

45. Sarcar Shondeep L., Diatta Yaya, Autcin Pierre-Claude. Microstructural study of aggregate /hydrated paste interface in very high strength rivet gravel concretes //Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec.2-4, 1987. – Pittsburgh. –1988. – pp.111-116.
46. Xu Ziyi, Liu Linzhy. Research on superfineflyashactivity// Proc.Beijing Int. Symp. Cem. and Concr., Beijing, May 14-17, 1985. Vol.1. –Beijing. – 1986. – pp.493-507.
47. Sarkar Shendeep L. Mikrostruktura of a very low water/cement silica fume concrete //Microscope –1990. – V38. – №2. – pp.141-152.
48. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связей в технологии бетонов / Бабков В.В., Каримов И.Ш., Комохов П.Г. //Известия ВУЗов. Стр-во. – 1996. – №4. –С.41-48.
49. Зоткин А.Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне // Бетон и железобетон. – 1994. – №3. – С.7-9.
- Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – №6. – С.16-20.
50. Красный И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей //Бетон и железобетон. – 1987. – №5. – С.10-11.
51. Леонович И.И. Испытание дорожно-строительных материалов / И.И Леонович, В.А. Стрижевский, К.Ф. Шумчик. - Минск: «Высшая школа», – 1991. - 232 с.
52. Попов Л.Н. Лабораторный контроль строительных материалов и изделий /Л.Н. Попов. Справочник. - М.: Стройиздат, 1986. - 349с.
53. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В Тимашев, В.Г. Савельев. - М.: Высш. шк., 1981. – 333 с.

УДК 669.14.018.29:620179.13

ТЕПЛОЙ КОНТРОЛЬ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Е. А. Мойсейчик¹⁾, С. Д. Шафрай²⁾, А. Е. Мойсейчик¹⁾

¹⁾ Белорусский национальный технический университет,

пр. Независимости, 146а, 220114, г. Минск, Беларусь, emoisseitchik@mail.ru

²⁾ Новосибирский государственный университет архитектуры дизайна и искусств,

Красный пр-т, д. 38, 630099, г. Новосибирск, Россия

Приведены характеристики наиболее вероятных зон расположения дефектов в мостовых пролетных строениях из стали. Рассмотрены часто используемые на практике приемы выявления трещиноподобных дефектов в стальных элементах мостов. Показано, что более эффективными методами выявления дефектов могут быть тепловые методы, основанные на анализе инфракрасного излучения с поверхности исследуемых элементов. Рассмотрены достоинства и недостатки теплового контроля трещин и приведены рекомендации по его применению в пролетных строениях мостов.

Ключевые слова: тепловой контроль, мосты, стальные элементы, повреждения, выявление.

При эксплуатации стальных мостовых конструкций обращают пристальное внимание на развитие повреждений конструкций, дефекты в металле элементов, в заклепочных, болтовых, сварных соединениях (коррозия, трещины, различные повреждения соединений, расслаивание металла, «распучивание» клепанных листовых пакетов и сдвоенных элементов), на проверку состояния элементов конструкций (искривленных, деформированных с потерей устойчивости и др.). Особое внимание уделяют местам, в которых наиболее вероятно появление трещин.

В заклепочных соединениях конструкций трещинообразованию предшествует ослабление заклепок соединений. Трещины в таких соединениях появляются:

- в узлах прикрепления элементов сквозных пролетных строений;
- в связях и пересечениях упругих плоских элементов;
- во втором, третьем и четвертом рядах заклепок узлов сопряжения продольных и поперечных балок;
- в соединительных накладках продольных балок и в соединениях, узлах прикрепления элементов связей к продольным балкам;
- в клепаных элементах, усиленных сваркой;
- в плитах верхнего и нижнего балансирования опорных частей пролетных строений;
- в верхних узлах прикрепления поперечных балок к главным балкам пролетных строений с ездой поверху.

При болтовых соединениях элементов трещины появляются в аналогичных местах.

В сварных соединениях конструкций трещины возможны как в сварных швах, так и в основном металле. Наиболее вероятно зарождение и развитие трещин в зонах:

- резкого изменения сечения элементов;
- на концах сварных швов горизонтальных и вертикальных ребер жесткости;
- вблизи стыков, ребер, диафрагм, накладок;
- в соединительных швах и швах, расположенных поперек усилий в соответствующем элементе, околошовной зоне;
- в сварных швах с технологическими дефектами - непроварами, подрезами по углам, протечками расплавленного металла, шлаковыми включениями, порами, прогарами, незаполненными кратерами и др.

Обнаружение трещин в стальных элементах устанавливается визуально-оптическим методом или посредством неразрушающего контроля. Технология визуально-оптического контроля достаточно сложная. При визуальном осмотре обращают внимание на трещины в краске, на подтеки ржавчины как косвенные признаки присутствия трещин. Эти места очищают от краски и исследуют с помощью лупы или дефектоскопа. Более надежные результаты дает снятие тонкой стружки металла по предполагаемому направлению расположения трещины. При выполнении работ не допускают резких и глубоких надрезов металла. Раздвоение стружки свидетельствует о наличии трещины. Дефекты на концах сварных швов выявляют инструментальным исследованием предварительно очищенной до металлического блеска и промытой 10-20% водным раствором азотной кислоты.

Изложенная технология обнаружения трещин должна повторяться для всех опасных зон. Такая «ручная» технология весьма трудоемкая, с большими затратами времени, дорогостоящая.

Кроме трещин элементы стальных пролетных строений мостов содержат и другие дефекты, в окрестности которых сталь находится в предельном состоянии, предшествующем зарождению трещин. Выявить такое состояние металла традиционными методами неразрушающего контроля затруднительно. К тому же такие опасные зоны часто контроленепригодны.

Для исследования труднодоступных мест элементов стальных пролетных строений новые возможности предоставляет использование тепловых пассивных технологий неразрушающего контроля в комбинации с визуально-оптическими методами. Действительно, теплообразование в зонах дефектов, трещин происходит при действии переменной технологической нагрузки. Так, при прохождении по мосту поезда возникает переменное нагружение конструкций и металл нагревается в местах ослабленных заклепок, болтов, конструктивных дефектов, трещин и др. Образование тепла на таких участках происходит в результате внешнего и внутреннего трения. Такого нагрева достаточно, чтобы зафиксировать расположение его источника высокочувствительным тепловизионным прибором (например, ИРТИС-2000 и др.) и удостовериться в существовании дефекта смежным методом.

Тепловая диагностика фрикционных соединений элементов стальных пролетных строений мостов. К таким элементам относятся сопряжения и узлы стальных конструкций на заклепках и с соединениями на высокопрочных болтах. Особенности их работы на сдвиг иллюстрируются схемами рисунка 1.

Работу заклёпок можно разделить на три стадии. В первой стадии сила на соединение распределяется на листы пакета фрикционными усилиями, которые возникают на контактных поверхностях листов при обжатии пакета заклёпками. При дальнейшем увеличении нагрузки на соединение происходит сдвиг соединяемых листов пакета до касания с поверхностью стержня заклёпки. Вторая стадия завершается искривлением оси стержня заклёпки, возникновением силы смятия и среза заклёпки. Увеличение нагрузки на соединение усиливает изгиб стержня заклёпки, вызывает внецентренное растяжение в зонах сопряжения головок со стержнем заклёпки. Начальные силы трения (внешнего) на этой стадии ослабевают. На 3 стадии внешнее усилие воспринимается смятием металла листов в зоне контакта со стержнем заклёпки и срезом стержня заклёпки по сечениям *а-а* и *б-б* (рис.1).

Аналогично заклёпочному соединению могут работать соединения на высокопрочных болтах. Для мостовых конструкций с такими соединениями расчет ведут по первой стадии (работа сил трения).

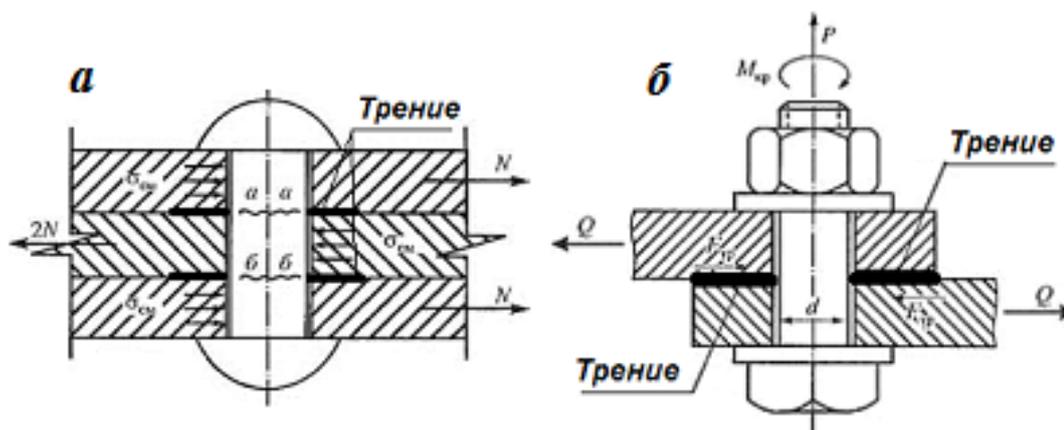


Рис. 1. Схема работы заклёпочного (а) и фрикционного (б, с высокопрочным болтом) соединений

При статическом растяжении образцов со стыком стальных листовых элементов на заклёпках (рис. 2, а) и на фрикционных болтах (рис. 2, б) установлено [1], что в сечениях листов проявляется неравномерность распределения напряжений в соединении с заклёпками. Также получено, что выносливость соединений на фрикционных болтах выше, чем у заклёпочных [1]. Можно предполагать, что такие особенности работы двух типов сопряжений объясняются их конструктивным исполнением и различиями в состоянии зоны контакта трущихся поверхностей.

Теплообразование при работе на статическую и переменную нагрузку. Для обеспечения более высоких коэффициентов трения соединений на высокопрочных болтах используют различные виды обработки контактных поверхностей (дробеструйную, пескоструйную, газопламенную, дробеметную и др.). Относительное смещение таких шероховатых контактных поверхностей приводит к пластическому деформированию металла в плоскости контакта и его разогреву [2]. Повышение температуры в зоне контакта за десятитысячные и меньшие доли секунды достигает в микрообъемах температуры плавления металла. Тепло от разогретых очагов распространяется вглубь контактирующих тел. Величина температуры в объемах металла, примыкающих к поверхностям трения, зависит от теплофизических свойств тел, их размеров, условий теплоотвода, мощности трения и величины площадки, на которой производится тепло. Экспериментально получено, что в тепло переходит до 90% всей мощности трения [2].

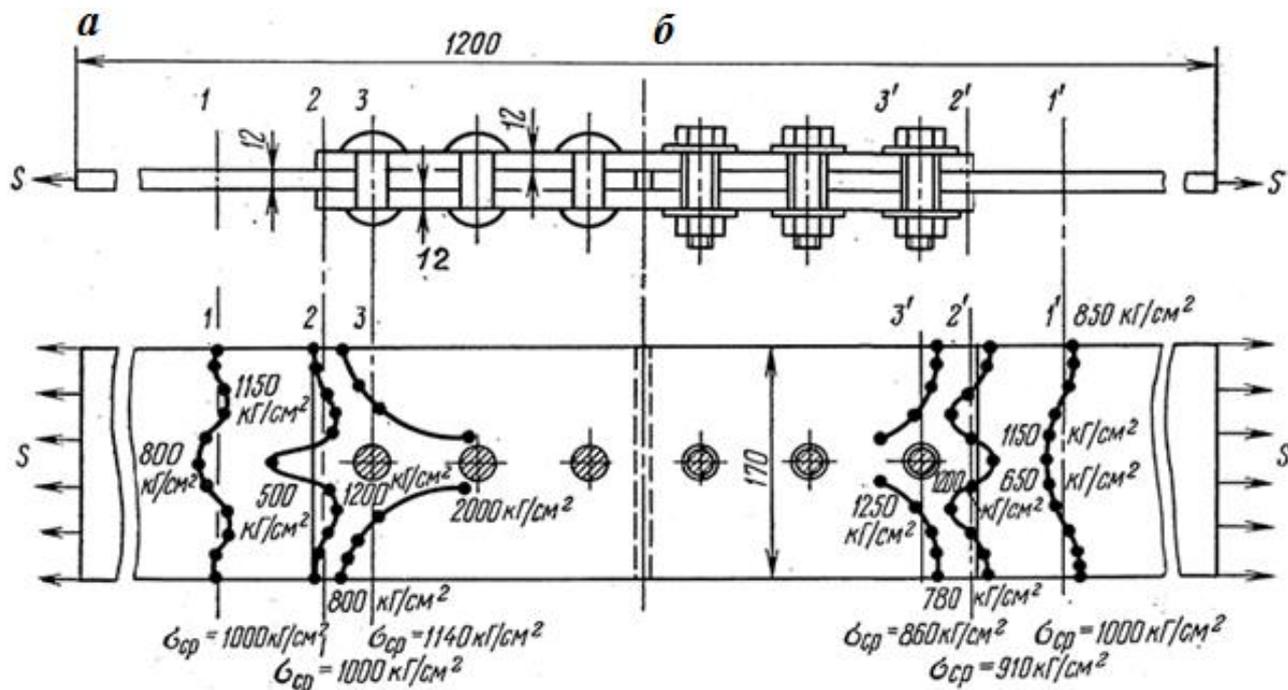


Рис. 2. Эпюры напряжений в сопоставимых сечениях соединений стальных листов на заклепках (а) и высокопрочных болтах (б) [1]

Расчеты тепловыделения при трении выполняют в рамках различных модельных представлений [3; 4]. При проведении расчетов трущиеся тела принимаются гомогенными, а их теплофизические характеристики постоянными. Предполагается, что работа сил трения полностью переходит в тепло. Сравним зону прогрева тела у поверхности трения с толщинами соединяемых мостовых конструкций (h_i) по выражению (1) [4]:

$$h_i > \sqrt{a_i t}. \quad (1)$$

Принимая a_i по [5] при $t = 1$ сек получим для низкоуглеродистой стали условие $h_i > 7$ мм, которое для несущих элементов мостовых конструкций выполняется. Это позволяет трущиеся тела моделировать полупространствами [4]. Для простейшей одномерной модели сплошного фрикционного контакта, работающего при больших давлениях на трущиеся тела при допущении постоянной мощности тепловыделения, можно в первом приближении определить среднюю поверхностную температуру T в плоскости сухого трения по выражению (2) [4]:

$$T = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_1 \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}} \quad (2)$$

где $q_1 = 0.5 f p V$; f – коэффициент трения; p – контактное давление; V – скорость относительного скольжения тел трения.

Для фрикционного соединения двух одинаковых листов из низкоуглеродистой стали, стянутых высокопрочным болтом диаметром 24 мм, с поверхностью трения, обработанной дробеструйным способом, получаем по формуле (2), что $T - T_0 = 680$ °С. Такое повышение температуры во фрикционном соединении происходит в тонком слое толщиной в два-три десятка микрон. На поверхности листа толщиной 12 мм повышение температуры тогда будет немного выше одного градуса.

При прохождении поезда по мосту нагрузка периодически повторяется. Это может вызвать более значительное повышение температуры в фрикционных соединениях. Кроме

того, на величине повышения температуры поверхности могут сказаться и другие факторы, например, смятие металла соединяемых листов, деформирование заклепок и др.

О тепловой диагностике фрикционных соединений. Из формулы (2) следует, что фрикционный нагрев пропорционален мощности трения. При предельном сжатии контактируемых элементов температура поверхности будет выше, чем в зонах с ослабленными заклепками или болтами. Это позволяет выполнять тепловую диагностику фрикционных соединений. Измерение поверхностной температуры элементов следует вести тепловизионными приборами с точностью не ниже $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, с записью термофильма, в течение всего процесса нагружения фрикционного соединения. Необходимо принимать меры по устранению помех термографированию [6] (например, выбирать удобное время суток, применять экраны для защиты от солнечного и рассеянного теплового излучения и т.д.). Расстояние от объектива камеры до исследуемой поверхности должно быть минимальным ($0,7 - 1,5\text{ м}$). Бесплезными для исследований температурных полей являются панорамные термокадры (например, всего моста, отдельной пролетной конструкции). Для систематизации узлов, расшифровки результатов полезно использовать контрастные маркеры, выполнять съемку в двух спектрах (видимом и инфракрасном).

Обнаружения усталостных трещин в стальных мостовых конструкциях с использованием метода инфракрасной термографии. В работе [7] изложены результаты лабораторных и полевых (натурных) исследований возможностей обнаруживать усталостные трещины активным и пассивными тепловыми методами. Натурные испытания проводились на пролетных строениях стального моста (рис. 3). На инфракрасную диагностику трещин в элементах моста влияют многие факторы. В число таких факторов входят размеры трещин, расстояние до камеры, величина приложенного напряжения, время нагрева, время задержки, состояние поверхности (неокрашенный и матово окрашенный образец). Трещины можно выявлять при активном (внешнем тепловом воздействии) и пассивном (появление тепла при деформировании металла, трении между элементами) тепловом контроле.

В качестве источника тепла при активном методе (рис. 4) можно использовать галогенную лампу кварта-Т3 (quart-T3) [7]. Потребляемая лампой мощность - около 500 Вт при напряжении 120 вольт. Лампа излучает большую часть своей энергии в ближнем инфракрасном диапазоне (ниже 3 мкм), что существенно не противоречит диапазону чувствительности типичной ИК-камеры (3–5 мкм и 8–12 мкм). Проектор преобразует излучение линейного источника в одну полосу света с помощью плоскоцилиндрических выпуклых линз размером 1 на 2 дюйма (длина фокуса - 80 см). Линзы изготовлены из стекла ВК7, которое может выдерживать высокие температуры и имеет высокую эффективность (90%) в передаче энергии ближнего инфракрасного диапазона по сравнению с другими типами материалов. Для управления режимом и периодом подачи тепла (время нагрева и время задержки) использовался контроллер. Фиксация температурных полей велась инфракрасной (ИК) камерой, которая могла обнаруживать изменение температуры приблизительно в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ с быстродействием 434 кадра в секунду. ИК-камеру и контроллер можно было настроить, контролировать и калибровать с помощью программного обеспечения DeltaTherm, разработанного StressPhotonic, Inc.

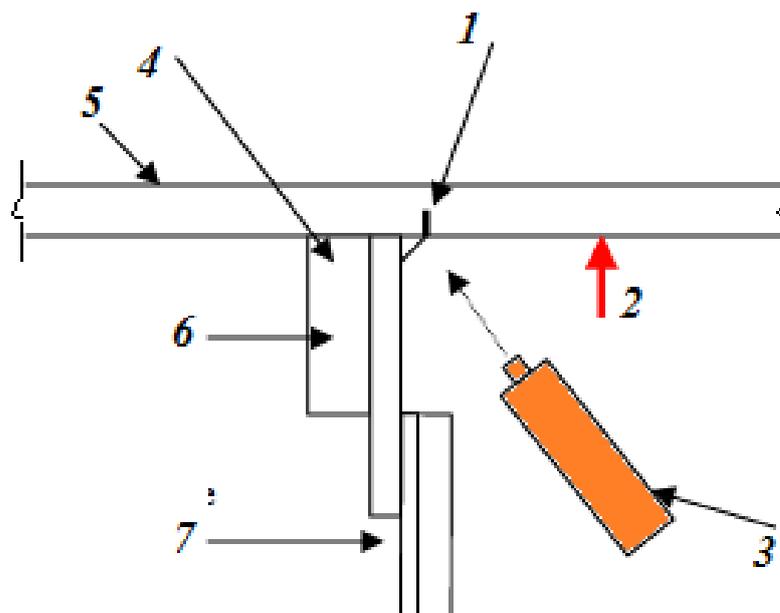
Результаты полевых испытаний показывают, что наименьшая трещина, обнаруживаемая ИК-камерой, больше, чем наименьшая трещина, обнаруживаемая невооруженным глазом. Эти испытания выявили, что глубина трещины является важным фактором, влияющим на обнаружение трещины. Сквозные трещины можно уверенно выявлять с помощью ИК-камеры. Однако трещины, не проходящие по всей толщине, нелегко обнаружить при использовании ИК-камеры. Поверхность и условия освещения существенно влияют на результаты. Время нагрева в полевых условиях больше, чем то, которое используется в лабораторных испытаниях. Это происходит из-за повышенной температуры поверхности стенки балки и из-за отражения тепла от глянцевой поверхности стенки балки. Основным недостатком, замеченным при полевых испытаниях, является то,

что эта система ИК-обнаружения трещин требует соответствующего пространства и времени для надлежащей калибровки приборов перед использованием. Калибровка должна выполняться в закрытом помещении с минимальным освещением, чего трудно добиться в полевых условиях. Таким образом, использованный комплекс приборов для ИК-обнаружения трещин не совсем подходит для применения в полевых условиях. Исследования [7] показали, что приборная система для полевых условий должна быть устройством портативным, объединяющим источник тепла, ИК-камеру и компьютер в одном модуле.

В результате лабораторных исследований и результатам выявления трещин в элементах мостовых конструкций установлены следующие особенности неразрушающего теплового контроля мостовых сооружений.



Рис. 3. Тепловой контроль узла соединения поперечной связевой рамы со стенкой стальной балки автодорожного моста (с использованием подъемника) [7]



1 – ИК-камера, 2 – внешний источник тепла, 3 – трещина в зоне сварки, 4 – ребро жесткости, 5 – элемент конструкции, 6 – соединительная пластина, 7 – связевой элемент

Рис. 4. Инспекция трещины методом активного теплового контроля (ИК-камера на том же уровне, что и трещина)

Влияние критических факторов на эффективность ИК излучения.

Размер трещины.

1. Глубина трещины по отношению к толщине элемента является важным фактором, влияющим на обнаружение ИК-трещины. Для пассивного подхода разная глубина трещин дает разные коэффициенты интенсивности напряжения. При активном подходе, независимо от длины трещины, чем выше отношение глубины трещины к толщине элемента, тем сильнее затруднен тепловой поток и тем легче обнаружить трещину.

2. Значительное падение температурного профиля проявляется только после того, как трещина становится сквозной. Неглубокие трещины, как правило, не могут быть обнаружены.

3. Наименьшая трещина, которую можно обнаружить при активном или пассивном подходе с помощью использованной системы больше наименьшего размера трещины, которую можно обнаружить невооруженным глазом.

Расстояние от ИК-камеры до образца.

1. Существует ограничение на максимальное эффективное расстояние как при активном, так и при пассивном методах. Самое длинное эффективное расстояние активного подхода больше, чем самое длинное эффективное расстояние пассивного подхода для того же размера трещины.

2. Трещина, обнаруженная по эффектам заторможенного теплового потока (эффекты излучательной способности), может быть обнаружена с большего расстояния, чем трещина, выявленная по эффектам контрастного отражения на поверхности.

3. Матовая и глянцевая поверхности обеспечивают одинаковое эффективное расстояние при проведении теста в закрытых лабораторных условиях, но эффективное расстояние от матовой поверхности значительно больше, чем от глянцевой поверхности при той же длине трещины, времени нагрева и времени задержки при тестировании на открытом воздухе из-за помех при отражении.

Величина приложенного напряжения.

1. Существует минимальное значение напряжения, при котором трещина обнаруживается тепловыми методами. Более высокий уровень приложенного напряжения делает трещину более заметной.

2. Эффект концентрации напряжения из-за трещины неотличим от эффектов концентрации напряжения из-за окружающей неправильной геометрии (отверстие под заклепку, сварной шов и т. д.) при приложении напряжения ниже минимального значения.

3. Минимальное значение напряжения, которое делает трещину обнаруживаемой, часто намного выше, чем напряжение от эксплуатационных воздействий в реальной конструкции.

Время нагрева и время задержки

1. Начальная температура и начальное тепловое распределение в образце существенно сказываются при активном методе. Если начальная температура образца повышена по отношению к калибровочной пластине, то при активном подходе обнаружение трещины затруднено.

2. Для выявления трещины необходимо минимальное время нагрева места вероятного нахождения трещины. Трещина не может быть обнаружена, если продолжительность нагрева меньше этого минимального времени.

3. Для сквозной трещины время нагрева, превышающее минимально необходимое время нагрева, не оказывает отрицательного влияния на ИК-детектирование при активном подходе. Отношение максимального температурного градиента в трещине к среднему градиенту существенно не изменяется при разном времени прогрева.

4. Для сквозной трещины чем больше время нагрева, тем выше тепловой контраст из-за затруднения движению теплового потока.

5. Сквозную трещину невозможно обнаружить ни при каком времени нагрева, если это время меньше минимально необходимого времени нагрева. Для времени нагрева,

превышающего минимально необходимый период, изменение времени прогрева не оказывает существенного влияния на обнаружение трещины.

6. В случае очень мелкой трещины (глубина трещины менее 50 % толщины элемента) ее, как правило, невозможно обнаружить. В случае трещины средней глубины (трещина не сквозная, но имеет глубину более 50 % толщины элемента), тепловизионная камера часто ее проявляет.

7. Для трещины с глубиной меньше толщины элемента или трещины на неровной поверхности сочетание времени нагрева и времени задержки оказывает существенное влияние на возможность ее обнаружения.

8. Различные времена нагрева приводят к различию максимального температурного градиента в трещине. Более того, оптимальное время задержки дает максимальное значение температурного градиента в трещине.

Состояние поверхности.

1. Поверхности, окрашенные в матовый цвет, улучшают качество тепловизионных изображений и позволяют увеличивать максимальное эффективное расстояние между камерой и контролируемой поверхностью. Окрашивание матовым цветом уменьшает эффекты отражения от поверхности и другие ложные сигналы, исходящие от неоднородной поверхности образца.

2. Результаты для образцов с матовой поверхностью незначительно отличаются от результатов для более отражающих (глянцевых) образцов, когда исследования проводятся в закрытых лабораторных условиях. Однако результаты для матовых образцов отличаются от результатов для глянцевых образцов, когда испытания проводятся на открытом воздухе. Разница в результатах, наблюдаемых для образцов с глянцевой и матовой поверхностью, связана со значительными различиями в количестве света, отраженного двумя поверхностями.

Наблюдения по результатам полевых испытаний.

1. Наименьшая трещина, обнаруживаемая ИК-камерой в полевых условиях, больше, чем наименьшая трещина, обнаруживаемая невооруженным глазом.

2. Результаты полевых испытаний, соответствующие результатам лабораторных, показывают, что глубина трещины является важным фактором, влияющим на обнаружение трещины.

3. Только сквозные трещины могут быть четко обнаружены в полевых условиях с помощью ИК-камеры.

4. Поверхность и условия освещения существенно влияют на результаты ИК-термографирования. Для создания заметного теплового контраста требуется время нагрева, превышающее соответствующее время в лабораторных испытаниях.

Общие выводы и рекомендации.

1. Трудно найти уникальный набор оптимальных значений критических факторов (время нагрева, время задержки, расстояние от ИК-камеры до объекта и т. д.), для каких-либо конкретных условий тестирования. Многие факторы (например, температура поверхности объекта, мощность и форма источника тепла, чувствительность ИК-камеры, условия тестирования, взаимосвязаны, а эффекты взаимодействия) затрудняют установление набора оптимальных параметров, условий.

2. Существенным недостатком системы ИК-тестирования трещин, используемой в исследовании [7], является то, что для ее реализации требуется как пространство, так и время для надлежащей калибровки перед использованием. Калибровка при этом должна выполняться в закрытом помещении с минимальной освещенностью, что в полевых условиях трудно выполнимо. Поэтому рассмотренная в [7] система ИК-обнаружения трещин не совсем подходит для использования в полевых условиях. Более оптимальна система представляющая собой портативный блок, объединяющий источник тепла, ИК-камеру и компьютер в одном модуле.

3. Наименьший размер трещины, обнаруживаемой при активном или пассивном подходе с помощью системы, использованной в [7], больше, чем наименьший размер трещины, обнаруживаемой невооруженным глазом.

4. Наименьшая трещина, обнаруживаемая в лабораторных и полевых условиях, составляет 1,25 см и 70 мм соответственно. Однако возможность обнаружения небольшой трещины зависит от чувствительности ИК-камеры. Повысив чувствительность камеры, можно обнаружить более мелкие трещины.

5. Концепция обнаружения трещин с помощью ИК-термографии считается жизнеспособной для определенных приложений. Результаты исследования [7] доказывают, что трещины можно обнаружить с помощью ИК-термографии. Производительность ИК-системы можно увеличить, если использовать ИК-камеры с высокой чувствительностью.

В работе [8] показано, что тепловыми методами в сочетании с визуальными и георадаром можно эффективно выявлять дефекты в железобетонных настилах канадских мостов. Такие настилы быстро приходят в негодность из-за воздействия различных механизмов деградации. Воздействие циклов заморозания и оттаивания в сочетании с проникновением ионов хлорида из противобледенительных составов обычно повреждает настил моста с большей скоростью, чем другие воздействия.

Обнаружение подповерхностных дефектов с помощью дистанционного зондирования и сбора данных без физического контакта является преимуществом при комплексном применении инфракрасной термографии и георадарных исследований. Совместное использование двух методов позволяет достоверно выявлять подповерхностные расслоения, растрескивания, коррозионные дефекты. При этом данные инфракрасной термографии поверхности дорожного настила используются для получения местоположения дефектов (карты расположения) в настиле моста, а георадарные данные - для создания карты коррозионных дефектов.

Литература.

1. Протасов, К. Г. Металлические мосты/ К. Г. Протасов, А.В. Теплицкий, С.Я. Крамарев, М. К. Никитин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Транспорт», 1973. – 352 с.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1968. – 480 с.
3. Амосов, А. П. Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. - 363 с.
4. Амосов, А. П. Элементарные теплофизические модели трения. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – т. 13. – №4(3).– 2011.– С.656–662.
5. Казанцев, Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgy, 1975. – 368 с.
6. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – 2-е изд. – М.: Спектр. – 2013. – 575 с.
7. Trakulyingyong, V., and M. D. Bowman. The Examination of Infra-Red Techniques for Inspection of Steel Structures I & II. Publication FHWA/IN/JTRP-2000/18. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2002, doi: 10.5703/1288284313332.
8. T. Omar, M. L. Nehdi, Non-Destructive Testing of Bridge Deck Using Passive Infrared Thermography and Ground Penetrating Radar, (2016), Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, ON.