

Тепловизионный контроль качества работ по усилению железобетонных конструкций композиционными материалами

Л.Ю. Соловьев¹, А.Н. Костенко², А.А. Неровных¹, К.В. Кобелев¹, И.В. Засухин¹

¹Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

²БАСФ Строительные системы, Москва

Аннотация: В данной статье рассмотрена возможность выявления основных дефектов, возникающих при усилении железобетонных конструкций системами внешнего армирования на основе углеродных волокон. Проведено сравнение эффективности активного и пассивного методов термографии, а также рассмотрена возможность использования пассивного метода при отрицательных температурах окружающей среды. В лабораторных условиях были изготовлены железобетонные образцы с дефектами в виде пузырей воздуха и клея и проведено сравнение отображения этих дефектов на термограммах.

Ключевые слова: композиционные материалы, усиление, системы внешнего армирования, инфракрасная термография, дефект, оценка качества работ, оценка технического состояния, пролетные строения, опоры мостов.

В настоящее время технология усиления железобетонных элементов строительных конструкций композиционными материалами на основе углеродного волокна [1-2] получает все большее распространение на территории Российской Федерации.

Применение углепластиков для различных конструкций позволяет существенно увеличить несущую способность различных конструкций (на 30-50 % и более) [3-5], а также продлить срок их службы на 10-50 лет. Однако, эффективность усиления армированными фиброй пластиками зависит от многих факторов, где одним из самых важных является качество выполнения работ по монтажу системы внешнего армирования [6].

В действующих нормативных документах, в частности в СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами», содержатся требования к подготовке бетонной поверхности усиливаемой конструкции, работам по монтажу системы внешнего армирования, условиям окружающей среды при производстве работ, а также

рекомендации по контролю качества выполненных работ. Однако, как показывает практика, относительная новизна технологии и пока еще недостаточно широкое ее распространение приводят к тому, что установленная система внешнего армирования зачастую имеет дефекты, которые не позволяют ей в полной мере включиться в совместную работу с усиливаемым элементом конструкции.

Наиболее распространенными из таких дефектов являются: отсутствующие или недостаточные скругления ребер усиливаемого элемента (рис. 1а), непропитанные клеем участки холста или пустоты в клеевом слое между ламелями и бетоном (рис. 1б и 1в), а также пузыри воздуха или линзы клея под холстом (рис. 1г).

Перечисленные дефекты часто влекут за собой отслоение композиционного материала, при эксплуатации конструкций.

Пузыри воздуха могут появиться под холстом в тех случаях, когда работы по монтажу системы внешнего армирования выполняют при высокой температуре окружающей среды и прямом попадании солнечных лучей на поверхность усиливаемой конструкции (при сочетании этих двух факторов речь идёт о значениях температур от 25°C) или влажности основания, превышающей регламентированные значения.

В настоящее время для контроля качества используют два метода: акустический и визуальный.

Акустический метод, как правило, сводится к простукиванию усиленной поверхности. Основным недостатком указанного метода является протяженность диагностики вот времени и низкая точность определения площадей непропитанных клеем участков. Кроме этого, необходим непосредственный доступ к элементам конструкции, который часто затруднен или вовсе невозможен.



Рис. 1 – Наиболее распространенные дефекты систем внешнего армирования:
а) недостаточное скругление ребра; б) непропитанные клеем участок холста;
в) пустота в клеевом слое; г) пузырь воздуха под холстом

Визуальный контроль также является недостаточно информативным, поскольку с его помощью можно выявить только видимые (внешние) дефекты.

Метод инфракрасной термографии является доступным и быстрым для оценки качества монтажа систем внешнего армирования. Работы по

апробации и корректировке указанного метода ведут, начиная с 2015 г и по настоящее время, специалисты НИЛ «Мосты» ФГБОУ ВО СГУПС [7].

Проведенные исследования [8-14] показали, что метод инфракрасной термографии, основанный на регистрации тепловых полей обследуемых конструкций, имеет достаточную точность и позволяет с высокой эффективностью дистанционно обнаруживать повреждения и дефекты на большой площади усиленной конструкции.

Данный метод является простым в реализации, а также лишен недостатков, свойственных акустическому и визуальному методам.

Использование тепловизоров позволяет получать картину тепловыделения каждой точки контролируемой поверхности, а теоретический предел пространственного разрешения тепловизионной техники на современном уровне составляет 0,05 мм, и поэтому можно с достаточной точностью определить место, где идет более интенсивное тепловыделение. Важным является то, что такие высокие параметры температурных измерений достигаются на серийно изготавливаемых тепловизорах, которые легко использовать в практике.

Авторами были выполнены тепловизионные обследования балочного пролетного строения, столбчатых опор, а также лабораторных образцов, усиленных композиционными материалами. Усиление конструкций было выполнено специалистами разных организаций в разное время. Одновременно с тепловизионным контролем применяли акустический и визуальный методы. Всего было осмотрено 18 балок пролетных строений, 12 столбов опор, 3 лабораторных образца. Работы выполняли по принципам 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. К таковым, например, относятся дефекты типа непропитанных клеем участков и расслоений на границе углепластик-бетон. Активная термография используется для более подробного обследования и предполагает непосредственное термическое воздействие (нагрев или охлаждение), что повлечет за собой изменение температуры поверхности. Применение технологии активной термографии позволяет получать более контрастные изображения, а также четче выделять области и формы дефектов.

На рис. 2-4 показаны общий вид путепровода, на котором проводилось обследование балок пролетных строений, вид усиленных балок, а также подготовка их поверхности (прогрев) для проведения активной термографии.



Рис. 2 – Общий вид обследованного путепровода



Рис. 3 – Усиление балок ламелями и холстами



Рис. 4 – Подготовка поверхности при активной термографии

На рис. 5 приведены термограммы, полученные методом пассивной термографии с расстояния 6,6 и 9,0 м. Как видно, области недостаточного контакта материала усиления с поверхностью балок: полости и пузыри воздуха, хорошо идентифицируются и сконцентрированы в местах перегиба холстов.

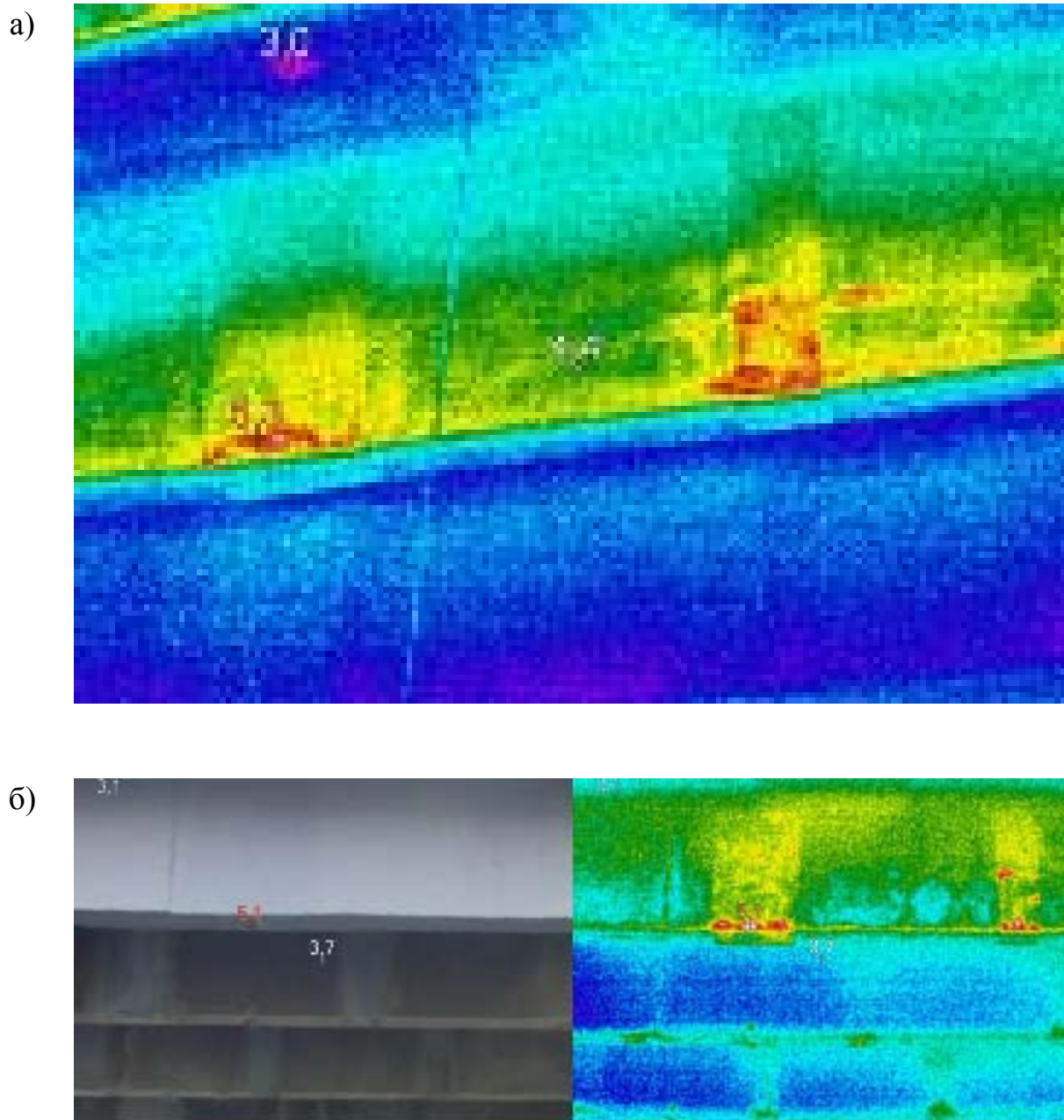


Рис. 5 – Термограммы поверхности холстов, полученные методом пассивной термографии (а – съемка велась с расстояния 6,6 м; б – с расстояния 9,0 м).

Полученные термограммы были сопоставлены с результатами визуального и акустического контроля (рис. 6). Термографический метод, помимо высокой сходимости, показал значительно бóльшие площади дефектов.

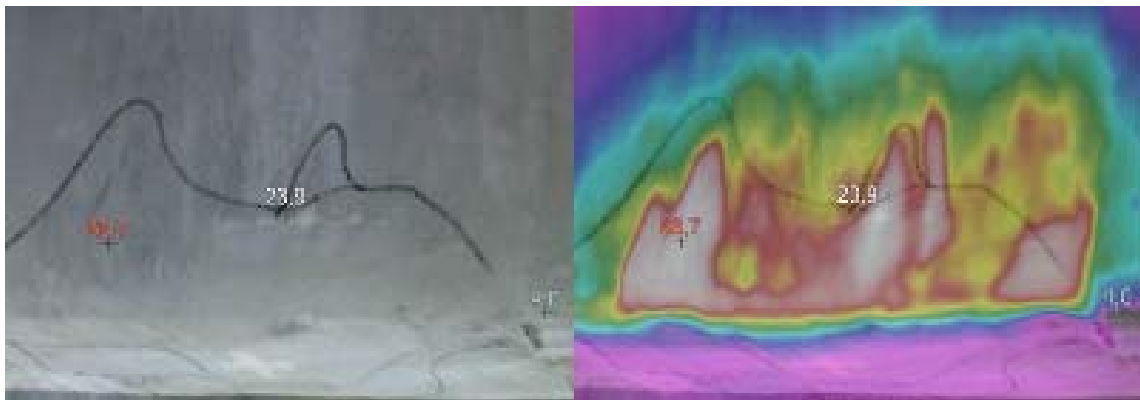
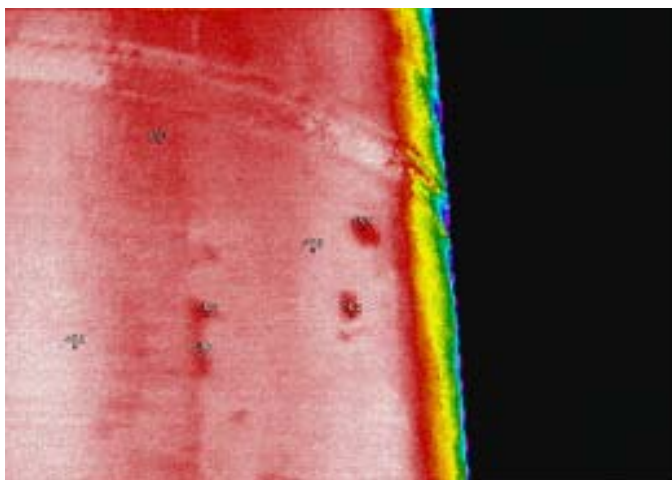


Рис. 6 – Зона непропитанного клеем участка, выявленная акустическим методом (черная линия), и термограмма поверхности

Пролетные строения были обследованы в период положительных температур. С целью выявления влияния температуры окружающей среды на качество выполняемой съемки было проведено обследование опор при отрицательных температурах окружающей среды.

На рис. 7 приведены термограммы, полученные методом пассивной термографии с расстояния 6,0 м.

а)



б)



Рис. 7 – Термограммы поверхности холстов, полученные методом пассивной термографии

Полученные данные позволяют говорить о возможности выявления дефектов методом пассивной термографии с большой детализацией при низких температурах окружающей среды.

С целью определения различий в термограммах конструкции с дефектами в виде пузырей воздуха и линз клея под холстом был подготовлен лабораторный образец с этими дефектами (рис. 8).

Как видно на термограмме, приведенной на рис. 9, линза клея не контрастирует с площадью материала усиления, не имеющей дефектов, следовательно, прослойка воздуха между холстом и бетоном образца отсутствует.

Основываясь на этом, можно сделать вывод о том, что наличие линз клея не является серьезным дефектом и слабо сказывается на степени сцепления углепластика с конструкцией.

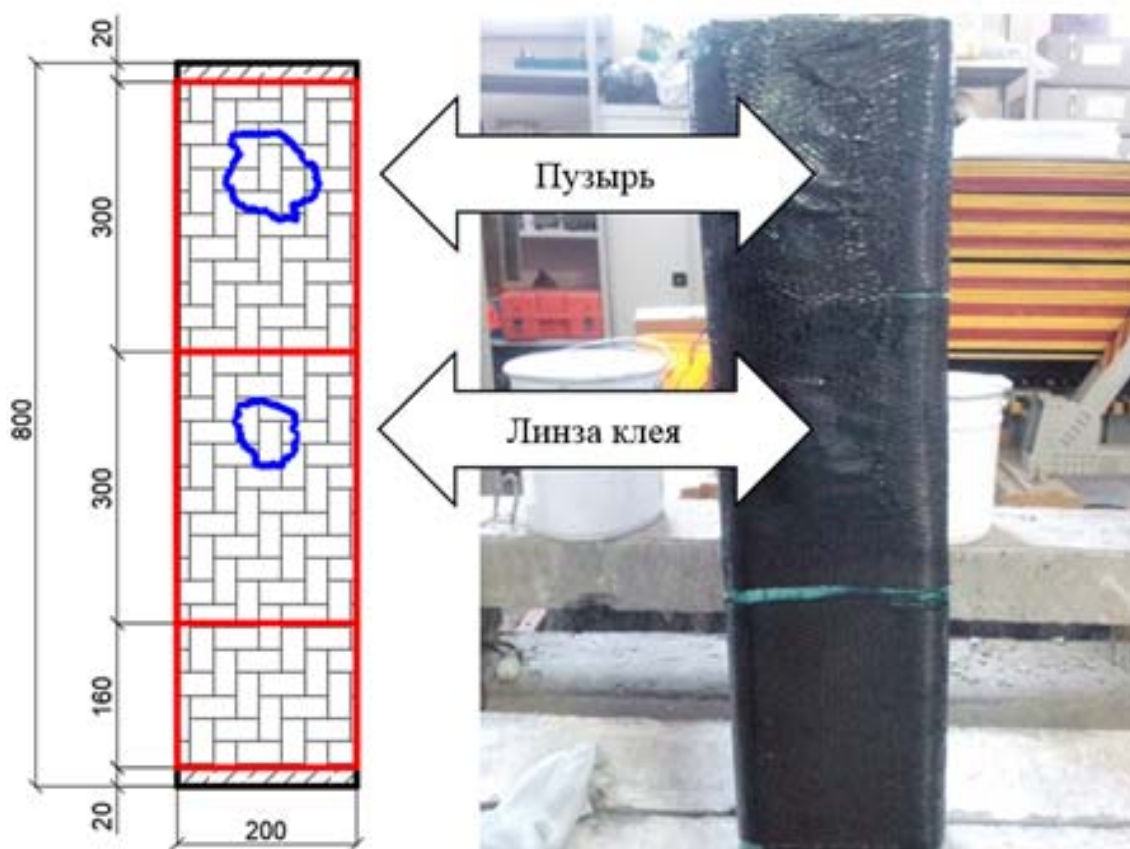


Рис. 8 – Общий вид лабораторного образца



Рис. 9 – Термограмма лабораторного образца

В ходе съемки лабораторных образцов была выполнена серия снимков под различными углами к поверхности, имеющей дефекты. В результате анализа снимков было выявлено незначительное изменение качества полученных термограмм.

Выводы

В ходе работы по оценке качества установки систем внешнего армирования на основе углеродных волокон методом инфракрасной термографии выполнены измерения температурных полей поверхностей усиления композиционными материалами как на эксплуатируемых конструкциях, так и на лабораторных образцах; представлены обработанные результаты съемки температурных полей; экспериментально подтверждено, что простая технология позволяет в режиме реального времени эффективно оценивать состояние усиленной конструкции.

Метод инфракрасной термографии обеспечивает быструю оценку качества монтажа систем усиления конструкций армированными фиброй пластиками, в том числе в труднодоступных местах.

Большие площади поверхности железобетонных конструкций могут быть быстро отсканированы тепловизором.

В результате съемки могут быть получены тепловые изображения, предоставляющие информацию об областях с некачественным усилением.

Методика позволяет получать достаточно точные сведения о количестве и степени дефектов в усилении.

В ходе проведенного исследования было выявлено, что метод пассивной термографии применим и имеет большую эффективность при отрицательных температурах воздуха.

Эксперимент, проведенный на лабораторных образцах, позволяет сделать выводы о незначительном влиянии линз клея на эффективность работы конструкции усиления.

Съемка поверхности, имеющей дефекты, под различными углами показала незначительное изменение качества полученных термограмм, что говорит о возможности применения данного метода в стесненных условиях.

Предложенная методика тепловизионного контроля может использоваться при оценке конструкционной целостности элементов и качества усиления композиционными материалами любых конструкций. Особенно рациональным считаем ее применение при контроле качества выполненного усиления особо ответственных объектов: инженерных и гидравлических сооружений, промышленных зданий, мостов и тоннелей.

Литература

1. Бокарев С. А., Устинов В. П., Яшнов А. Н., Смердов Д. Н. Усиление пролетных строений с использованием композиционных материалов // Путь и путевое хозяйство, 2008, №6, С. 30.
-



2. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Каргузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами // ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007, 184 с.

3. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов // Инженерный вестник Дона, 2017, №4.
URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826

4. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах // Инженерный вестник Дона, 2014, № 4-1. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734

5. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014. № 12. С. 496.

6. 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, 2012, 49с.

7. Глушков С. П., Соловьев Л. Ю., Борисовская Н. Е. Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015, № 4, С. 36.

8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. ИД Спектр, Москва, 2009, 544 с.

9. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. НТФ "Энергопрогресс", Москва, 2003, 76 с.

10. 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), pp. 299–315.

11. 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. V8. URL: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.3351&rep=rep1&type=pdf*

12. Taillade F., Quiertant M., Benzarti K., Dumoulin J. and Aubagnac C. Nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on RC structures using pulsed stimulated infrared thermography // *Infrared Thermography, Dr. Raghu V Prakash (Ed.), InTech, 2012, pp.193-208.*

13. Aldave I.J., Bosom P.V., González L.V., Santiago I.L., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Review of thermal imaging systems in composite defect detection // *Infrared Physics & Technology* 61 (2013), pp. 167–175.

14. 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, pp. 605-610.*

References

1. Bokarev S. A., Ustinov V. P., Yashnov A. N., Smerdov D. N. Put' i putevoe hozyajstvo, 2008, №6, p. 30.

2. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozicionnymi materialami [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials] Izdatel'stvo «Strojizdat», 2007, 184 p.

3. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826

4. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 4-1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734
 5. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. S. 496.
 6. ODM 218.3.027-2013. Rekomendacii po remontu i usileniyu zhelezobetonnykh konstrukcij mostovykh sooruzhenij s ispol'zovaniem gibkih lent i tkanej na osnove uglerodnykh volokon. [Recommendations on repair and reinforcement of reinforced concrete structures of bridge structures using flexible tapes and fabrics based on carbon fibers] RosDorNII, 2012, 49p.
 7. Glushkov S. P., Solov'ev L. Yu., Borisovskaya N. E. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2015, № 4, p. 36.
 8. Vavilov V.P. Infrazrasnaya termografiya i teplovoj kontrol'. [Infrared thermography and thermal control] ID Spektr, Moskva, 2009, 544p.
 9. Vavilov V. P., Aleksandrov A. N. Infrazrasnaya termograficheskaya diagnostika v stroitel'stve i energetike [Infrared thermographic diagnostics in construction and energy] NTF. "Energoprogress", Moskva, 2003, 76 p.
 10. Ekenel, M., Myers, J.J. Science and Engineering of Composite Materials. 2007. 14(4), 299–315 pp.
 11. Ekenel, M., Myers, J.J., Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, August 2004. V8.
 12. Taillade F., Quiertant M., Benzarti K., Dumoulin J. and Aubagnac C. Infrared Thermography, Dr. Raghu V Prakash (Ed.), InTech, 2012, 193-208 pp.
 13. Aldave I.J., Bosom P.V., González L.V., Santiago I.L., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Infrared Physics & Technology 61 (2013), 167–175 pp.
 14. Shirazi A., Karbhari V.M. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007) 2007, 605-610 pp.
-