

УДК 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

### ***Теоретические и экспериментальные исследования***

**Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 1**

**Трекин Николай Николаевич<sup>1</sup>, Авдеев Кирилл Владимирович<sup>2</sup>,  
Кодыш Вадим Эмильевич<sup>3</sup>, Шмаков Сергей Дмитриевич<sup>2,4</sup>,  
Черепанов Андрей Викторович<sup>2,5</sup>, Тучин Михаил Александрович<sup>2</sup>,  
Чаганов Алексей Борисович<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «ЦНИИПромзданий». Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)).  
Москва, Российская Федерация

<sup>5</sup> ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет» (ВятГУ).  
Киров, Российская Федерация

**Аннотация:** В статье представлены результаты первого этапа разработки оптимальной конструкции датчика напряжения, позволяющего оценивать напряженно-деформированное состояние сечения внутри экспериментальной железобетонной конструкции. Задачей являлась разработка датчика напряжения, обладающего высокой конструктивной прочностью (способностью сохранять работоспособность при давлении более 350 кгс/см<sup>2</sup>), стабильностью результатов измерения, а также простотой изготовления. Рассмотрен опыт применения датчиков напряжения, основанных на различных физических принципах, а также представлена краткая историческая справка развития методов определения напряжений строительных конструкций зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** датчик напряжения, тензорезистор, результаты экспериментальной работы, особое предельное состояние, железобетонные конструкции

**Для цитирования:** Трекин Н.Н., Авдеев К.В., Кодыш В.Э., Шмаков С.Д., Черепанов А.В., Тучин М.А., Чаганов А.Б. Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 1 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 45–58.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

### ***Theoretical and experimental studies***

**Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1**

**Trekin Nikolai N.<sup>1</sup>, Avdeev Kirill V.<sup>2</sup>, Kodysh Vadim E.<sup>3</sup>,  
Shmakov Sergey D.<sup>2,4</sup>, Cherepanov Andrey V.<sup>2,5</sup>,  
Tuchin Mikhail A.<sup>2</sup>, Chaganov Aleksey B.<sup>5</sup>**

@ N.N. Trekin, K.V. Avdeev, V.E. Kodysh, S.D. Shmakov, A.V. Cherepanov, M.A. Tuchin, A.B. Chaganov, 2023

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions. Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Scientific Research Center «Construction». Moscow. Russian Federation

<sup>4</sup> Russian university of transport (МИИТ). Moscow, Russian Federation

<sup>5</sup> Vyatka State University. Kirov, Russian Federation

**Abstract:** The article presents the results of the first stage of the development of the optimal design of the stress sensor, which allows to evaluate the stress-strain state of the section inside the experimental reinforced concrete structure. The task was to develop a voltage sensor with high structural strength (the ability to maintain operability at a pressure of more than 350 kg / cm<sup>2</sup>), stability of measurement results, as well as ease of manufacture. The experience of using voltage sensors based on various physical principles is considered, as well as a brief historical background of the development of methods for determining the stresses of building structures of buildings and structures is presented.

**Keywords:** voltage sensor, strain gauge, experimental results, special limit state, reinforced concrete structures

**For citation:** Trekin N.N., Avdeev K.V., Kodysh V.E., Shmakov S.D., Cherepanov A.V., Tuchin M.A., Chaganov A.B. Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 45–58. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

## Введение

Большие человеческие жертвы и огромный материальный ущерб, возникающие при землетрясении, вынуждают инженерное сообщество искать решения, позволяющие воспринимать особые воздействия. Одни из первых попыток учета и систематизации сейсмических воздействий в строительных нормах отмечаются в начале 20-го века [1]. Постоянное совершенствование нормативных документов в части учета особых нагрузок и воздействий, включая сейсмические (в РФ – СП 14.13330 «Строительство в сейсмических районах» [2]), позволяет обеспечивать необходимую надежность и безопасность объектов строительства. Однако, применение специализированных конструктивных решений, а также учет дополнительных воздействий при проектировании защиты таких объектов повышают стоимость строительства. Уточнение сейсмичности районов в сторону повышения, а также изменение норм расчета защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий приводит к тому, что построенные ранее объекты строительства не соответствуют действующим нормам, что особенно актуально при реконструкции зданий и сооружений. Снижение стоимости защиты зданий и сооружений в этих районах при сейсмических воздействиях, особенно в условиях проведения реконструкции, может быть достигнуто двумя путями: 1 – обязательной реконструкцией путей эвакуации, в т.ч. на этапе проведения капитального ремонта, что гораздо экономичнее, чем усиление всех несущих конструкций объекта строительства (зачастую, сплошное усиление бывает либо невозможно, либо экономически нецелесообразно в сравнении со сносом объекта и последующим новым его строительством на данном месте); 2 – поиск внутренних резервов, за счет учета работы конструктивных элементов в особом предельном состоянии, учет которого допускается,

например, при взрывных воздействиях.

В действующих нормативных документах, регламентирующих особые воздействия, например, таких, как СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» [3] предложены некоторые критерии особого предельного состояния для железобетонных конструкций, которые назначены исходя из имеющейся практики проектирования, эксплуатации, опыта обследования технического состояния конструкций, а также экспериментальных исследований. Для уточнения критериев особого предельного состояния железобетонных конструкций необходимо проведение экспериментальных исследований, позволяющих изучить изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) плоского сечения изгибаемого железобетонного элемента на стадии близкой к максимальной несущей способности и за ее пределами (стадии разупрочнения). Особенности определения НДС сечения на стадии разупрочнения будут рассмотрены ниже.

Практический метод экспериментального определения механических напряжений открыт Робертом Гуком в 1678 году. Он обнаружил связь между механическим напряжением и возникающей деформацией. Эта деформация также возникает на поверхности объектов и поэтому доступна для измерения.

В дальнейшем, совокупность экспериментальных методов определения механического напряжения детали или конструкции, основанных на измерении деформаций или других параметров материала, вызванных механическим напряжением, стали называть тензометрией, а приборы, предназначенные для измерения деформаций – тензомерами. Тензомеры по принципам действия подразделяются на механические, электрические, оптические, пневматические и акустические.

В начале 20-го века при оценке напряженно-деформированного состояния строительных конструкций применялись громоздкие механические устройства (тензомеры), которые отображали напряжение, используя отношение рычага один к тысяче или более. К недостаткам применения данного технического решения можно отнести возможность наблюдения только статических процессов, необходимость применения сложных приспособлений для фиксации тензомеров, предотвращающих скольжение устройств в условиях вибрации, необходимость размещения испытуемого образца в прямой видимости наблюдателя для считывания показателей и т.п.

Начиная со второй половины 30-х годов 20-го века [4], развитие техники позволило массово применить электрические тензорезисторы, практически лишенные вышеперечисленных недостатков механических тензомеров.

Рассматривая работу изгибаемого элемента на стадии, близкой к его максимальной несущей способности, стоит отметить ряд особенностей проведения экспериментальной работы: нормально армированное сечение железобетонного изгибаемого элемента имеет напряжения бетона и арматуры, близкие к разрушающим, что приводит к образованию трещин, лещадок и выколу сжатых слоев бетона, расположенных в сечениях с наибольшими напряжениями. Изгибаемый элемент на стадии, близкой к максимальной несущей способности, из-за раскрытия трещин в растянутой его части может рассматриваться как элемент, разделенный на «упругие блоки», в результате чего возникает ситуация, когда каждое конкретное сечение имеет свое специфическое напряженно-деформированное состояние [5]. Оценку НДС сечения целесообразно производить в «блоке», имеющем наибольшие напряжения. Применение механических тензомеров для оценки НДС сечения крайне осложнено, т.к. поверхность изгибаемого элемента разрушается, а применение электрических тензорезисторов, расположенных на боковой поверхности изгибаемого элемента нецелесообразно после образования в рассматриваемом сечении выколов бетона. Решить проблему оценки напряженно-

деформированного состояния изгибаемого элемента позволяет применение датчиков напряжения, размещенных внутри сечения железобетонного элемента.

Для фиксации напряжений внутри сечения железобетонного элемента, а соответственно и определения изменения высоты сжатой зоны плоского сечения изгибаемого элемента целесообразна разработка датчиков напряжения малого размера, конструкция которых позволяет осуществить их размещение внутри сечения масштабных моделей опытных конструкций.

При выборе оптимальной конструкции датчиков напряжения были рассмотрены датчики, работающие на различных физических принципах. Пьезокерамические датчики, датчики, основанные на эффекте магнитоупругости, струнные (частотные), а также датчики с применением тензорезисторов. При выборе конструкции датчика напряжения был изучен опыт реализации аналогичного технического решения, применяемого в экспериментальных работах ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [6], где в массивное сечение железобетонного элемента устанавливались магнитоупругие датчики (рис. 1).

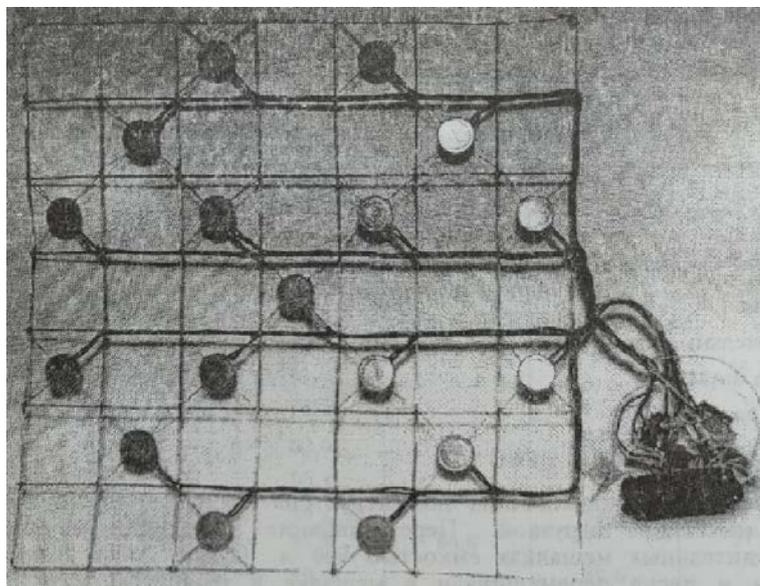


Рисунок 1 – Датчики напряжения типа ДК, разработанные НИИ строительства СССР [6]

Figure 1 – DC type voltage sensors developed by the Research Institute of Construction of the USSR [6]

В работе не описана номенклатура датчиков и их устройство. Поиск аналогов среди существующих образцов результатов не дал.

Была предпринята попытка найти среди современных решений устройство, позволяющее определять напряжения в сечении лабораторного образца (масштабной модели строительной конструкции). Особенности экспериментального исследования на основе масштабных (уменьшенных) моделей является необходимость учета влияния размеров и формы закладных датчиков на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Результаты анализа представлены в таблице 1. В таблицу не вошли различные варианты датчиков для поверхностного измерения напряжений (тензорезисторные, индукционные и кварцевые) по описанным выше причинам. Также в таблицу не вошли устройства, не имеющие применения и не производящиеся в настоящее время. (пьезокерамические датчики, датчики на основе магнитоупругости).

В ходе анализа было выявлено, что несмотря на имеющиеся отработанные решения, все они разрабатывались в первую очередь для мониторинга работы полноразмерных конструкций, и не имеют нужной разрешающей способности ввиду своих габаритов. Необходимо отметить высокую стоимость данных датчиков и отсутствие возможности повторного применения, что не является значимым фактором при осуществлении мониторинга строительных конструкций (приборы, применяемые при дистанционном мониторинге эксплуатационной надежности зданий представлены в [7–8]). В случае проведения серии лабораторных испытаний по разрушению конструктивных элементов, стоимость датчика играет значимую роль, ввиду необходимости применения большого их количества на каждой исследуемой конструкции.

Таблица 1. Современные типы датчиков, используемые для измерения напряжений в бетоне

Table 1. Modern types of sensors used to measure stresses in concrete

Тип (описание)	Габариты*, мм	Изображение
Струнные закладные датчики. (Конструктивно выполнены из двух концевых частей, соединенных трубкой, которая защищает кусок стальной проволоки. Оба конца имеют плоский круглый фланец, позволяющий передавать деформацию бетона на проволоку. В центре тензометра установлен электромагнитный датчик. Возникающая в бетоне деформация изменяет его резонансную частоту, которую считывает электромагнитный датчик) [9]	d15,9 x 50 мм	
Закладной датчик, на основе тензорезисторов. (Датчик представляет собой металлический вал с фланцем. На валу размещены тензорезисторы, подключенные по мостовой схеме, герметично защищенные пластиковым корпусом) [10]	d25 x 100 мм	

\*Указаны минимальные габариты датчиков среди известных решений

### Выбор конструктивного решения датчика напряжения на основе тензорезисторов

В связи с отсутствием датчиков, пригодных для определения напряжений в сечении масштабных конструктивных элементов, была предпринята попытка разработки корпуса датчика собственной конструкции на основе тензорезисторов. В ходе первоначального конструирования рассматривалась гипотеза, что оптимальной с точки

зрения простоты, технологичности и надежности, будет конструкция датчика в виде тензорезистора, расположенного внутри упругого корпуса из однородного компаунда, равномерно сопряженного с тензорезистором, имеющим минимальные размеры, позволяющие объективно оценить деформации (напряжения) в сечении. В этом случае деформации корпуса датчика, расположенного внутри сечения монолитной конструкции (например, бетонной), должны вызывать равномерные деформации тензорезистора. Также, с точки зрения снижения погрешностей измерения, было необходимо исключить изгибную деформацию датчика, поскольку в этом случае интерпретация изменения сопротивления тензорезистора осложняется.

Принимая во внимание изложенные соображения, первоначальная конструкция датчика представляла собой цилиндр диаметром 10 мм и высотой 8 мм из эпоксидной смолы с расположенным внутри него в горизонтальной плоскости тензорезистором с базой 3 x 1,5 мм. Круглая форма датчика была принята с целью обеспечения равномерности деформаций корпуса. Диаметр корпуса обусловлен минимально возможной величиной для технологичного расположения тензорезистора (подложка тензорезистора имеет размер 6 x 4 мм). Поперечное расположение тензорезистора (перпендикулярное для продольной оси железобетонной конструкции), было выбрано исходя из того, что при деформации датчика вдоль продольной оси обеспечиваются деформации тензорезистора исключительно на растяжение и сжатие, что было бы сложно обеспечить при его вертикальном расположении. Высота, приближенная по значению к диаметру, обеспечивает снижение изгибных деформаций.

В качестве материала изготовления была выбрана эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Выбор данных материалов был обусловлен:

- 1) легкодоступностью данных материалов и их низкой стоимостью;
- 2) технологичностью (отсутствие необходимости термической обработки при отверждении) [11];
- 3) диэлектрическими свойствами, благодаря которым отпадала необходимость в дополнительной изоляции тензорезистора [11];
- 4) химической устойчивостью к компонентам бетона [11];
- 5) механическими свойствами – разрушающее напряжение при сжатии – до 113 МПа, модуль упругости 2500 – 3500 МПа [12].

В качестве пробной партии было изготовлено 15 датчиков.

При изготовлении первой партии был выявлен ряд дефектов:

- 1) Систематическое смещение тензорезисторов внутри корпуса датчика хаотичным образом, возникающее в период полимеризации эпоксидной смолы как правило сразу по нескольким осям и углам поворота (рис. 2);
- 2) Одна из поверхностей датчиков (примерно в 40% случаев) оказывалась отличной от плоскости (рис. 3 – 4);
- 3) Неравномерность структуры полимеризованной смолы была выявлена при подсвечивании корпуса датчика лазером (532 нм) (рис. 5);
- 4) Пузырьки вовлеченного воздуха (рис. 6 – 7);
- 5) Инородные включения (пыль) (рис. 7).

Смещение датчиков объясняется тем, что будучи изначально выставленным в нужную позицию, тензорезистор смещался в ходе отверждения смоляной массы при её перераспределении внутри формы и выхода вовлеченного в ходе перемешивания воздуха.

Искажение плоской формы (рис. 3 – 4) поверхности было связано с тем, что заливочная форма не имела крышки, а текучесть смолы оказалась недостаточной для стабильного самовыравнивания.

Неравномерность структуры (рис. 5), вероятно, объясняется особенностями отверждения смолы.

Наличие пузырьков воздуха и пыли в смоле объясняется условиями производства датчиков.

Для проверки работоспособности изделия и выявления наиболее существенных дефектов, была проведена тарировка датчиков. Тарировка проводилась ступенчатым нагружением датчиков известным весом. Результаты представлены на рис. 8 – 9.

В ходе анализа результатов тарировки было выявлено, что смещение тензорезистора внутри корпуса датчика оказывает наибольшее негативное влияние на стабильность показаний тензорезисторов. В случаях, когда при тарировании выявлялось резкое изменение показателей датчика, были выявлены трещины корпуса, выполненного из смолы, что свидетельствует о низкой механической прочности и склонности к хрупкому разрушения данного материала.

Т.к. из всех выявленных дефектов только смещение тензорезистора внутри корпуса датчика отразилось на показаниях датчиков, был разработан кондуктор для его фиксации внутри корпуса (рис. 10 – 11). Кондуктор изготавливался с помощью FDM технологии.

Были рассмотрены различные способы совершенствования конструкции датчиков:

1. Размещение на торцах датчиков тонких стальных пластин (рисунок 12). Предполагались следующие положительные эффекты: усреднение значений давления по площади датчика, снижение влияния заполнителя бетона, увеличение надежности.

2. Размещение на боковой поверхности датчика демпфера из мягкого материала (рис. 13), влияние которого по замыслу должно было исключать обжатие боковой поверхности датчика, позволяющее ему деформироваться более свободно, а также исключаящее влияние касательных напряжений, возникающих в бетонном сечении.

3. Исполнение корпуса датчика с применением кондуктора (рис. 10 – 11).

Для проверки данных конструктивных решений были изготовлены испытательные образцы в виде бетонных призм 100 x 100 x 300 мм, в срединном сечении которых располагалось по 6 датчиков, закрепленных на проволочных рамках (рис. 14 – 15). По одной призме с каждым типом датчиков. Нагружение производилось на прессе П-50. Предварительно с помощью разрушения кубов, выполненных из того же материала, был определен класс бетона по прочности, равный В22,5. Величина нагружений призм была рассчитана исходя из условия их работы в упругой зоне.



Рисунок 2 – Смещение тензорезистора в корпусе

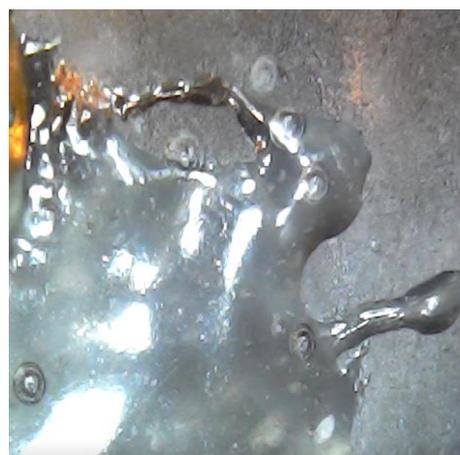


Рисунок 3 – Наплыв смолы на поверхности датчика

Figure 2 – Displacement of the strain gauge in the housing

Figure 3 – Resin influx on the sensor surface

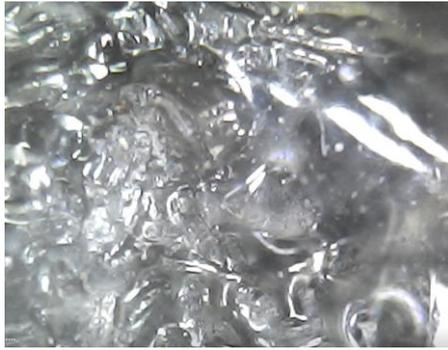


Рисунок 4 – Неровная поверхность датчика

Figure 4 – Uneven sensor surface

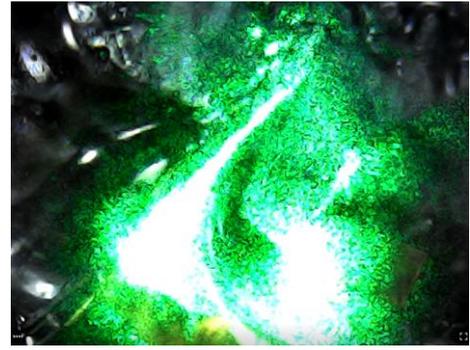


Рисунок 5 – Искажение пятна засветки лазерного луча при прохождении сквозь корпус показывает неоднородность структуры

Figure 5 – Distortion of the spot of illumination of the laser beam when passing through the housing shows the heterogeneity of the structure



Рисунок 6 – Пузырьки воздуха на фоне решетки тензорезистора

Figure 6 – Air bubbles on the background of a strain gauge grating

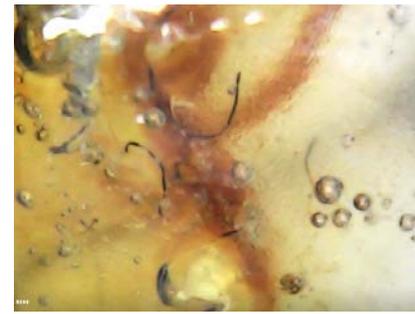


Рисунок 7 – Пузырьки воздуха и инородные включения (мусор)

Figure 7 – Air bubbles and foreign inclusions (debris)

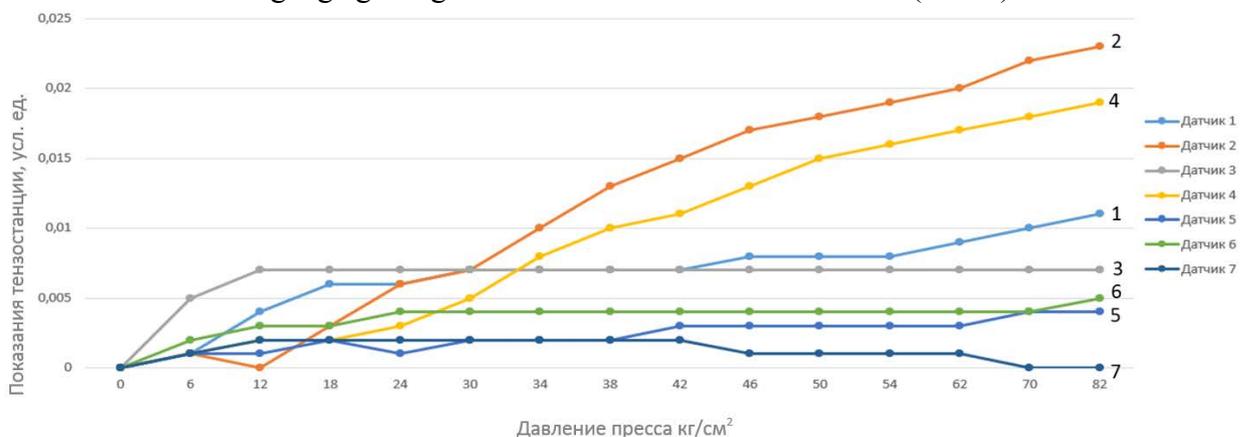


Рисунок 8 – График тарировки датчиков 1–7

Figure 8 – Calibration graph of sensors 1–7

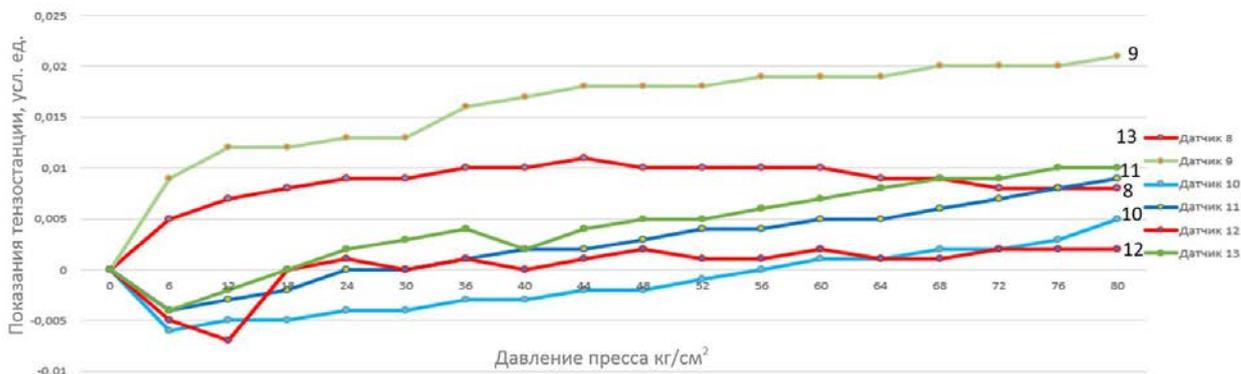


Рисунок 9 – График тарировки датчиков 8–13

Figure 9 – Calibration graph of sensors 8–13

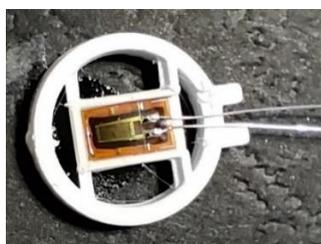


Рисунок 10 – Тензорезистор внутри кондуктора

Figure 10 – Strain gauge inside the conductor



Рисунок 11 – Готовые датчики с кондуктором

Figure 11 – Ready-made sensors with a conductor



Рисунок 12 – Датчик с пластинами

Figure 12 – Sensor with plates



Рисунок 13 – Датчик с демпфером

Figure 13 – Sensor with damper



Рисунок 14 – Рамка с датчиками

Figure 14 – Frame with sensors



Рисунок 15 – Призма, подготовленная к испытаниям

Figure 15 – A prism prepared for testing

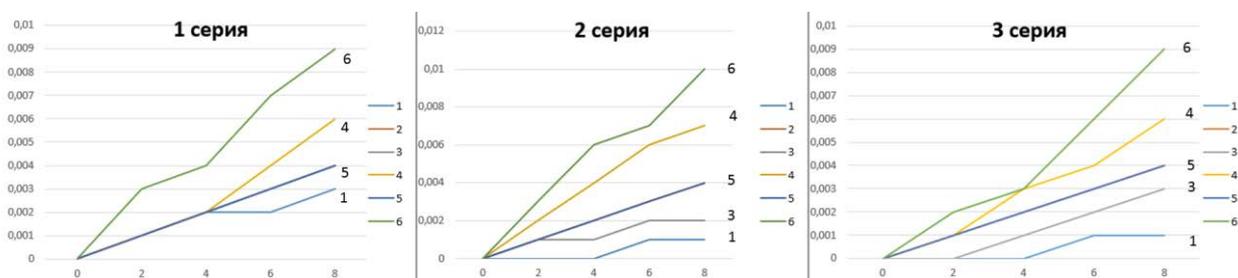


Рисунок 16 – Показания датчиков без доработок (с кондуктором)

Figure 16 – Sensor readings without modifications (with conductor)



Рисунок 17 – Показания датчиков с демпферами

Figure 17 – Sensor readings with dampers

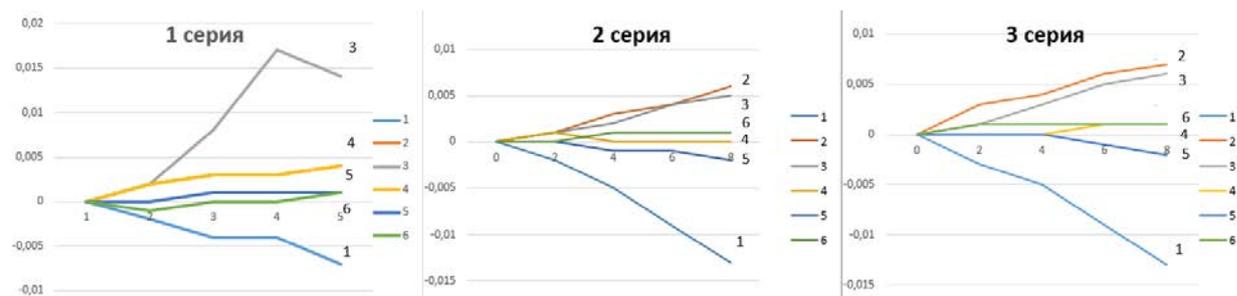


Рисунок 18 – Показания датчиков с пластинами

Figure 18 – Sensor readings with plates

Производилось по 3 нагружения каждой призмы до значения нагрузки 8 тонн. Показания тензорезисторов при испытаниях фиксировались прибором Терем–4.0. Результаты представлены на рис. 16–18.

Анализ полученных данных привел к следующим выводам:

1) Большинство датчиков без пластин и демпферов показывают нелинейные приращения при линейном нагружении.

2) Датчики с демпферами выдают не интерпретируемые данные, что опровергает гипотезу об исключении влияния касательных напряжений, возникающих в бетонном сечении с помощью демпфера выбранной конструкции.

3) Сходимость показаний датчиков с пластинами ниже, чем датчиков без пластин и демпферов.

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

#### Выводы

1. Предпринятые усилия по усовершенствованию датчиков и улучшению их характеристик не привели к заметным положительным результатам.

2. Дальнейшие усовершенствования датчиков и избавление их от таких дефектов, как вовлеченный в структуру смолы воздух и обеспечение защиты от попадания в смолу пыли, представляются нерациональными в виду их большой технической и технологической сложности и стоимости.

3. Выявлена ненадежность данного типа корпуса датчика по причине склонности к хрупкому разрушению.

4. Выявлено изменение показаний датчиков для одной и той же нагрузки в ходе их последовательных нагружений, что мешает проведению тарировки и затрудняет их применение. Причина данного явления не раскрыта, но имеются предположения, что она кроется в неоднородности структуры отвержденной смолы.

Проанализировав выявленные проблемы в производстве датчиков из эпоксидной смолы, было принято решение отказаться от применения данного материала по причинам сложно устранимых дефектов производства в условиях лаборатории, а также выявленных проблем с однородностью корпуса датчика.

Учитывая вышеизложенные недостатки датчиков напряжения, выполненных на основе корпуса из эпоксидной смолы, были представлены следующие требования к материалу и конструкции датчика напряжения:

– высокая стабильность физических свойств и состава материала, которая должна быть обеспечена от образца к образцу;

- высокая конструктивная прочность материала (нормальная работа при напряжениях до 400 кгс/см<sup>2</sup>);
- низкая стоимость изготовления датчика;
- возможность легкой механической обработки материала;
- относительные деформации образца должны быть максимально схожи с относительными деформациями бетона.

Продланное экспериментальное исследование (более 50 изготовленных датчиков, 10 кубов и 6 призм) показали, что изготовленные в имеющихся условиях датчики с корпусом из эпоксидной смолы не могут обеспечить стабильную работу для измерения напряжений внутри сечения. Оценка факторов влияния показала перспективным использование в качестве корпуса датчика напряжения металлических сплавов. Отчет о разработке датчика напряжения, выполненный в корпусе из металлического сплава будет представлен в следующей статье.

### Список литературы

1. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Росстандарт; 2018.
3. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Росстандарт; 2019.
4. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. Москва: Машиностроение. 1990. 224 с.
5. Гуца Ю.П. Статическая прочность железобетонных конструкций и их деформаций в стадии, близкой к разрушению. дисс. докт. техн. наук 05.23.01. Москва: 1980. 401 с.
6. Матков Н.Г. Соппротивление сталеполимербетонных конструкций и их стыков. Москва: Воентехлит. 1999. 164 с.
7. Бубис А.А., Абреков З.М., Закраилов З.З., Кахновский А.М., Кодыш В.Э., Поляков В.С. Дистанционный мониторинг эксплуатационной надежности зданий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 1. С. 64–81.
8. Оганесян С.М., Карапетян С.С., Геодакян Э.Г., Карапетян Д.К. Опыт и результаты инженерно-сейсмометрического мониторинга объектов гидротехнических сооружений республики Армении // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 1. С. 55–59.
9. Накладной струнный тензометр EWV SCIBIM [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometry-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/> (дата обращения: 15.08.2023).
10. Датчик механической деформации ZET 901 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometry-i-datchiki-deformatsii/zet-901/> (дата обращения: 15.08.2023).
11. Научно-производственное предприятие Химэкс [Электронный ресурс] URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smolye-aktivnye-razbaviteli/> (дата обращения: 15.08.2023).
12. 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. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
2. СП 14.13330.2018 Seismic building design code. Rosstandart; 2018.

3. СП 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Rosstandart; 2019.
4. Klokova N.P. Tensoresistors: Theory, calculation methods, developments. Moscow: Mechanical Engineering. 1990, 224 p. [In Russian]
5. Gushcha Yu. P. Static strength of reinforced concrete structures and their deformations at a stage close to destruction. diss. doct. technical sciences 05.23.01. *Staticheskaya prochnost' zhelezobetonnykh konstruktсий i ikh deformatsiy v stadii, blizkoy k razrusheniyu. diss. dokt. tekhn. nauk 05.23.01*. Moscow: 1980, 401 p. [In Russian]
6. Matkov N.G. Resistance of steel-polymer concrete structures and their joints. Moscow: Voentehlit. 1999, 164 p. ([n Russian]
7. Bubis A.A., Abrekov Z.M., Zakrailov Z.Z., Kakhnovsky A.M., Kodysh V.E., Polyakov V.S. Remote monitoring of operational reliability of buildings. Distantionnyy monitoring ekspluatatsionnoy nadezhnosti zdaniy. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 1. pp. 64–81. ([n Russian]
8. Hovhannesyanyan S.M., Karapetyan S.S., Geodakyan E.G., Karapetyan J.K. The tests and results of engineering and seismic monitoring of objects of hydraulic structures of Armenia. Opyt i rezul'taty inzhenerno-seysmometricheskogo monitoringa ob'yektov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy respubliky Armenii. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2014, no. 1, pp. 55–59. [In Russian]
9. Attached string strain gauge EWV SCIBIM URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/> (date of the application: 15.08.2023).
10. Sensor of mechanical deformation ZET 901 URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/zet-901/> (date of the application: 15.08.2023).
11. Himex scientific and production enterprise URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smoly-aktivnye-razbaviteli/> (date of the application: 15.08.2023).
12. 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 p. [In Russian]

#### Данные об авторах / Information about authors

**Трекин Николай Николаевич**, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Доктор технических наук, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». Москва, Российская Федерация  
e-mail: [otks@yandex.ru](mailto:otks@yandex.ru)

**Nikolai N. Trekin**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Reinforced concrete and stone structures. Moscow, Russian Federation  
e-mail: [otks@yandex.ru](mailto:otks@yandex.ru)

**Авдеев Кирилл Владимирович**, АО «ЦНИИПромзданий», главный инженер. Москва, Российская Федерация  
e-mail: [6136133@mail.ru](mailto:6136133@mail.ru)

**Kirill V. Avdeev**, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, chief engineer. Moscow, Russian Federation

e-mail: [6136133@mail.ru](mailto:6136133@mail.ru)

**Кодыш Вадим Эмильевич**, АО «НИЦ «Строительство», кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Москва, Российская Федерация

e-mail: [entvacancy@mail.ru](mailto:entvacancy@mail.ru)

**Vadim E. Kodysh**, Scientific Research Center «Construction». Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher. Moscow, Russian Federation

e-mail: [entvacancy@mail.ru](mailto:entvacancy@mail.ru)

**Шмаков Сергей Дмитриевич**, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), аспирант, младший научный сотрудник отдела конструктивных систем № 1. Москва, Российская Федерация

e-mail: [sergey3456789@gmail.com](mailto:sergey3456789@gmail.com)

**Sergey D. Shmakov**, Russian university of transport (MIIT). PhD student, Junior Researcher, Department of Structural Systems No. 1. Moscow, Russian Federation

e-mail: [sergey3456789@gmail.com](mailto:sergey3456789@gmail.com)

**Черепанов Андрей Викторович**, АО «ЦНИИПромзданий», аспирант, ведущий инженер-конструктор отдела конструктивных систем № 2.

Москва, Российская Федерация

e-mail: [a.cherepanov@cniipz.com](mailto:a.cherepanov@cniipz.com)

**Andrey V. Cherepanov**, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions. PhD student, Lead Design Engineer of Structural Systems Department No. 2. Moscow, Russian Federation

e-mail: [a.cherepanov@cniipz.com](mailto:a.cherepanov@cniipz.com)

**Тучин Михаил Александрович**, Заведующий сектором отдела конструктивных систем № 2,

e-mail: [m.tuchin@cniipz.com](mailto:m.tuchin@cniipz.com)

**Mikhail A. Tuchin**, Head of Sector, Department of Structural Systems No. 2,

e-mail: [m.tuchin@cniipz.com](mailto:m.tuchin@cniipz.com)

**Чаганов Алексей Борисович**, ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет» (ВятГУ), кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. Киров, Российская Федерация

e-mail: [chabpilot@yandex.ru](mailto:chabpilot@yandex.ru)

**Aleksey B. Chaganov**, Vyatka State University. Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Construction Production. Kirov, Russian Federation

e-mail: [chabpilot@yandex.ru](mailto:chabpilot@yandex.ru)