

Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии

Целью исследования является разработка методики оценки качества усиления мостовых железобетонных конструкций композиционными материалами. Эффективным способом выявления дефектов строительных работ и повреждений, накопленных при эксплуатации усиленных конструкций, является применение метода инфракрасной термографии. Метод основан на регистрации температур поверхности, по разнице которых можно судить о ее состоянии. Исследованием установлено, что тепловизионное наблюдение в инфракрасном диапазоне позволяет точно определить положение, форму и размер (площадь) зон с неисправностями усиления (в частности – непрочности и отслоений углепластиковых холстов от бетона). Натурными экспериментами показана простота и эффективность технологии контроля качества усиления с использованием инфракрасной термографии. Рассмотрены методы активной и пассивной термографии, показана возможность дистанционного обследования при любой температуре окружающей среды в пределах рабочего диапазона тепловизора. Разработанная методика может быть применена для оценки технического состояния железобетонных конструкций, в том числе пролетных строений мостов, усиленных композиционными материалами, и качества усиления. Преимуществами применения методики являются высокая точность и наглядность, объективность, безопасность, высокая скорость проведения осмотра, возможность обследовать большие площади с большого расстояния, получение результатов на месте при минимальных требованиях к техническим характеристикам измерительного оборудования (тепловизорам).

Ключевые слова: композиционные материалы, усиление, инфракрасная термография, дефект, оценка технического состояния, пролетные строения.

На сети автомобильных и железных дорог России эксплуатируется большое количество железобетонных мостов, запроектированных под различные нагрузки и находящихся в различном техническом состоянии. С ростом срока службы отмечается тенденция увеличения числа мостовых сооружений (как на дорогах общего пользования, так и на дорогах федерального значения), которые, не выработав предполагаемый период безаварийной эксплуатации, приходят в неудовлетворительное состояние.

Причинами неудовлетворительного состояния элементов мостов являются как недостаточное качество строительства и последующего обслуживания, разрушительное воздействие окружающей среды и другие факторы, так и рост нагрузок.

Одна из основных задач исследования была направлена на совершенствование методов оценки технического состояния мостов с помощью одного из перспективных методов неразрушающего контроля – инфракрасной термографии [1, 2].

В последнее время активно развивается направление усиления поврежденных железобетонных конструкций путем наклеивания композиционных материалов [3–5]. Однако накопленный отечественный опыт свидетель-

ствует о том, что большое количество отремонтированных конструкций имеет отказы в течение первых пяти лет эксплуатации. Такое положение объясняется низким качеством выполнения работ и отсутствием достоверной информации об изменении эксплуатационной надежности отремонтированных конструкций во времени.

В настоящее время применяются два метода выявления дефектов усиления композиционными материалами – акустический и визуальный. Акустический метод, как правило, сводится к остукиванию усиленной поверхности, и основными его проблемами являются сравнительно высокое время диагностики и низкая точность определения площадей непрочности. Кроме того, необходим непосредственный доступ к элементам конструкции, который часто затруднен или вовсе невозможен. Визуальный контроль также является недостаточно информативным, поскольку с его помощью можно выявить только видимые дефекты.

Исследования [6–10] показали, что эффективным методом выявления дефектности конструкции, усиленной композиционными материалами, и оценки ее степени является метод инфракрасной термографии, основанный на регистрации тепловых полей контролируемо-

го изделия, измеряемых с той или другой стороны изделия, и позволяющий дистанционно обнаруживать повреждения на большой площади конструкции в труднодоступных местах. Данный метод является простым в понимании и реализации, а также лишен недостатков, свойственных акустическому и визуальному методам. Использование тепловизоров позволяет получать картину тепловыделения каждой точки контролируемой поверхности именно с поверхностного слоя, где возникает непрочности с балкой. Теоретический предел пространственного разрешения тепловизионной техники на современном уровне составляет 0,05 мм, что позволяет с достаточной точностью определить место, где идет более интенсивное тепловыделение, и получить зависимость температуры от времени или от нагрузки на изделие. Важным является то, что такие высокие параметры температурных измерений достигаются на серийно изготавливаемых приборах-тепловизорах, которые легко использовать в практике.

В рамках настоящего исследования были проведены натурные измерения температурных полей железобетонных балочных пролетных строений, усиленных композиционными материалами, установленных на двух мостах. Усиления были выполнены различными организациями в разное время. Одновременно применялись традиционные акустический и визуальный методы контроля. Всего было осмотрено 18 балок, усиленных наклейкой холстов из углепластика BASF MBrace Fib CF 230/4900/300g и ламелей MBrace Lam CF 165/3000.

Измерения выполнялись при температуре окружающего воздуха $-4...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пасмурную погоду тепловизором Fluke Ti400, имеющим точность измерений $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и тепловую чувствительность $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Работы проводились с привлечением методов активной и пассивной термографии.

Пассивная термография направлена на изучение изменения температур объекта относительно показателей окружающей среды. Пассивный режим обнаружения скрытых дефектов возможен, если дефекты столь значительны, что температурные аномалии в зоне их нахождения возникают даже в стационарном режиме (дефекты типа непрочностей и рас-

слоений на границе композиционный материал – бетон относятся к таковым).

Активная термография используется для более подробного обследования и предполагает непосредственное термическое воздействие (нагрев или охлаждение), что влечет за собой изменение температуры поверхности на основе свойств материала. Применение технологии активной термографии позволяет получать более контрастные изображения, а также четче выделять области и формы дефектов.

При проведении эксперимента исследуемая поверхность нагревалась инфракрасной лампой до $50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 мин.

На рис. 1–3 показаны общий вид исследованных конструкций, их усиление композиционными материалами, а также подготовка поверхности при активной термографии.

На рис. 4, а показаны поля распределения температур (термограммы) по исследованным поверхностям, которые сопоставлены с результатами акустического контроля (см. рис. 4, б). Результаты измерений практически совпали, причем термографический метод показал значительно большую площадь некачественного контакта холстов усиления и бетона балок.

На рис. 5 показаны термограммы, полученные пассивным методом с расстояний 6,63 и 8,96 м. Области недостаточного контакта материалов также хорошо видны и сосредоточены на углах перегиба холстов.

Проведенные экспериментальные работы позволили сформулировать основные положения методики оценки качества и выявления неисправностей усиления железобетонных конструкций композиционными материалами.

1. *Выбор метода тепловизионного анализа.* Для оценки качества и выявления неисправностей усиления железобетонных конструкций композиционными материалами используют два метода тепловизионного анализа – активную и пассивную термографию.

При активной термографии активирующее термическое воздействие осуществляют инфракрасной лампой. В зависимости от интенсивности нагрева, который производится до тех пор, пока тепло от лампы не передастся поверхности, длительность термического воздействия не должна превышать 3–5 мин.

Температура нагрева не должна приводить к повреждению материалов и превышать 50–70 °С. До начала проведения замеров после прогрева должно пройти не менее 5 мин.

При пассивной термографии рекомендуется избегать во время измерений воздействия на исследуемую поверхность прямых солнечных лучей, а также не следует проводить работы в ветреную, дождливую погоду и снегопад.

Для целей выявления наличия, количества, ориентировочной площади дефектов и составления карты дефектов достаточно применения пассивного метода. При составлении подробного отчета о степени, формах, точных площадях дефектов, выявлении мест, где необходимо принять меры по устранению дефектов усиления, рекомендуется комплексное применение методов инфракрасной термографии (технологии пассивного контроля для составления карты дефектов, определения мест подробного анализа и активной термографии для получения детальных изображений повреждения).

2. Настройка параметров съемки. Перед проведением измерений следует выполнить настройку параметров съемки. Для повышения качества съемки в зависимости от технических характеристик тепловизора и свойств исследуемой поверхности устанавливают параметры, регулирующие восприятие излучаемого, отраженного и проходящего длинноволнового инфракрасного излучения, исходящего от объектов, расположенных в пределах поля зрения прибора.

3. Съемка термограмм. Рекомендуется производить съемку начиная с общего вида. Далее следует фиксировать термоизображения более детально (например, только левая половина, середина, правая половина). В момент фотографирования рекомендуется смотреть на исследуемую поверхность под прямым углом. Для того чтобы автоматически зафиксировать расстояние до объекта съемки, необходимо для каждого кадра использовать лазерную автоматическую фокусировку.

4. Анализ термограмм. Дефекты нарушают передачу тепловой энергии, так как имеют отличные от основного материала конструкции теплопроводные свойства. Таким образом на тепловом изображении выявляется

разность температур или температурный градиент в объекте.

Применительно к пассивной термографии, в случае, когда температура окружающей среды высокая (длительное нагревание объекта), дефекты на тепловом изображении будут более холодными, чем бетон. При низкой температуре окружающей среды (длительное охлаждение конструкции) бетон будет более холодным, чем, например, воздух, находящийся в непространстве.

При активной термографии тепловую стимуляцию производят кратковременно. Так как неплотность (воздух) принимает и отдает тепло легче бетона, то в зависимости охлаждения или нагрева участка дефект будет более холодным или теплым соответственно.

5. Обработка термоизображений. Данный этап камеральный, он производится при необходимости представления данных обследования в отчетах.

Обрабатываются изображения, как правило, с помощью специального программного обеспечения, прилагаемого к тепловизору. В случае дефектов в усилении композиционным материалом обработка требуется минимальная. Такого рода изображения достаточно контрастны по температуре и дополнительного уменьшения диапазонов не требуют. Поэтому при обработке устанавливаются при необходимости маркеры, обозначающие температуру заданных точек поверхности (например, температуру бетона и дефекта), и настраивается яркость инфракрасного изображения. Термограммы сохраняются в формате простого изображения. Делая яркость инфракрасного изображения нулевой, получают фотографию, соответствующую термограмме. Для большей наглядности можно добавить третье изображение, на котором видимое и инфракрасное изображения представлены в соотношении 50 : 50, и увидеть, как накладывается дефект на поверхность элемента конструкции.

Оформляются результаты либо в виде таблиц с комментариями о расположении дефектов, либо в виде рисунков-коллажей, где в ряд выстроены термограмма, наложенное на фотографию инфракрасное изображение и фотография элемента.



Рис. 1. Общий вид исследованного путепровода



Рис. 2. Усиление балок холстами



Рис. 3. Подготовка поверхности при активной термографии

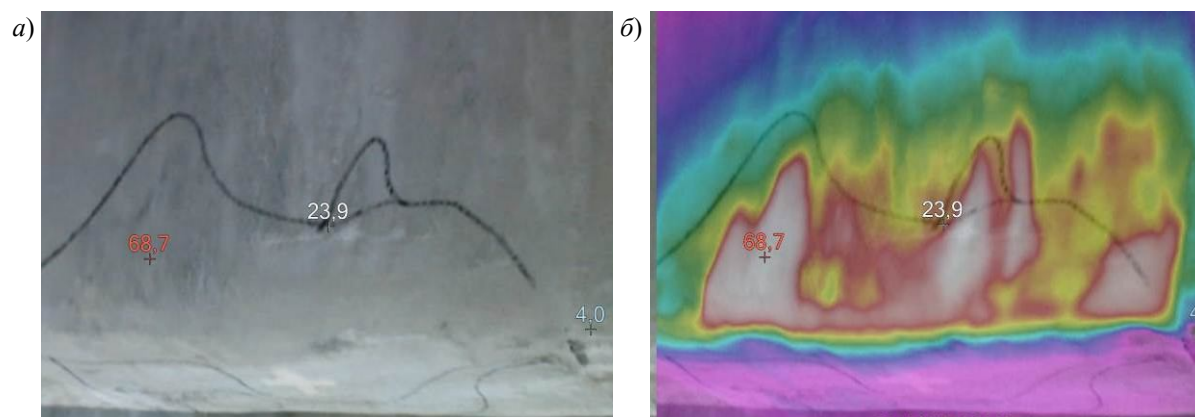


Рис. 4. Зона непрочности, выявленная акустическим методом (а) и методом активной термографии (б)

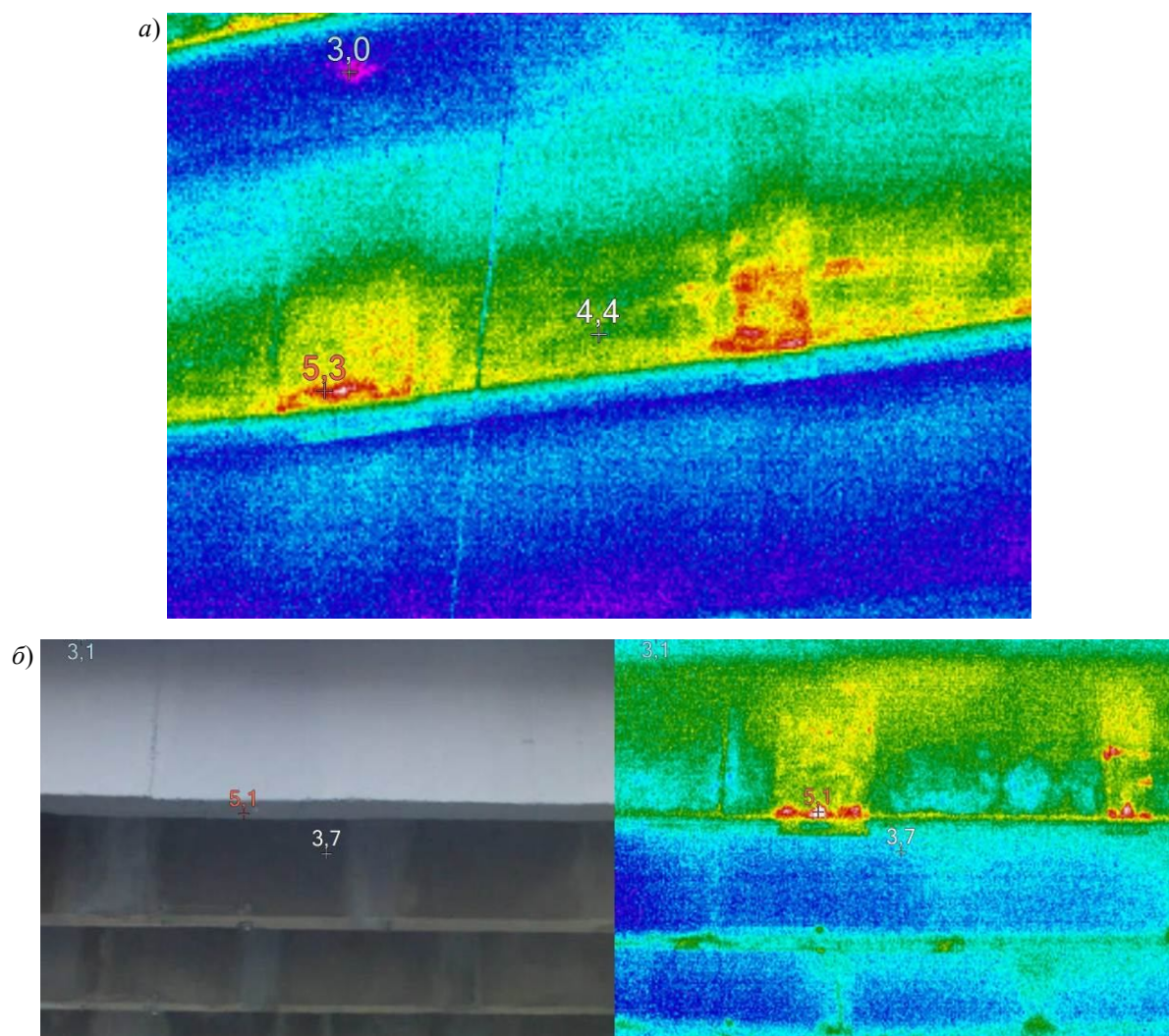


Рис. 5. Термограммы поверхности холстов, полученные методом пассивной термографии:
а – съемка велась с расстояния 6,63 м; б – с расстояния 8,96 м

Основные результаты и выводы

На основе натурных экспериментов разработаны основные положения методики применения инфракрасной термографии для выявления дефектов и повреждений в железобетонных конструкциях, усиленных композиционными материалами.

Определены границы применимости методов активной и пассивной термографии при выявлении мест повреждений усиления. Установлены принципиально важные параметры съемки, влияющие на эффективность обследования и достоверность его результатов. Предложены методики обработки и интерпретации термограмм.

В ходе работы произведены измерения температурных полей поверхностей усиления композиционным материалом на реально действующей конструкции и представлены обработанные результаты съемки. Также экспериментально подтверждено, что простая технология позволяет в режиме реального времени эффективно оценивать состояние усиленной конструкции.

Метод инфракрасной термографии обеспечивает быструю оценку качества конструкций, особенно в труднодоступных областях. Большие площади поверхности железобетонных конструкций могут быть быстро

отсканированы, и получены тепловые изображения, предоставляющие информацию об ослабленных областях. Методика позволяет давать достаточно точные сведения о количестве и степени дефектов в усилении.

Предложенная методика может быть внедрена при обследовании целостности и качества усиления композиционными материалами любых конструкций, в том числе при диагностике повреждений усиления особо ответственных объектов – инженерных и гидравлических сооружений, промышленных зданий, мостов и тоннелей.

Библиографический список

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М., 2009. 544 с.
2. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М., 2003. 76 с.
3. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных КМ // Изв. вузов. Стр-во. 2010. № 2. С. 112–124.
4. ОДМ 218.3.027–2013. Рекомендации по ремонту и усилению железобетонных конструкций мостовых сооружений с использованием гибких лент и тканей на основе углеродных волокон / РосДорНИИ. М., 2012. 49 с.
5. Шилин А.А., Пиеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 184 с.
6. Ekenel M., Myers J.J. Nondestructive Evaluation of RC structures strengthened with FRP laminates containing Near-Surface defects in the form of delaminations // Science and Engineering of Composite Materials. 2007. 14 (4). P. 299–315.
7. Ekenel M., Myers J.J. Nondestructive testing of Dallas county bridge in Missouri, USA // Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, August 2004. Vol. 8. P. 100–170.
8. Nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on RC structures using pulsed stimulated infrared thermography / F. Taillade, M. Quiertant, K. Benzarti, J. Dumoulin, C. Aubagnac // Infrared Thermography, Dr. Raghu V Prakash (Ed.), InTech. 2012. P. 193–208.
9. Review of thermal imaging systems in composite defect detection / I.J. Aldave, P.V. Bosom, L.V. González, I.L. Santiago, B. Vollheim, L. Krausz, M. Georges // Infrared Physics & Technology. 2013. Vol. 61. P. 167–175.
10. Shirazi A., Karbhari V.M. Quantifying defect and progression of damage in FRP rehabilitation of concrete through IR thermography // Proceedings of the Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007). 2007. P. 605–610.

S.P. Glushkov, L.U. Solovyev, N.E. Borisovskaya

The Detection of Defects in the Structures Reinforced with Composites by Infrared Thermography

Abstract. The aim of the study is to develop a method of assessment of the quality of reinforcement with composite materials of concrete bridge structures. The effective way of detecting defects caused by building activity and damages accumulated during the operation of the reinforced structures is the method of infrared thermography. The method is based on the recording of the surface temperature values, the difference of which gives the evidence of its condition. The study reveals that the thermal observation in the infrared diapason allows to determine precisely the position, shape and size (area) of the zones with faulty reinforcement (in particular – insufficient glueing and delamination of carbon fiber cloths from concrete). The full-scale experiments demonstrate the ease and efficiency of the method aimed at controlling the quality of reinforcement using infrared thermography. The methods of active and passive thermography are concerned; and the possibility of remote monitoring at any ambient temperature within the operating diapason of the infrared imager is discussed.

The developed method can be used for the assessment of technical condition of the reinforced concrete structures, including bridge spans reinforced with composite materials, as well as for the assessment of quality of reinforcement. The advantages of the above method are high accuracy and visibility, objectivity, security, high-speed inspection, the ability to monitor large areas from a large distance, getting immediate results with minimum requirements imposed on the measuring equipment (infrared imagers).

Key words: *composite materials; reinforcement; infrared thermography; defect; assessment of technical condition; spans.*

Глушков Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: rcpl@ngs.ru

Соловьев Леонид Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: lys111@yandex.ru

Борисовская Надежда Евгеньевна – аспирант-стажер кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: nadia.borisovskaya@yandex.ru