

УДК 624.21.014.2

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*PINPOINTING DEFECTS
OF STEEL SPANS OF RAILWAY
AND MOTORWAY BRIDGES USING INFRARED
TECHNOLOGIES OF NONDESTRUCTIVE TESTING*

Рассмотрены особенности неразрушающего контроля мостовых конструкций с использованием термографии. Показано, что такой способ контроля работоспособности обладает высокой чувствительностью, наглядностью и объективностью результатов, позволяет в процессе мониторинга с высокой производительностью в бесконтактном режиме определять локализацию и идентификацию дефектов, отслеживать их развитие с помощью пассивных и активных методов теплового контроля.

Specific features of nondestructive examination of bridge structures using thermography are covered. It is shown that such a method of serviceability control has high sensitivity, and yields convincing and objective results. In the course of monitoring it allows to locate and identify defects with high effectiveness and in contactless mode, keep track of their propagation by means of passive and active methods of thermal control.

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ СТАЛЬНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ И ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ

В процессе изготовления, монтажа и эксплуатации элементов стальных пролетных строений мостов в них возникают и развиваются различные дефекты [1-3]. По природе возникновения эти дефекты можно разделить на несколько групп: рас-

*Е.А. Мойсейчик,
кандидат технических наук, доцент
Белорусского национального техниче-
ского университета, г. Минск, Бела-
русь*

стройство заклепочных и болтовых соединений; усталостные повреждения; коррозия металла; хрупкие разрушения; механические повреждения.

Расстройство заклепочных соединений является одним из распространенных дефектов клепаных пролетных строений. Оно определяется износом соединений вследствие перемещений (сдвигов) по плоскостям контакта соединяемых элементов. Эти сдвиги в свою очередь находятся в прямой зависимости от интенсивности движения транспортных средств, напряженного состояния соединения, характера динамического воздействия. Большое влияние на скорость и величину износа оказывают конструктивные особенности соединения, среда, в которой они работают. В зависимости от степени износа соединения коэффициент концентрации напряжений для заклепочных отверстий может изменяться в несколько раз.

При анализе работы заклепочного соединения полезно различать три стадии их работы. На 1-й стадии работы соединения все усилие передается трением по поверхностям контактов соединяемых элементов. При этом у кромок заклепочных отверстий возникает минимальная концентрация напряжений. На 2-й стадии работа соединения характеризуется передачей усилий на стенки отверстий как трением, так и через стержни заклепок. Концентрация напряжений при этом у кромок отверстий возрастает. На 3-й стадии усилия передаются только через стержни заклепок на стенки отверстий, и концентрация напряжений у кромок заклепочных отверстий достигает максимальной величины. Внешним признаком работы соединения в этой стадии служит расстройство (осла-

бление) заклепок. Переход в последнюю стадию наступает раньше появления внешних признаков расстройств заклепок. На этой стадии работы заклепок облегчается доступ к кромкам отверстий влаги и агрессивных газов, способствующих появлению коррозии и ускорению процесса развития усталостных и коррозионно-усталостных трещин.

В процессе эксплуатации слабые заклепки обнаруживаются при отстукивании заклепок молотком массой около 0,2 кг. Эту операцию обычно выполняют следующим образом. Ударив сбоку по головке заклепки молотком, приставляют палец к месту удара и вновь ударяют по головке заклепки с противоположной стороны. Если заклепка слабая, то палец воспринимает легкое дрожание головки. Чувствительность этого способа повышается, если к головке приставить специальный боек в виде стального стержня длиной 10-12 см и толщиной 5-6 мм с утолщением на конце. Ослабленность заклепки фиксируется и по звуку: при ударе заклепка издает глухой дребезжащий звук.

Усталостные повреждения накапливаются постепенно при действии многократных повторных нагрузок, приводящих к появлению магистральных трещин и разрушению элементов и соединений, заклепок и высокопрочных болтов. Усталостные трещины часто появляются при сравнительно низких напряжениях. Накопление усталостных повреждений происходит в зонах максимальной концентрации напряжений. В клепаных конструкциях такими зонами являются заклепочные отверстия. В сварных и усиленных с применением сварки пролетных строениях наиболее опасными концентраторами напряжений являются резкие изменения сечений элементов, концы фланговых швов, дефекты швов (шлаковые включения, трещины, непровары и др.), участки с неблагоприятными остаточными напряжениями. Растягивающие остаточные напряжения в сварных конструкциях могут значительно снижать, а сжимающие, наоборот, повышать усталостную прочность элементов. Усталостные дефекты часто инициируются коррозионными повреждениями. Наиболее подвержены усталости участки с резким изменением сечения, вызванным обрывом листов, приваркой планок, накладок, ребер жесткости, диафрагм; концы фланговых швов; различного рода заправки отверстий и т.п.

При обследовании металлических пролетных строений на места возможного возникновения трещин и их внешние признаки обращается особое внимание. Подтеки ржавчины и шелушение краски часто указывают на возможную трещину. Крупные трещины обнаруживаются при тщательном осмотре невооруженным глазом или через лупу. Мелкие трещины выявляют различными

приборами неразрушающего контроля. Скрытые трещины и другие дефекты (непровары, шлаковые включения) обнаруживают рентгено- и гаммаграфированием, ультразвуковыми, электромагнитными приборами. В полевых условиях для обнаружения трещин опасный участок очищают от краски и ржавчины, шлифуют наждачной бумагой и протравливают 10-15-процентным раствором азотной кислоты. После протравливания поверхность промывают водой, вытирают насухо и просматривают через лупу или микроскоп. В некоторых случаях снимают тонкую стружку вдоль предполагаемой трещины хорошо заточенным небольшим зубилом. Разделение стружки на две полосы подтверждает наличие трещины.

Коррозионные повреждения элементов эксплуатируемых металлических мостов в основном зависят от качества текущего содержания сооружений и способов антикоррозионной защиты. Уменьшая площадь сечения элементов, коррозионные повреждения снижают их грузоподъемность и часто приводят к замене пролетных строений. Скорость развития коррозии зависит от ряда факторов: химического состава металла, способов его обработки и защиты, природы агрессивной среды, влажности, температуры, напряженного состояния и др.

Основным условием возникновения и развития коррозии является увлажнение поверхности металла. Загрязнение воздуха частицами угля, золы, хлоридов, сульфидов или газами (сернистый), а также наличие на поверхности элементов пролетных строений всякого рода солей, грязи и др. способствуют появлению и развитию коррозии. Температура металла заметно сказывается на развитии коррозии: повышение температуры ускоряет коррозию, понижение - замедляет. В зонах концентрации напряжений дополнительные коррозионные дефекты ускоряют образование трещин. Коррозионные дефекты чаще возникают в пролетных строениях с ездой поверху, элементы и узлы которых в большей степени подвержены загрязнению. В пролетных строениях с ездой по низу чаще корродируют элементы, расположенные ниже уровня мостового полотна. В мостовых конструкциях наиболее часто проявляется коррозия поверхностная (распределенная по поверхности элемента) и местная (в виде очагов). Поверхностной коррозии подвержены главным образом элементы нижних поясов ферм, пояса балок проезжей части, связи между фермами, а также связи между продольными балками. В нижних поясах главных ферм из-за отсутствия или недостаточности дренажных отверстий, а также в результате плохой очистки образуется застой воды и скопление грязи, вызывающие коррозию внутренних

элементов сечения коробки. Развитие местной коррозии проявляется в элементах проезжей части. В продольных балках проезжей части чаще всего подвергаются коррозии верхние горизонтальные листы, а при их отсутствии - горизонтальные полки верхних поясных уголков в местах контакта с мостовыми брусками. В узлах прикрепления продольных связей к поясам главных ферм и продольных балок развивается коррозия от скопления в этих местах грязи. У поперечных балок местная коррозия поражает верхние горизонтальные листы и фасонки, в нижних узлах - прикрепления к главным фермам.

Коррозия может проявляться в виде распухиваний элементов сечений от отложения продуктов коррозии в зазорах между листами или полками уголков. Этот вид повреждения является следствием конструктивных недостатков - «мешков», «щелей», «пазух», большого шага заклепок и т.д., особенно характерных для пролетных строений с многораскосными и многорешетчатыми фермами. Наиболее уязвимы для таких повреждений плоские раскосы пролетных строений с многораскосными и многорешетчатыми фермами, образованные парными листами; нижние узлы прикрепления раскосов к поясам. Коррозионные повреждения этого типа наблюдаются и в элементах нижних поясов главных ферм, диагоналях нижних продольных связей из двух уголков с большим шагом соединительных заклепок. Скорость развития коррозии может достигать 0,1-0,2 мм в год.

Хрупкие разрушения происходят без заметной пластической деформации и контролируются по развитию трещин, зарождающихся в дефектных, перенапряженных местах. Таким разрушениям более подвержены сварные конструкции. Склонность к этим разрушениям зависит от химического состава и внутреннего строения металла, конструктивной формы элемента, вида напряженного состояния, скорости деформирования, температуры окружающей среды и т. д.

Механические повреждения элементов чаще возникают в процессе эксплуатации от ударов негабаритных грузов по элементам пролетных строений и при изготовлении и монтаже конструкций. Повреждения, вызванные ударами перевозимых грузов, могут быть самыми разнообразными: разрывы отдельных элементов или их частей; местные и общие искривления элементов. Наиболее распространенными дефектами, допущенными при изготовлении и монтаже, являются местные искривления (вмятины) элементов или отдельных их участков и общие искривления. Степень опасности механических повреждений зависит не только от размеров повреждения в элементе,

но и от напряженного состояния и его изменений в связи с появлением дефекта. В поврежденных ударом элементах могут возникать надрывы, трещины.

Традиционные инструментальные методы выявления перечисленных дефектов в эксплуатирующихся конструкциях предполагают наличие непосредственного доступа к поверхности обследуемых элементов и являются достаточно трудоемкими. Дефекты первых трех групп в процессе восприятия нагрузки обладают способностью генерировать тепло или рассеивать и изменять интенсивность теплового потока в материале. Эти изменения теплового потока можно использовать для неразрушающего контроля конструкций (НKK) методами термографии [4-7]. Термография, и ИК-термография в частности, является прекрасной альтернативой традиционным методам НKK. Она безопасна, не требует непосредственного контакта датчика с поверхностью элемента и дает результаты за более короткие сроки в сравнении с другими методами. Термографические методы НKK основаны на принципе передачи тепла в твердых телах. Данная технология в последнее время начала привлекать к себе повышенный интерес, чему способствовали успехи в развитии инфракрасных технологий и систем формирования изображений.

Целью настоящей статьи является изложение особенностей применения ИК-термографии для выявления дефектов в элементах стальных мостовых конструкций с помощью пассивных и активных методов теплового контроля.

ВЫЯВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЕЩЕСТВЕННОЙ СРЕДЕ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПОЛЮ ПОВЕРХНОСТИ

При отсутствии движения тела и его элементов уравнение распространения тепла по объему представляется в виде [8]

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t} - q_v - \operatorname{div}(\vec{\lambda} \operatorname{grad} T) = 0. \quad (1)$$

где q_v - интенсивность (плотность) внутренних источников тепла различной природы (химические реакции в теле, фазовые превращения и др.);

ρ - плотность материала;

$\vec{\lambda}$ - матрица теплопроводности для неоднородного тела;

c_p - удельная теплоемкость среды при постоян-

уровни температур на каких-либо смежных участках отличаются. Тепловая энергия перемещается от участка с более высокой температурой к участку с более низкой температурой. Поток тепловой энергии распределяется в этом направлении до тех пор, пока температуры участков не станут одинаковыми. Увеличение разницы температур между двумя участками приводит к увеличению скорости теплового потока. Тепловой градиент (температурный градиент) - это разница температур между двумя точками, которые разделены единицей расстояния. Температурный (тепловой) контраст, т.е. разница между температурами в различных точках объекта, определяет видимость подповерхностного дефекта. Тепловой контраст возрастает с увеличением разницы между теплопроводностью дефекта и теплопроводностью основной массы материала тела. Посредством теплового сканирования воспроизводится изображение, которое соответствует распределению температурных полей по поверхности объекта. Способ передачи тепла через объект зависит от свойств такого объекта. Так, дефект, который будет препятствовать движению силового потока через элемент, будет также сдерживать поток тепла через этот элемент. Соответствующее распределение температуры можно использовать для локализации дефекта, так как поток тепла изменяется в окрестности дефекта из-за неодинаковой теплопроводности. Это явление способствует созданию высокого теплового контраста в объекте и выявляет причину нарушения в тепловом изображении.

ными и бездефектными зонами элемента. Эти приемы можно разделить на внешние, при которых волна тепловой энергии поступает извне на поверхность, а затем распространяется через материал, пока не столкнется с дефектом, и внутренние, в которых энергия в различной форме вводится в исследуемый элемент с целью стимулирования дефекта к возбуждению электромагнитных колебаний ИК-диапазона (рис. 3). В качестве внешних источников служат различные оптические устройства (фотовспышки - для импульсного теплообразования, галогенные лампы - для периодического возбуждения тепла). Внутренние возбуждения могут достигаться возбуждением деформаций в теле, которые по различным механизмам «внутреннего трения» на дефектах вызывают теплообразование (механические колебания различной частоты и амплитуды).

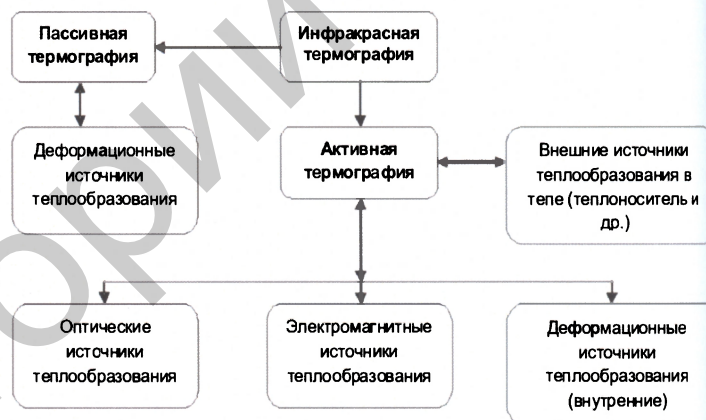


Рисунок 3 - Классификация методов ИК-термографического контроля

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИК-ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Для обнаружения дефекта в конструктивном элементе часто достаточно наблюдать за установившимся распределением температуры на поверхности тела. В иных случаях место дефекта можно нагреть или охладить, чтобы усилить внутренний теплообмен. Поэтому методы неразрушающего контроля с использованием инфракрасной термографии можно разделить на активные и пассивные (рис. 3).

Могут использоваться разнообразные приемы возбуждения теплового контраста между дефект-

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

ИК-камера фиксирует тепло, как излучаемое, так и отражаемое объектом. Известно [4-7], что эмиссионная способность элемента всецело зависит от распределения тепла по образцу, а отражаемое от поверхности тепло определяется состоянием и цветом поверхности элемента, освещением и т.д. Внутреннее состояние объекта можно выявлять только по эмиссионной способности. Поэтому влияние отражения на термоизображение должно быть минимизировано. Этого добиваются изменением отражающей способности поверхности элемента соответствующей окраской, покрытием. Повышения качества изо-

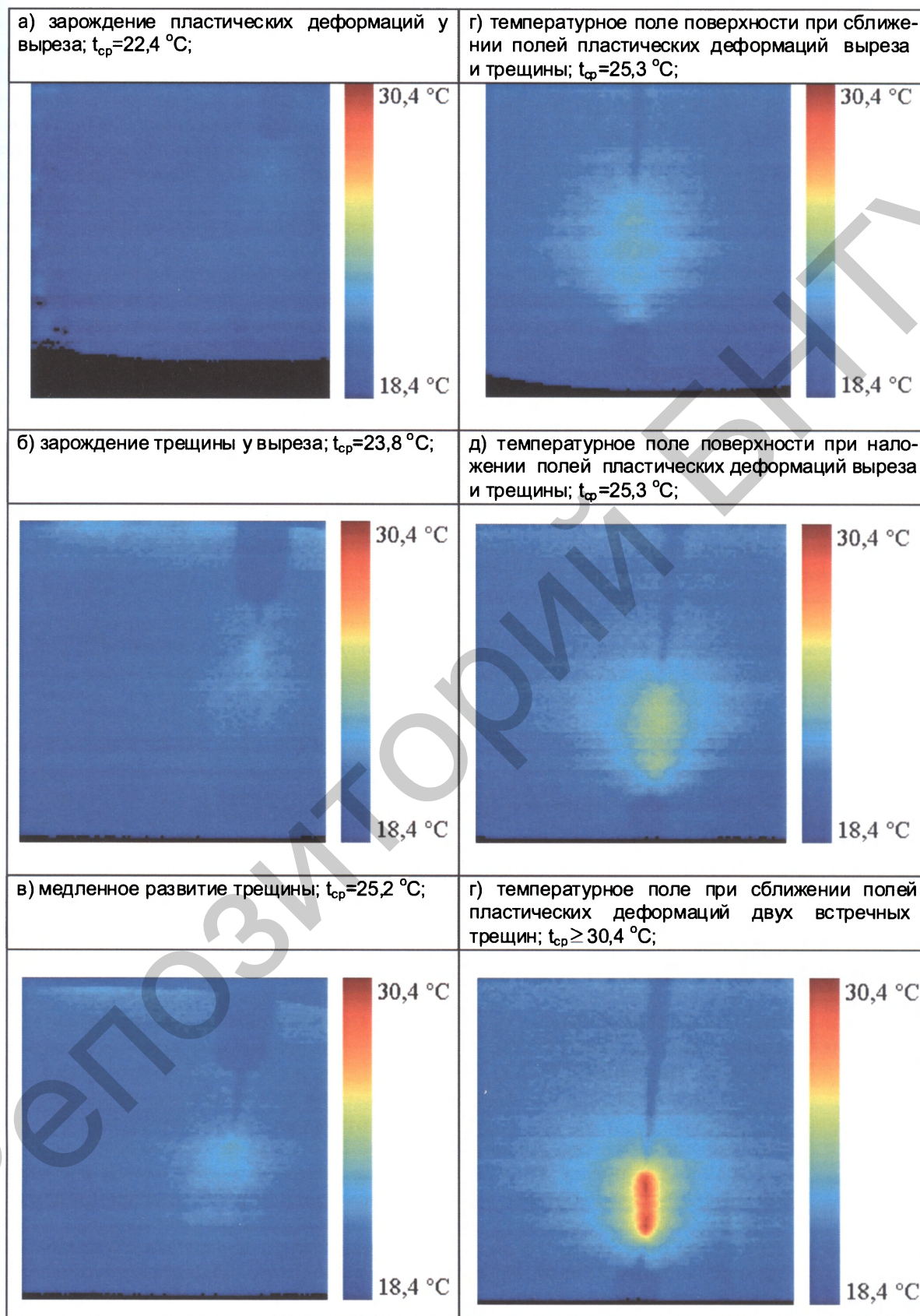


Рисунок 2 - Динамика изменения теплового поля поверхности у вершины надреза и медленно развивающейся трещины в листе из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5 мм

ном давлении.

Для изотропного тела $\bar{\lambda} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, λ - коэффициент теплопроводности.

Распределение температуры для изотропного стержня без внутренних источников вытекает из уравнения

$$\frac{\delta T}{\delta t} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\delta^2 T}{dx^2} = 0, \quad (2)$$

где $\frac{\lambda}{\rho c_p}$ - коэффициент температуропроводности среды, представляющий собой меру скорости изменения температуры единицы объема тела при прохождении через него теплового потока, пропорционального λ .

Аналитическое решение уравнения (2) имеет вид

$$T(x, t) = T_L + \frac{4(T_0 - T_L)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin\left(\frac{2n+1}{L} \pi x\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{L^2} \pi^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} t\right). \quad (3)$$

Выражения (1), (2), (3) показывают, что распределение температур должно соответствовать особенностям внутреннего строения неоднородного тела. Действительно, при его нагревании тепловая энергия будет передаваться теплопроводностью (в твердой части тела), конвекцией (в жидкой фазе) и излучением (в пустотах). Различие теплопроводности между составляющими (фазами) тела может в значительной степени влиять на распространение тепла, и, следовательно, на распределение объемной и поверхностной температуры объекта. Тепловое состояние неоднородного тела часто исследуется в инфракрасном электромагнитном волновом диапазоне ($3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ и $8\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$) и характеризуется совокупностью следующих параметров: размеров тела; теплопроводностью; излучательной способностью поверхности, формой и размерами дефектов; теплопроводностью в месте дефекта. Распределение температуры в теле зависит от перечисленных параметров, а также от геометрии тела и временной диаграммы нагрева/охлаждения. Если в теле нет дефекта, то температурный градиент должен быть «плавным», но если имеется дефект, то он вызовет отклоне-

ние температурного градиента вследствие разности теплопроводности на смежных участках. Так, при растяжении стального стержня диаметром d температура T по его длине (сечения x_1 - x_8) распределяется в соответствии с рисунком 1, а при движении трещины в стальном листовом элементе в вершине трещины возникает значительный нагрев (рис. 2).

Благодаря ИК-термографическому изображению можно обнаружить дефекты (трещины, неоднородности), потому что их теплопроводность отличается (обычно в меньшую сторону) от теплопроводности окружающего материала. Теплопроводность материала может локально меняться в тех областях, которые подвергались механическому или тепловому воздействию. Такие изменения зачастую являются более заметными, и поэтому их легче обнаружить, чем изменения в свойствах материалов. Тепловой поток наблюдается в веществах всякий раз, когда

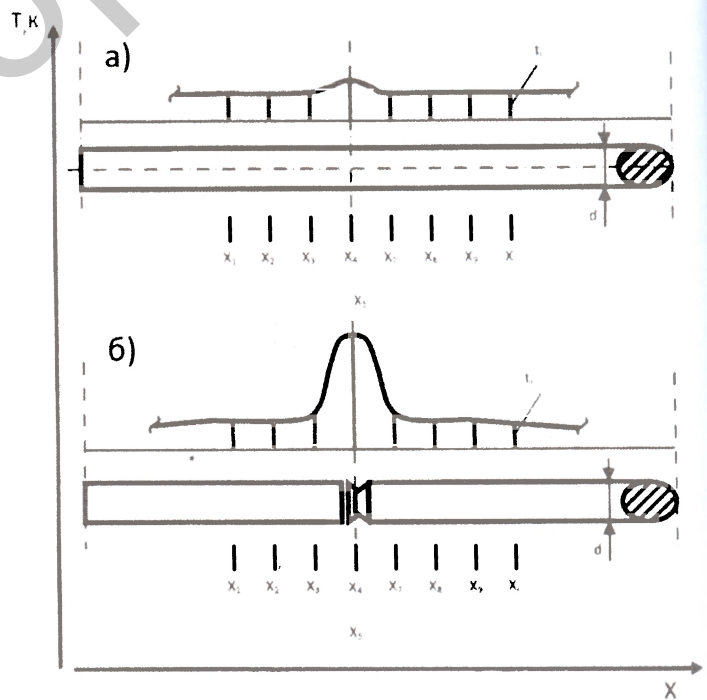


Рисунок 1 - Схема распределения температуры по длине гладкого (а) и надрезанного (б) стержней при их растяжении

бражения и чувствительности можно достичь, если на поверхность напылить матовое красочное покрытие. Перед нанесением покрытия с поверхности исследуемого объекта удаляется окалина, и поверхность обезжиривается. Поверхность должна быть достаточно гладкой, чтобы обеспечить нанесение равномерного слоя краски. Кроме этого, она должна испускать инфракрасные лучи равномерно под большим углом зрения, иметь хорошую теплопроводность, легко наноситься и удаляться. Толстые покрытия могут вызывать затухание сигнала. Наиболее часто используется черная матовая краска. Однако эмиссионная способность матовых красочных покрытий при любых цветах выше, чем у поверхностей металла с покрытиями или без покрытий.

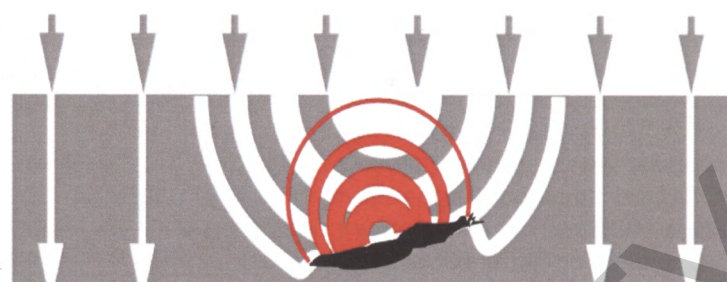


Рисунок 4 - Схема выявления дефекта при активном ИК-термографировании

АКТИВНЫЙ МЕТОД ТЕРМОГРАФИИ

Активный ИК-термографический метод требует использования внешнего теплового источника для получения желаемого изображения. Во многих случаях тепловой импульс направляется на образцы, и поток тепла, перемещающийся через объект, контролируется. Дефект в объекте изменяет поток тепла и вызывает нарушение в изображении (рис. 4).

ПАССИВНЫЙ МЕТОД ТЕРМОГРАФИИ

Пассивный метод не требует использования дополнительного источника тепла для получения желаемого теплового изображения. При пассивном методе небольшое увеличение температуры, которое производится дефектом, отслеживается на тепловом ИК-изображении. Имеется много способов возбуждения инфракрасных волн внутренними дефектами исследуемого элемента (рис. 3). В последнее время активно разрабатываются методы, основанные на эффекте возбуждения в твердых телах тепловых волн дефектом при его облучении упругими волнами ультразвукового [9-11] и других диапазонов (рис. 5).

О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА СТАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ИК-ТЕРМОГРАФИИ

Технология мониторинга заключается в сборе заданной периодичностью информации по температурному полю исследуемого сооружения, его элементов, экспериментальному и расчетному анализу тепловой информации и подготовке предложений по обеспечению требуемой рабо-

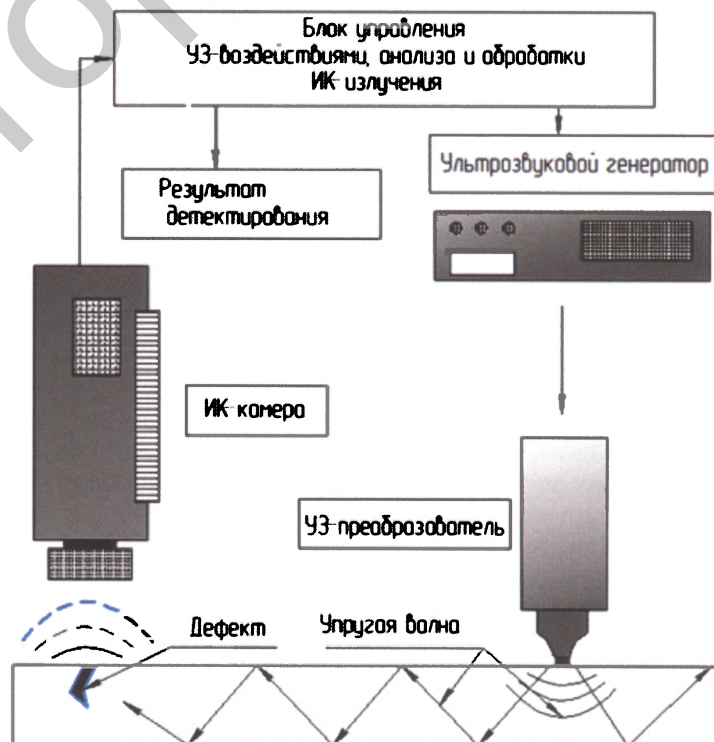


Рисунок 5 - Схема локализации дефектов в элементе при их облучении упругими волнами

тоспособности, термографическому контролю за качеством ремонтно-восстановительных работ. В наиболее полном виде процесс мониторинга предполагает анализ проектной документации сооружения; определение количественных значений температуры в точках поверхности контролируемой конструкции и дополнительных теплотехнических характеристик материала элементов; качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности; выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемых элементах; численное моделирование теплотехнических параметров элементов конструкции и сопоставление их с данными термографирования; идентификацию дефектов. Тепловой инструментальный контроль выполняют в соответствии с технологическими картами или технологическими инструкциями, разрабатываемыми на основе действующих технических нормативно-правовых актов и содержащими технологию сканирования. Тепловой контроль совмещают с фиксацией состояния конструкции и ее дефектов в видимом диапазоне и, при необходимости, - с другими методами неразрушающего контроля. Взаимосвязь названных этапов и их последовательность показаны на рисунке 6.

Следует иметь в виду, что к настоящему времени достаточно детально разработана технология сканирования надземных строительных и иных объектов [4-7], особенности которой зафиксированы в ряде нормативных документов. Для мостовых сооружений подобные нормативные документы отсутствуют, что определяется прежде всего многофакторностью решаемых задач.

В силу этого на основании предварительного изучения технической документации по конкретному сооружению приходится разрабатывать технологию производства работ по ИК-сканированию. Существенным ограничением при этом является



Рисунок 6 - Блок-схема ИК-сканирования пролетного строения

необходимость производства работ в сжатые сроки из-за постоянно изменяющейся температуры окружающего воздуха, что требует увязки технических параметров сканирующей аппаратуры со скоростью (v) ее продвижения вдоль конструкции (элемента), расстоянием от поверхности исследуемого элемента и т.д. Предварительно скорость движения термографической установки вдоль конструкции можно определить по зависимости

$$v = \frac{k b}{T} \quad (4)$$

где b – размер пятна поверхности элемента конструкции, сканируемого за один кадр;

$k = 0,8 \div 0,9$ - коэффициент, учитывающий перекрытие кадров;

T - время сканирования полосы поверхности конструкции или время формирования кадра.

Окончательно скорость (v) назначается в процессе сканирования. При этом оптимальной будет скорость, при которой разрешение записи в направлении движения столь же высоко, как и в обратном. При повышении скорости происходит потеря детальности; понижение же не дает выигрыша в получении информации. Это существенно для получения качественного изображения конкретных дефектов. Опыт показывает, что при использовании термографов с частотой вращения зеркала 30-300 Гц наиболее приемлемое качество термоизображений можно получить при скорости движения в пределах $v = 0,5 \div 7$ км/ч. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать 30 % от начального значения. Поверхности объекта в период тепловизионных измерений не должны подвергаться дополнительному тепловому воздействию от биологических объектов, источников освещения. Минимально допустимое приближение оператора тепловизора к обследуемой поверхности должно составлять не менее 1 м, электрических ламп накаливания – 2 м. Идентификацию объектов на термограмме можно производить путем сравнения термоизображений с видимыми изображением той же зоны поверхности, полученной с помощью съемки в видимом свете. Тепловизионную съемку желательно выполнять при отсутствии движения транспортных средств, в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

Качество термоизображения зависит от расстояния (L) приемника до исследуемой поверхности. С увеличением расстояния L возрастает поле обзора, ухудшается детальность изображения и искажаются значения истинной температуры за счет поглощения в атмосфере. Последний эффект можно не учитывать при расстояниях менее 30 м. При больших расстояниях следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение ИК-излучения.

Расстояние (L , в метрах) установки тепловизора от поверхности объекта можно определить по формуле

$$L \leq \frac{\Delta H N_c}{10\varphi} , \quad (5)$$

где φ - угловой вертикальный размер поля обзора тепловизора, рад;

ΔH - линейный размер подлежащего выявлению участка конструкции;

N_c - число строк развертки в кадре тепловизора.

Расположение термографа желательно назначать так, чтобы поверхность объекта измерений находилась в прямой видимости.

При анализе термограмм дефектов решающими факторами являются сведения о тепловом режиме элементов и узлов конструкции, опыт оператора и вид изображения соседних зон, на фоне которых обнаруживается конкретная аномалия. Целесообразно при этом учитывать следующие, полученные на основании опыта рекомендации:

- следует использовать компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка поверхности, или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах;

- для анализа тепловых аномалий следует использовать эталонные изображения дефектов, которые должны находиться в тех же условиях теплообмена, что и исследуемый участок;

- необходимо учитывать, что поверхности, визируемые под большим углом, выглядят на изображении более холодными, аналогичный эффект проявляется и относительно снятых под большим углом удаленных зон, при больших расстояниях съемки;

- неокрашенные металлические элементы при отсутствии внешней подсветки выглядят на термоизображении, как правило, более холодными, чем они есть на самом деле;

- роль тепловых аномалий могут играть архитектурные детали, выступы; неоднородности коэффициента излучения поверхности; неоднородности теплообмена с окружающей средой; различного рода дефекты.

Для количественной оценки тепловых аномалий поверхности отделки приходится использовать численное моделирование теплового состояния конструкции с учетом фактических тепловых характеристик материалов. Количественную оценку тепловых аномалий можно производить при необходимости оценить степень опасности дефектов для нормального функционирования пролетного строения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного следует, что неразрушающий контроль стальных мостовых конструкций на

основе ИК-термографического сканирования обладает высокой чувствительностью, наглядностью и объективностью результатов, позволяет с высокой производительностью в бесконтактном режиме определять локализацию и идентификацию дефектов, отслеживать их развитие с помощью пассивных и активных методов теплового контроля в процессе мониторинга.

Литература

1. *Содержание и реконструкция железнодорожных мостов* / В.С. Антипероевский, В.О. Осипов, К.К. Якобсон. - М.: Транспорт, 1975. - 240 с.
2. *Стрелецкий, Н.С. Курс мостов. Металлические мосты. - Ч.1.* - М.: ОГИЗ-Гострансиздат, 1931. - 464 с.
3. *Лучко, Й.Й., Коваль, П.М., Корнісє, М.М., Лантук-Лященко, А.І., Хархаліс, М.Р. Мости: конструкції та надійність* / За ред. В.В. Панасюка і Й.Й. Лучка. - Львів: Каменяр, 2005. - (Нац. академія наук України. Фіз.-мех. Ін-т ім. Г.В. Карпенка. Довідник). - 989 с.

4. *Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с франц.* - М.: Мир, 1988. - 416 с.
5. *Дроздов, В.А., Сухарев, В.И. Термография в строительстве.* - М.: Стройиздат, 1987. - 238 с.
6. *Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля.* - М.: Машиностроение, 1991. - 240 с.
7. *Экспериментальная механика: В 2-х книгах; Кн. 2 / Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси.* - М.: Мир, 1990. - 552 с.
8. *Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе.* - М.: Л.: Машиз, 1962. - 456 с.
9. *Rosencwaig, A. Theory of the photoacoustic effect with solids / A. Rosencwaig, A. Gersho // Journal of Applied Physics.* - 1976. - 47. - P. 64-69.
10. *Riegert, G. Induktions-Lockin-Thermografie (ILT) / G. Riegert, G. Busse // MP Materialprüfung.* - 2004. - Jahrg. 46, 1-2. - P. 33-35.
11. *Riegert, G., Zweschper, Th., Busse, G. Induction-Lockin-Thermography: application and potential of an emerging NDE method.* - Proc. Condition Monitoring Cambridge. Chipping Norton, UK: Coxmoor Publishing Company, 2005. - P. 433-439.