

УДК 53.09:625.1

DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-3-10-14

СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

© А.С. Баранов, Н.С. Буланкин, А.Р. Ерендеева, М.С. Ишмухаметов

Измерения деформаций и прогиба обычно используются в качестве ключевого показателя в строительстве для выполнения оценки безопасности и срока эксплуатации мостовых сооружений. Однако из-за технических или экономических проблем может быть сложно реализовать непрерывный мониторинг прогиба мостов и сооружений, особенно для мостов с пролетами малой и средней длины. В этой связи актуальным является поиск новых методов, разработка датчиков и оборудования для автоматизации диагностики состояния металлических сооружений.

Методы определения деформаций пролетных строений имеют ограниченное применение. Это обуславливает необходимость разработки и внедрения новых подходов для определения состояния пролетных строений в реальном времени без дополнительных работ.

В работе рассмотрены основные существующие методы диагностики деформаций пролетных строений мостов, перспективы их развития с применением новых материалов, технологий искусственного интеллекта, а также визуализации деформаций путем установки мультисенсорных измерительных комплексов. Проведен обзор состояния развития метода резистивной томографии металлов, который может быть адаптирован для предиктивного мониторинга состояния пролетных сооружений, содержащих металлические элементы. При этом перспективным представляется метод импедансной томографии, при наличии полимерного покрытия на металле. В структурах металл/полимер/металл транспорт носителей заряда ограничивается пространственным зарядом. В этом случае на границе раздела металл–полимер образуется барьер Шоттки, а перенос носителей заряда обеспечивается инжекцией носителей заряда из электрода в полимер. При деформации металла высота барьера изменяется, что отражается в изменении сопротивления (импеданса) структуры. Такой непрямой метод измерения импеданса может быть относительно легко адаптирован для измерения прогиба мостов. При этом сенсоры могут быть разработаны в виде отдельных элементов, размещаемых на объектах с помощью болтовых креплений, а деформация моста может измеряться косвенно, по деформации измерительного электрода – основания сенсора.

Тем не менее стоит отметить, что перед широкой реализацией данного метода необходимо провести дополнительные испытания. Особенно важно оценить точность измерений в различных погодных условиях и условиях действующей железнодорожной линии под проходящим подвижным составом.

Ключевые слова: деформации, металлическое пролетное строение, резистивный неразрушающий контроль, сопротивление.

Введение. Искусственное сооружение – собирательное название сооружений, возводимых в местах пересечения железной дорогой рек, ручьев, потоков дождевой и талой воды, других железнодорожных линий и автомобильных дорог. К искусственным сооружениям относят мосты, трубы, виадуки, эстакады, пешеходные мосты, регуляционные сооружения

и др. На сети железных дорог для преодоления препятствий используются железобетонные и металлические мосты. Наименование мостов определяют по виду материала пролетного строения. Из преимуществ металлических мостов можно выделить следующее: прочность, долговечность, скорость строительства, меньший собственный вес конструкции. Однако

БАРАНОВ Александр Сергеевич – к.т.н., Приволжский государственный университет путей сообщения, e-mail: a.baranov@samgups.ru

БУЛАНКИН Никита Сергеевич, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: AnimeKawai00@mai.ru

ЕРЕНДЕЕВА Анастасия Руслановна, Приволжский государственный университет путей сообщения, e-mail: erendeewa.anastasia21@gmail.com

ИШМУХАМЕТОВ Марат Салаватович, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: swordmaster2028@gmail.com

существует и ряд недостатков. Основными из них являются дороговизна конструкций и возникновение усталости металла, приводящее к возникновению дефектов, способствующее снижению прочностных свойств и повышению деформаций металлических пролетных строений.

В настоящее время для определения деформаций пролетных строений используют метод геометрического нивелирования, мобильные и встраиваемые измерительные комплексы на основе резистивных датчиков, а также визуальные методы съемки с помощью прогибомеров и преобразователей [1, 2]. Основными проблемами данных методов является недостаточная точность измерений, сложность проведения испытаний, длительность подготовки и времени проведения измерений.

Современное состояние и перспективы развития. Наиболее простым методом определения деформации пролетных строений является метод геометрического нивелирования. Нивелир устанавливается в районе измерений, после чего с помощью геодезической рейки измеряется пролет моста в нескольких точках. Производят вычисления неупругих деформаций с провисанием балки. После этого производят те же измерения под действием нагрузки, затем вычисляют относительные величины прогибов (рис. 1). Также используют электронный тахеометр, визируя на нижний пояс балки и определяя координаты X , Y , Z в каждой точке визирувания. По результатам измерений выполняют расчет по геометрической схеме [3].

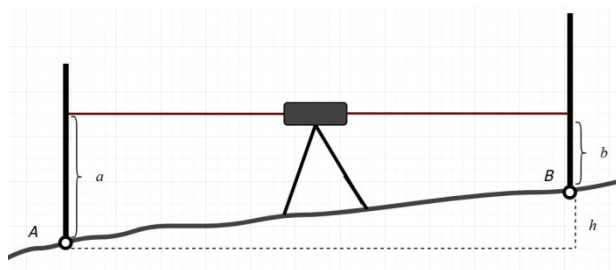


Рис. 1. Схема геометрического нивелирования

Также измерения деформации пролетных строений проводятся индикаторами часового типа — прогибомерами. В данных приборах к испытываемой конструкции фиксируется в основном стальная проволока, а на свободный конец для натяжения вешают груз. Установка прибора производится на специальный штатив или на неподвижную опору. Далее, при нагру-

женном состоянии моста, измеряются вертикальные перемещения пролетных строений (рис. 2) [4].

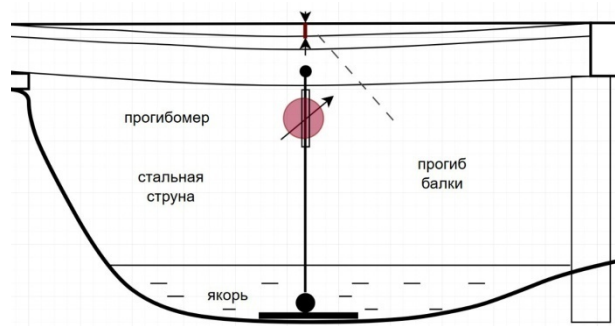


Рис. 2. Определение прогиба пролетного строения с помощью индикатора часового типа

Более современной альтернативой данному методу служит использование цифровых прогибомеров в составе с преобразователем. Измеряемое ими перемещение передается ведущему блоку с помощью натянутой струны, перекинутой через ведущий блок не менее чем одним витком. Ведущий блок связан с угловым датчиком перемещения, угловое перемещение ведущего блока пересчитывается в линейное перемещение при помощи счетного устройства, расположенного в электронном блоке. Натяжение струны осуществляется также небольшим грузом, прикрепленным к свободному ее концу. Мобильный измерительный комплекс для диагностики мостов также предназначен для проведения технической проверки несущих конструкций путем расчетно-экспериментального метода определения значения прогиба пролета моста от воздействия пробной подвижной нагрузки. Главной частью является два прецизионных датчика угловых перемещений, соединенных кабелями с переносным компьютером. С помощью установочных винтов датчики выставляются в горизонтальное положение. В процессе нагружения моста датчики регистрируют изменение угла наклона балок пролета относительно исходного положения. Значения углов обрабатываются в компьютере и пересчитываются в прогиб середины пролета, который сравнивается с допустимым значением.

Из новых перспективных методов можно выделить метод электрорезистивной томографии (ERT). Разработана программируемая 3D-электрорезистивная томография (3D-ERT) — система для обнаружения дефектов в металле. Способна обнаруживать местоположение

и приблизительный размер дефектов в металле. Данный метод способен предотвращать внутренние дефекты во время обработки [5].

Метод основан на том, что разные среды имеют разную проводимость. Эквидистантные электроды устанавливаются на границе измеряемой области, и система ERT обеспечивает сигналы возбуждения (ток возбуждения или напряжение возбуждения) для нее во время работы и измеряет электрические сигналы (разность потенциалов или ток) на других электродах. Таким образом, распределение среды в измеряемой области выводится путем измерения распределения электропроводности в измеряемом объекте.

Недостатки схожи с предлагаемым новым методом неразрушающего контроля: перед измерениями необходима очистка поверхности испытываемой конструкции, а также погрешность измерений из-за внешних факторов.

Еще одним современным методом является технология машинного обучения для обнаружения трещин в анизотропном электропроводящем нанокompозитном покрытии [6]. Несмотря на то, что в данной работе авторы не сообщают о разработке датчиков деформации для мостов, описанный метод представляется перспективным. В данном методе предлагается модель машинного обучения сверточной нейронной сети с использованием технологии чередования композитных ламинатов с углеродными нанотрубками. Нейронные сети позволяют реализовать нелинейное отображение между граничным потенциальным полем и распределением электропроводности.

Альтернативный способ, схожий с методом резистивной томографии, описан в работе [7]. Способ предлагает реализацию резистивного неразрушающего контроля с помощью датчика контроля упругой деформации металла. Сущность изобретения заключается в том, что на протяжные поверхности контролируемой конструкции наносят слой электроактивного материала и слой электропроводящего материала, причем в качестве электроактивного материала используют материалы из органических и неорганических веществ, способных изменять свое сопротивление в зависимости от изменения кристаллической структуры металлического образца, от каждого локального участка электропроводящего слоя, совпадающего с контролируемым участком конструкции, выполняют отводы в виде проводников, вторые концы

проводников используют для подключения измерительного входа измерительного прибора, при этом наличие дефектов локальных участков конструкций устанавливают по отклонению измеренного значения сопротивления локального участка от эталонного значения сопротивления этого участка, причем эталонные значения сопротивлений локальных участков предварительно измеряют для исходного исправного состояния контролируемой конструкции. Преимуществом данного способа является увеличение точности измерения, упрощение работы, а также возможность оперативного получения результатов измерения. Помимо этого, за счет чувствительности прибора возможно диагностировать другие дефекты, такие как коррозия, адсорбция и др.

На основе метода, описанного в работе [7], ведется разработка метода неразрушающего контроля металлов при наличии различных видов деформации: упругой и неупругой [8, 9]. Метод требует нанесения на поверхность тестируемого металла полимерного покрытия и верхних измерительных электродов. Фундаментальные физические процессы, происходящие в такой структуре, описаны в работах [10–12]. Здесь сообщается о возможности измерения деформации в режиме постоянного и переменного тока. Это позволяет использовать различные измерительные схемы. При этом возможна тонкая настройка метода за счет подбора материала измерительного электрода [13] и толщины полимерного покрытия [14].

Заключение. В заключение можно сказать, что новый метод неразрушающего контроля представляет собой перспективное решение для определения деформаций пролетных строений. Стоит отметить, что устройство для измерения деформации мостов и сооружений на основе изменения импеданса структуры металл/полимер/металл позволит определять не только величину деформаций, а также осуществлять вибродиагностику – контроль и регистрацию вибраций, определение периода основного тона и декремента колебаний. Компактность и простота в использовании сенсоров на основе структуры металл/полимер/металл, а также возможность мультисенсорного размещения позволят разработать эффективный и недорогой в применении прибор, позволяя значительно сократить время на проведение измерений по сравнению с существующими методами.

Литература

1. Huang J. Shao X., Yang F., Zhu J., He X. Measurement method and recent progress of vision-based deflection measurement of bridges: a technical review // *Optical Engineering*. 2022. V. 61. № 7. P. 070901-070901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.7.070901>
2. Tang Y. Cang J. Zheng B., Tang W. Deflection Monitoring Method for Simply Supported Girder Bridges Using Strain Response under Traffic Loads // *Buildings*. 2023. V. 14. № 1. P. 70. <https://doi.org/10.3390/buildings14010070>
3. Белый А.А., Яценко А.И. Способ определения технического состояния железобетонных балок пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов по их прогибам: Патент РФ № 2767165. 2022.
4. Компьютерный прогибомер. Определение прогиба моста. Диагностика мостов: Электронный ресурс. URL: <http://www.diag-meas.ru/dmost.html>
5. Zhao S., Wei Z., Xing Z., Wu Y., Guo S., & Liu B. Visualization investigation of defects in structural steel materials with electrical resistance tomography // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 356. P. 129274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129274>
6. Akmanov I.S., Lomov S.V., Spasennykh M.Y., Abaimov S.G. Machine learning for nano-level defect detection in aligned random carbon nanotubes-reinforced electrically conductive nanocomposite // *Composite Structures*. 2025. V. 352. P. 118651. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118651>
7. Лачинов А.Н., Лачинов А.А. Способ резистивного неразрушающего контроля: Патент РФ № 2019133548. 2019.
8. Galiev A.F., Karamov D.D., Lachinov A.A., Zaynullina L.I., Sarkeeva E.A., Alexandrov I.V., Lachinov A.N. Non-conjugated polymer films to monitoring strain deformation of metals and alloys // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2024. V. 35. № 14. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-12699-x>
9. Galiev A.F., Kornilov V.M., Bulankin N.S., Ishmuhametov M.S., Karimov V.R., Karamov D.D. Metal strain sensor based on resistive switching of a polymer coating // *Discover Sensors*. 2025. V. 1. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s44397-025-00004-2>
10. Галиев А.Ф. Лачинов А.А., Карамов Д.Д., Лачинов А.Н., Юсупов А.Р., Кян М.Ф. Влияние деформации металла на свойства потенциального барьера в структуре металл/полимер // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2021. № 1. С. 97–101. <https://doi.org/10.1134/2222-8349-2024-0-1-97-101>
11. Галиев А.Ф. Каримов В.Р., Ишмухаметов М.С., Буланкин Н.С. Джоншерровский универсальный динамический отклик в тонких пленках полидифениленфталата // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2024. № 1. С. 67–71. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-67-71>
12. Ишмухаметов М.С., Буланкин Н.С., Каримов В.Р., Галиев А.Ф. Импедансный анализ процес-

сов переноса заряда в структуре металл/полимер/металл // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2024. № 1. С. 30–34. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-30-34>

13. Galiev A.F., Lachinov A.A., Karamov D.D., Lachinov A.N., Yusupov A.R., Kian M.F. Effect of the Electrode Material on Electronic Switching in a Metal–Polymer–Metal Structure // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021. V. 15. № 3. P. 601–606. <https://doi.org/10.1134/S1027451021030253>

14. Карамов Д.Д., Ильясов В.Х., Лачинов А.Н., Галиев А.Ф., Лачинов А.А. Влияние толщины субмикронных пленок электроактивных полимеров на токи термостимулированной деполяризации // *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62(8). С. 1306–1311. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-61-66>

References

1. Huang J. Shao X., Yang F., Zhu J., He X. Measurement method and recent progress of vision-based deflection measurement of bridges: a technical review // *Optical Engineering*, 2022, vol. 61, no. 7, pp. 070901-070901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.7.070901>
2. Tang Y. Cang J. Zheng B., Tang W. Deflection Monitoring Method for Simply Supported Girder Bridges Using Strain Response under Traffic Loads // *Buildings*, 2023, vol. 14, no. 1, 70 p. <https://doi.org/10.3390/buildings14010070>
3. Belyy A.A., Yashchenko A.I. Sposob opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh balok proletnykh stroeniy ekspluatiruemykh avtodorozhnykh mostov po ikh progibam: Patent RF № 2767165. 2022.
4. Komp'yuternyy progibomer. Opredelenie progiba mosta. Diagnostika mostov: Elektronnyy resurs. URL: <http://www.diag-meas.ru/dmost.html>
5. Zhao S., Wei Z., Xing Z., Wu Y., Guo S., & Liu B. Visualization investigation of defects in structural steel materials with electrical resistance tomography // *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 356, 129274 p. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129274>
6. Akmanov I.S., Lomov S.V., Spasennykh M.Y., Abaimov S.G. Machine learning for nano-level defect detection in aligned random carbon nanotubes-reinforced electrically conductive nanocomposite // *Composite Structures*, 2025, vol. 352, 118651 p. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118651>
7. Lachinov A.N., Lachinov A.A. Sposob rezistivnogo nerazrushayushchego kontrolya: Patent RF № 2019133548. 2019.
8. Galiev A.F., Karamov D.D., Lachinov A.A., Zaynullina L.I., Sarkeeva E.A., Alexandrov I.V., Lachinov A.N. Non-conjugated polymer films to monitoring strain deformation of metals and alloys // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, vol. 35, no. 14, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-12699-x>

9. Galiev A.F., Kornilov V.M., Bulankin N.S., Ishmukhametov M.S., Karimov V.R., Karamov D.D. Metal strain sensor based on resistive switching of a polymer coating // *Discover Sensors*, 2025, vol. 1, no. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s44397-025-00004-2>

10. Galiev A.F., Lachinov A.A., Karamov D.D., Lachinov A.N., Yusupov A.R., Kian M.F. Vliyanie deformatsii metalla na svoystva potentsial'nogo bar'era v strukture metall/polimer // *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2021, no. 1, pp. 97–101. <https://doi.org/10.1134/2222-8349-2024-0-1-97-101>

11. Galiev A.F., Karimov V.R., Ishmukhametov M.S., Bulankin N.S. Dzhonsherovskiy universal'nyy dinamicheskiy otklik v tonkikh plenках polidifenilentalida // *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2024, no. 1, pp. 67–71. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-67-71>

12. Ishmukhametov M.S., Bulankin N.S., Karimov V.R., Galiev A.F. Impedansnyy analiz protsessov

perenosa zaryada v strukture metall/polimer/metall // *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2024, no. 1, pp. 30–34. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-30-34>

13. Galiev A.F., Lachinov A.A., Karamov D.D., Lachinov A.N., Yusupov A.R., Kian M.F. Effect of the Electrode Material on Electronic Switching in a Metal–Polymer–Metal Structure // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 601–606. <https://doi.org/10.1134/S1027451021030253>

14. Karamov D.D., Il'yasov V.Kh., Lachinov A.N., Galiev A.F., Lachinov A.A. Vliyanie tolshchiny submikronnykh plenok elektroaktivnykh polimerov na toki termostimulirovannoy depolyarizatsii // *Fizika tverdogo tela*, 2020, vol. 62(8), pp. 1306–1311. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-1-61-66>

METHODS OF DIAGNOSTICS OF DEFORMATIONS OF BRIDGE SPAN STRUCTURES

© A.S. Baranov¹, N.S. Bulankin², A.R. Ereendeveva¹, M.S. Ishmukhametov²

¹Volga Region State University of Railway Engineering,
2V, ulitsa Svobody, 443066, Samara, Russian Federation

²Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3a, ulitsa Oktybrskoy revolyutsii, 450008, Ufa, Russian Federation

Measurements of deformations and deflections are commonly used as key indicators in construction to assess the safety and service life of bridge structures. However, due to technical or economic issues, it may be difficult to implement continuous monitoring of the deflection of bridges and structures, especially for bridges with short or medium spans. In this regard, it is relevant to search for new methods, develop sensors and equipment to automate the diagnostics of the state of metal structures.

Methods for determining the deformations of span structures have limited application. This necessitates the development and implementation of new approaches to determining the state of span structures in real time without additional work.

The paper considers the main existing methods for diagnosing the deformations of bridge spans, the prospects for their development using new materials, artificial intelligence technologies, as well as visualization of deformations by installing multisensor measuring systems. A review of the state of development of the resistive tomography method of metals is provided, which can be adapted for predictive monitoring of the state of span structures containing metal elements. At the same time, the impedance tomography method seems promising, in the presence of a polymer coating on the metal. In metal/polymer/metal structures, the transport of charge carriers is limited by the space charge. In this case, a Schottky barrier is formed at the metal-polymer interface, and the transport of charge carriers is ensured by the injection of charge carriers from the electrode into the polymer. When the metal is deformed, the barrier height changes, which is reflected in the change in the resistance (impedance) of the structure. This indirect method of impedance measurement can be relatively easily adapted to measure the deflection of bridges. In this case, the sensors can be developed as separate elements placed on objects using bolted fastenings, and the deformation of the bridge can be measured indirectly, by the deformation of the measuring electrode - the base of the sensor.

However, it should be noted that additional testing is necessary before the widespread implementation of this method. It is especially important to evaluate the accuracy of measurements in various weather conditions and conditions of an operating railway line under passing rolling stock.

Keywords: deformations, metal span structure, resistive non-destructive testing, resistance.