных коэффициентов показывает, что суммарный разброс показателей «Условные единицы – нагрузка» составляет не более 10 %.

Для проведения исследования напряженно-деформированного состояния сечения изгибаемых элементов планируется применять датчики с зоной повышенных деформаций с продольным размещением тензорезисторов, обеспечивающих высокую чувствительность и хорошее качество изготовления данного типа датчика напряжения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность коллективу ПАО «Кировский завод “Маяк”», а также лично Шигапову Александру Харисовичу за оказанную помощь в изготовлении опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the Criteria of Deformation in a Special Limiting State // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. No. 1. Pp. 108–116. DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116
2. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4–9.
3. Taheri M., Sani H.P. Investigation of nonlinear behavior of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel haunch bracing under progressive collapse // Journal of Structural and Construction Engineering. 2021. No. 8. Pp. 296–313.

4. Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1. С. 18–28. DOI 10.33979/2073-7416-2022-99-1-18-28
5. Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запрельных состояниях при особых воздействиях // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. № 4. С. 297–306.
6. Lew H.S., Main J.A., Bao Y., Sadek F., Chiarito V.P., Robert S.D., Torres J.O. Performance of precast concrete moment frames subjected to column removal: Part 1, experimental study // *PCI Journal*. 2017. Vol. 62. No. 5. Pp. 35–52.
7. Thonstad Travis, Weigand Jonathan, Bao Yihai, Main Joseph A. New Connections for Enhancing Robustness of Precast Concrete Frame Structures // *Convention and National Bridge Conference*. Denver. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/335368557_New_Connections_for_Enhancing_Robustness_of_Precast_Concrete_Frame_Structures
8. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiyh O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. URL: https://www.researchgate.net/publication/330026713_Analysis_of_reinforced_concrete_space_frame_deformation_with_composite_sections_elements. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012033
9. Russell J. Progressive Collapse of Reinforced Concrete Flat Slab Structures // *Nottingham*. 2015. 219 p.
10. Qian Kai, Wang Dong-Fang, Huang Ting, Weng Yun-Hao. Initial damage and residual behavior of RC beam-slab structures following sudden column removal — numerical study // *Research Journal of The Institution of Structural Engineers*. 2022. Vol. 36. Pp. 650–664. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.036
11. Плотников А.И. Динамика упругопластических железобетонных балок при действии интенсивных кратковременных нагрузок аварийного характера : дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 375 с.
12. Гуца Ю.П. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при работе стержневой арматуры в упругопластической стадии : дис. ... канд. техн. наук. М. : НИИЖБ, 1967.
13. Арсланбеков М.М. Исследование прочности, трещиностойкости и жесткости железобетонных изгибаемых элементов со смешанным армированием : дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 166 с.
14. Михайлов К.В., Дмитриев С.А. Теория железобетона. М. : Стройиздат, 1971. 185 с.
15. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. М. : Машиностроение, 1990. 224 с.
16. Матков Н.Г. Сопrotивление сталеполимербетонных конструкций и их стыков. М. : Воентехлит, 1999. 164 с.
17. Накладной струнный тензометр EWV SCIBIM. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/>
18. Датчик механической деформации ZET 901. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/zet-901/>
19. Научно-производственное предприятие Химэкс. URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smolye-aktivnyie-razbaviteli/>
20. Воронков А.Г., Ярцев В.П. Эпоксидные полимеррастворы для ремонта и защиты строительных изделий и конструкций. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. 92 с.

REFERENCES

1. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the Criteria of Deformation in a Special Limiting State. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(1):108-116. DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116
2. Trekin N.N., Kodysh E.N. The special limiting state of reinforced concrete structures and its rationing. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 5:4-9. (rus.)
3. Taheri M., Sani H.P. Investigation of nonlinear behavior of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel haunch bracing under progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2021; 8:296-313.
4. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Korenkov P.A. Deformation and destruction of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with inclined rods under special influences. *Building and reconstruction*. 2022; 1:18-28. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-18-28 (rus.)
5. Kolchunov V.I., Bushova O.B. Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022; 4: 297-306. (rus.)
6. Lew H.S., Main J.A., Bao Y., Sadek F., Chiarito V.P., Robert S.D., Torres J.O. Performance of precast concrete moment frames subjected to column removal: Part 1, experimental study. *PCI Journal*. 2017; 62(5):35-52.
7. Thonstad Travis, Weigand Jonathan, Bao Yihai, Main Joseph A. New Connections for Enhancing Robustness of Precast Concrete Frame Structures. *Convention and National Bridge Conference*. Denver, 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/335368557_New_Connections_for_Enhancing_Robustness_of_Precast_Concrete_Frame_Structures

8. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiy O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012033
9. Russell J. Progressive Collapse of Reinforced Concrete Flat Slab Structures. *Nottingham*. 2015; 219.
10. Qian Kai, Wang Dong-Fang, Huang Ting, Weng Yun-Hao. Initial damage and residual behavior of RC beam-slab structures following sudden column removal — numerical study. *Research Journal of The Institution of Structural Engineers*. 2022; 36:650-664. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.036
11. Plotnikov A.I. *Dynamics of elastic-plastic reinforced concrete beams under the action of intense short-term emergency loads : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow. 1994; 375. (rus.).
12. Gushcha Yu.P. *Investigation of bent reinforced concrete elements during the operation of rod reinforcement in the elastic-plastic stage : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, NII ZHB, 1967. (rus.).
13. Arslanbekov M.M. *The study of strength, crack resistance and rigidity of reinforced concrete bendable elements with mixed reinforcement : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2005; 166.
14. Mikhailov K.V., Dmitriev S.A. *Theory of reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1971; 185. (rus.).
15. Klokova N.P. *Tensoresistors: Theory, calculation methods, developments*. Moscow, Mechanical Engineering, 1990; 224. (rus.).
16. Matkov N.G. *Resistance of steel-polymer concrete structures and their joints*. Moscow, Voentehlit, 1999; 164. (rus.).
17. Attached string strain gauge EWV SCIBIM. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometrii-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/>
18. Sensor of mechanical deformation ZET 901. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometrii-i-datchiki-deformatsii/zet-901/>
19. Himex scientific and production enterprise. URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smoly-aktivnye-razbaviteli/>
20. Voronkov A.G., Yartsev V.P. *Epoxy polymer solutions for repair and protection of building products and structures*. Tambov, Publishing House of TSTU, 2006; 92. (rus.).