

УДК 624.012.45.059.4:681.586:004.942

ГЛУБИННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА

А.В. Белоусов, Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, О.В. Лазаренко

Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой,

г. Новополоцк, Республика Беларусь

e-mail: 20pgs2.belousov.a@pdu.by, d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by, o.lazarenlo@psu.by

В статье представлена разработка глубинного датчика для мониторинга напряжённо-деформированного состояния бетонных конструкций. Проведён анализ существующих решений, выявлены их недостатки и предложено усовершенствование конструкции за счёт оптимизации геометрии корпуса и применения технологии 3D-печати. Оптимизация проводилась с использованием программного комплекса ANSYS Workbench, где выполнено численное моделирование трёх геометрических форм корпуса: цилиндрической, сферической и дисковой. По результатам расчётов выбрана оптимальная форма, обеспечивающая минимальную концентрацию напряжений в теле бетона. Создана 3D-модель датчика, напечатаны и испытаны опытные образцы, разработано программное обеспечение для регистрации показаний. Разработка направлена на повышение надёжности строительных конструкций за счёт постоянного мониторинга их состояния в реальном времени.

Ключевые слова: *глубинный датчик, бетон, ANSYS, тензометрия, 3D-печать, мониторинг.*

DEPTH SENSOR FOR MONITORING CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE

A. Belousov, D. Shabanov, A. Yagubkin, O. Lazarenko

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus

e-mail: 20pgs2.belousov.a@pdu.by, d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by, o.lazarenlo@psu.by

The article presents the development of a depth sensor for monitoring the stress-strain state of concrete structures. An analysis of existing solutions has been carried out, their shortcomings have been identified, and design improvements have been proposed by optimizing the geometry of the housing and using 3D printing technology. The optimization was carried out using the ANSYS Workbench software package, where numerical modeling of three geometric body shapes was performed: cylindrical, spherical and disk. Based on the calculation results, the optimal shape was chosen, ensuring the minimum stress concentration in the concrete body. A 3D model of the sensor has been created, prototypes have been printed and tested, and software for recording readings has been developed. The development is aimed at improving the reliability of building structures through constant monitoring of their condition in real time.

Keywords: *depth sensor, concrete, ANSYS, strain gauge, 3D printing, monitoring.*

Введение. Современные требования к безопасности и долговечности зданий и сооружений требуют внедрения новых технологий диагностики и контроля конструкций на всех этапах жизненного цикла – от строительства до эксплуатации. Одним из наиболее перспективных инструментов являются глубинные тензодатчики, позволяющие отслеживать напряжённо-деформированное состояние бетона в объёме конструкции.

Бетон как материал является неоднородной средой, содержащей поры, включения и микротрещины. При эксплуатации под действием нагрузок в нём развиваются локальные концентрации напряжений, которые приводят к образованию и росту трещин. Без систематического контроля этих процессов невозможно обеспечить долговременную прочность и безопасность сооружений.

На момент разработки датчика был зарегистрирован «Датчик деформации композитный для закладки в бетон» [1], основанный на принципе тензометрии. Его конструкция включает два тензорезистора, размещённых в герметичном двухслойном корпусе. Однако такие датчики обладают рядом недостатков: сложностью производства, высокой себестоимостью, трудностью герметизации и невозможностью их массового применения в монолитном строительстве.

В связи с этим актуальной является задача разработки нового типа глубинного датчика, который сочетал бы высокую чувствительность, надёжность и технологичность изготовления при низкой стоимости.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка усовершенствованного глубинного датчика для бетона с оптимизированной геометрией корпуса и возможностью изготовления методом 3D-печати.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ существующих конструкций глубинных датчиков.
2. Разработать 3D-модели корпуса различной геометрии.
3. Выполнить численное моделирование концентрации напряжений в бетоне с использованием программного комплекса ANSYS Workbench.
4. Определить оптимальную форму корпуса датчика, обеспечивающую минимальное искажение напряжённого состояния.
5. Изготовить и испытать опытные образцы при помощи 3D-печати.

Глубинный тензодатчик представляет собой устройство, в корпусе которого размещаются тензорезисторы, преобразующие механические деформации в изменение электрического сопротивления. Эти изменения фиксируются измерительным блоком и передаются на систему сбора и обработки данных.

При закладке датчика в бетон он работает синхронно с материалом, регистрируя локальные деформации, возникающие под действием внешних нагрузок, усадки и температурных изменений. Получаемые сигналы позволяют не только фиксировать момент появления трещин, но и прогнозировать развитие повреждений, что особенно важно при долговременном мониторинге конструкций.

Для выбора оптимальной формы корпуса были рассмотрены три варианта геометрии: цилиндрическая, сферическая и дисковая.

Моделирование выполнено в среде ANSYS Workbench в модуле Static Structural. В расчётной модели задавались реальные физико-механические характеристики бетона и материала корпуса (3D-пластик). На бетонное тело прикладывалось осевое сжатие, имитирующее эксплуатационную нагрузку.

Граничные условия обеспечивали жёсткое закрепление основания и равномерное распределение нагрузки по поверхности. В ходе расчётов оценивались поля эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне контакта датчика с бетоном.

Результаты показали, что наименьшее воздействие на структуру бетона оказывает датчик с дисковой формой корпуса, для которого максимальные напряжения составили 0,0066 МПа. Для цилиндрической и сферической формы значения составили 0,0071 и 0,0097 МПа соответственно.

Таким образом, именно дисковая форма обеспечивает наиболее равномерное распределение напряжений и минимальное нарушение структуры материала.

Технология изготовления и испытания опытных образцов. На основе оптимизированной геометрии были созданы трёхмерные модели корпуса в программных средах AutoCAD и КОМПАС-3D. Полученные файлы использовались для 3D-печати опытных образцов методом FDM (Fused Deposition Modeling). В качестве материала применялся полиэтилентерефталатгликоль (PETG), отличающийся высокой химической стойкостью, герметичностью и низким влагопоглощением. Конструкция датчика предусматривает интеграцию тензорезисторов непосредственно в процессе печати, что исключает последующие операции сборки и герметизации. Испытания показали устойчивость напечатанных образцов к воздействию бетонной среды, стабильность показаний и герметичность корпуса. В ходе экспериментов была выполнена тарировка датчиков и проверка их чувствительности при различных нагрузках. Были проведены испытания бетонных образцов (рисунок 1).



Рисунок 1. – Испытанные бетонные образцы

Перспективы внедрения и практическое значение разработки. Созданный датчик может применяться для мониторинга конструкций мостов, дорожных покрытий, фундаментов, гидротехнических и промышленных сооружений. Использование 3D-печати позволяет существенно удешевить производство и организовать выпуск датчиков непосредственно на строительных предприятиях.

Преимущества разработанного решения:

- герметичный и коррозионно-стойкий корпус;
- высокая чувствительность тензорезисторов;
- исключение человеческого фактора при изготовлении;
- совместимость с цифровыми технологиями BIM и системами автоматизированного мониторинга.

Разработка получила положительные отзывы на конкурсах «100 идей для Беларуси», а также на международных форумах, получен патент на изобретение в Республики Беларусь [6].

Заключение. Проведённые исследования подтвердили, что применение технологий 3D-печати при изготовлении глубинных тензодатчиков является перспективным направлением для строительной отрасли. Оптимизация корпуса позволила снизить концентрацию напряжений и повысить точность измерений, а использование пластиковых материалов обеспечило герметичность, долговечность и низкую себестоимость изделия. В дальнейшем планируется создание измерительных комплексов с возможностью беспроводной передачи данных и интеграции в интеллектуальные системы мониторинга зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Датчик деформации композитный для закладки в бетон : пат. 165462 Респ. Беларусь, МПК G01B7/16 / Е.И.Павлов, П.И. Тромифов, М.А. Заварзин // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019. – № 8. – С. 19.
2. ANSYS Workbench. User Guide / Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg PA 15317 USA. – ANSYS Inc., 2022.
3. Шабанов, Д.Н. Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах / Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, В.А. Хватынец, Е.А. Трамбицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 67–71.
4. Белоусов, А.В. Оптимизация корпуса глубинного датчика для бетона / А.В. Белоусов, Е.С. Боровкова, Д.Н. Шабанов // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс] : электронный сборник статей IV международной научной конференции, Новополоцк, 20–21 апр. 2022 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – С. 50–52.
5. Соловьёв, А.А. Тензометрические методы контроля в строительстве / А.А. Соловьёв. – Минск: БНТУ, 2020. – 168 с.
6. Глубинный датчик для отслеживания напряженно-деформируемого состояния бетона: пат. 24696 Респ. Беларусь, МПК G01B7/16 / Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Е.С. Боровкова, А.В. Белоусов // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2025. – № 5. – С. 17.