

Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии

Поступила 16.02.2018

Рецензирование 14.03.2018

Принята к печати 02.04.2018

Усталостные трещины в элементах конструкций металлических мостов являются достаточно частым и трудно предсказуемым на стадии проектирования явлением. Для обнаружения таких трещин на стадии эксплуатации используется, как правило, визуальный осмотр проблемных зон, реже применяются такие методы неразрушающего контроля, как ультразвуковая дефектоскопия и акустическая эмиссия. В последнее время активно развивается метод выявления усталостных трещин, основанный на регистрации и анализе тепла, рассеиваемого при деформировании материала. Подход к определению наиболее вероятных мест появления усталостных трещин в сварных конструкциях металлических мостов методом инфракрасной термографии рассматривается в настоящей статье. Физической основой служит явление саморазогрева металла при статическом и циклическом нагружении, которое возникает из-за развития в отдельных зонах конструкций местных микропластических деформаций, приводящих к существенному приросту выделения тепла. Приведены результаты экспериментальных лабораторных исследований образца с усталостными трещинами. В качестве образца использована изгибаемая балка на двух опорах с заранее выращенной трещиной при циклическом нагружении. В ходе эксперимента термограммы регистрировались и сохранялись с частотой 9 кадров в секунду, и тем самым формировались данные зависимости изменения температур исследуемой поверхности от времени. Для устранения шумов использовалась обработка полученных термограмм с помощью механизма кратномасштабного анализа Малла и функции Добеши-4 вейвлет-анализа. Для повышения точности выявления зон с интенсивным тепловыделением после удаления шумов предложено использовать сумму квадратов разностей значений температур по каждому пикселю каждой термограммы (кадра) из полной записи процесса циклического нагружения.

Ключевые слова: долговечность, металлические пролетные строения, усталостные трещины, инфракрасная термография, вейвлет-анализ.

В ходе эксплуатации сварных металлических пролетных строений мостов разрушение материала происходит в местах, где амплитуды действующих напряжений равны предельным или превышают их. В качестве таких предельных амплитуд напряжений принимают предел усталости, определяемый для симметричного цикла нагружения как максимальная амплитуда нормальных напряжений, при которой материал не разрушается при базовом количестве циклов $N_G = 2 \cdot 10^6$. Экспериментально предел усталости для строительных конструкций находят на плоских образцах в условиях одноосного напряженного состояния (как правило, одноосного растяжения), а в расчетах усталости при необходимости вводят поправочные коэффициенты, учитывающие соотношения касательных и нормальных напряжений [1].

С этой точки зрения достаточно определить расчетным путем то место конструкции, где амплитуды напряжений (и сами напряжения) бу-

дут наибольшими, и это место можно считать самым опасным с точки зрения прочности. Естественно предположить, что такие места находятся там, где наибольшие общие напряжения складываются с существенными местными (локальными) напряжениями, например в местах обрыва сварных швов [2, 3].

Однако практика показывает, что усталостные трещины часто возникают значительно раньше наработки базового цикла нагружений и не только в теоретически опасных местах, а иногда и там, где никаких трещин не должно быть. Причинами такого несоответствия, видимо, являются сложное (а не одноосное) напряженное состояние проблемных зон конструкции и наличие неподдающихся расчетному прогнозу случайных напряжений (например, монтажных от сварки или из-за наличия дефектов поверхности) [4, 5]. В частности, сложное (неодноосное) напряженное состояние приводит к снижению предела выносливости или (что в общем-то равнозначно)

к снижению базового числа циклов нагружения (рис. 1).

Свое влияние оказывает и асимметрия цикла нагружения в локальной зоне, которая отличается от характеристики цикла номинальных напряжений и в общем случае остается неизвестной, а также трудно поддается прогнозу расчетным путем, особенно до образования усталостной трещины. По некоторым теоретическим данным [6], после образования трещиноподобного дефекта цикл в зоне дефекта становится симметричным, однако подтвердить это путем тензометрических измерений весьма затруднительно, поскольку размеры исследуемой зоны много меньше размеров тензодатчика.

Таким образом, практически единственным путем определения положения опасных с точки зрения появления усталостных разрушений мест являются натурные измерения. Большинство из известных методов неразрушающего контроля (например, тензометрирование, акустическая эмиссия и т. д.) для усталостной диагностики мостовых конструкций, отличающихся значительной площадью исследуемой поверхности и труднодоступностью мест исследования, малоэффективны.

Одним из перспективных методов контроля технического состояния строительных конструкций, в том числе усталостных повре-

ждений, является инфракрасная (ИК) термография, поскольку такой метод является бесконтактным, быстро разворачиваемым и не требующим сложной обработки результатов [7, 8]. Интенсивные методы инфракрасной термографии (импульсная термография, синхронная термография и термография с частотной модуляцией) [9] позволяют выявлять подповерхностные трещины и расслоения в металле. В таких ИК-методах используют внешние источники тепла (например, мощные оптические лампы для создания тепловых волновых полей на исследуемой поверхности, что позволяет выявлять различия в характеристиках теплового потока между неповрежденными и дефектными областями). Для обнаружения поверхностных трещин были предложены вихрековая термография [10] и термозвуковые методы [11], которые, однако, нивелируют преимущества бесконтактной (дистанционной) диагностики.

Относительно недавно для обнаружения поверхностных трещин была предложена лазерная термография [12]. Использование лазерного луча в качестве источника тепла позволяет передавать тепловую энергию на большие расстояния, контролировать интенсивность нагрева и положение точки нагрева, создавать направленное распространение тепловой волны на поверхности мишени.

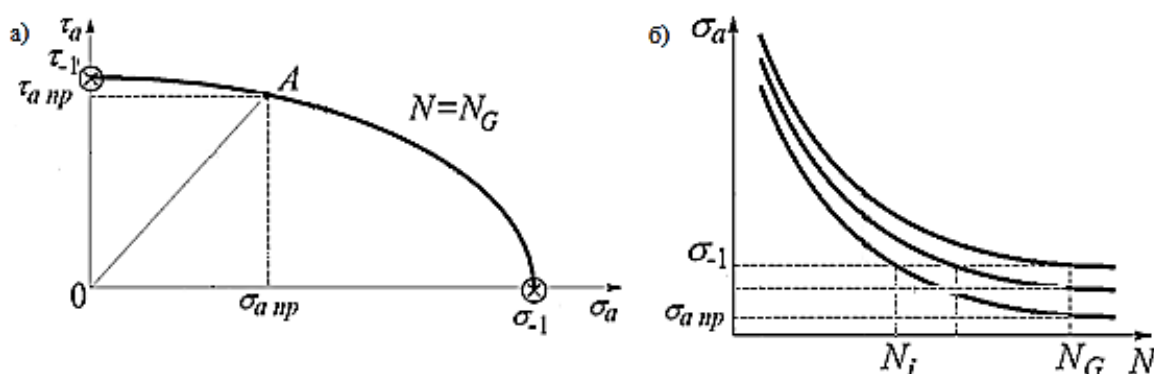


Рис. 1. Диаграммы усталостной прочности:

а – диаграмма Гафа – Полларда; *б* – диаграммы Велера при различных значениях видов напряженного состояния;

N_G – базовое количество циклов; N_i – предельное количество циклов при неодноосных напряженных состояниях; σ_{-1} – предельное значение амплитуды нормальных напряжений при одноосном растяжении-сжатии и симметричном цикле нагружения; τ_{-1} – предельное значение амплитуды касательных напряжений при чистом сдвиге и симметричном цикле нагружения; $\sigma_{a пр}$, $\tau_{a пр}$ – предельные значения амплитуд нормальных и касательных напряжений при произвольном виде напряженного состояния и симметричном цикле нагружения

Однако интенсивные методы ИК термографии, выявляя положение и размеры дефекта, не дают ответа на основной вопрос – о долговечности материала конструкций, для чего необходимо знать уровень и амплитуду напряжений при циклических воздействиях. Одним из эффективных методов является метод термоупругих напряжений [13, 14], который состоит в определении напряжений в материале по величине тепловыделения на основе закона Кельвина путем сопоставления теплового отклика исследуемого участка конструкции и участка, на котором заведомо известно отсутствие повреждений.

В основе предлагаемого способа лежит явление саморазогрева материала при циклических нагрузках, сопровождаемое увеличением интенсивности инфракрасного излучения, наблюдаемое там, где полные напряжения в материале превышают критические, т. е. $\sigma > \sigma_{кр}$. Под критическим напряжением будем понимать минимальное значение максимального напряжения цикла, при котором начинается интенсивное тепловыделение, приводящее к повышению температуры материала на значение ΔT .

При малых циклических напряжениях материал элементов металлоконструкций даже в опасных местах деформируется практически упруго и существенного прироста тепловыделения за цикл колебаний не наблюдается. Выделяющееся при этом тепло невелико и расходуется

на теплообмен с соседними малонагруженными участками, на конвективный теплообмен колеблющегося элемента металлоконструкции с окружающей средой и на локальный саморазогрев материала. На более высоких уровнях напряжений в результате структурной неоднородности материала в локальных напряженных зонах возникают местные микропластические деформации, что и приводит к существенному приросту выделения тепла.

Для исследования тепловыделения в материале конструкций при циклическом нагружении испытывали образец, показанный на рис. 2, в условиях, близких к реальной работе пролетных строений. Испытания производились на стенде под нагрузкой до 4 т с частотой 4,1 Гц (рис. 3).

Для исследования тепловыделения с поверхности образца использовался тепловизор Fluke Ti400, имеющий тепловую чувствительность не менее $0,05^\circ\text{C}$, который был установлен на расстоянии 0,6 м от поверхности образца. Чтобы уменьшить теплопередачу от образца, в местах зажима устанавливали асбестовые прокладки. Поверхность образца для изменения коэффициента черноты специально не обрабатывалась. Для локализации мест разогрева от микропластических деформаций при колебаниях на образце предварительно была выращена трещина, имитирующая опасное место металлоконструкции (рис. 4).

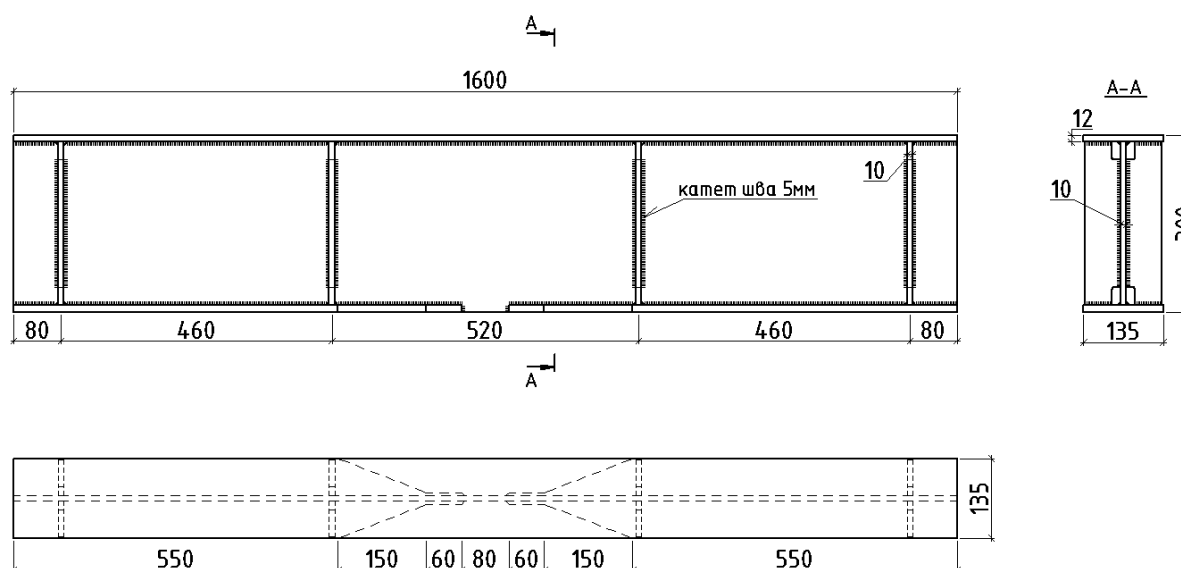


Рис. 2. Экспериментальный образец

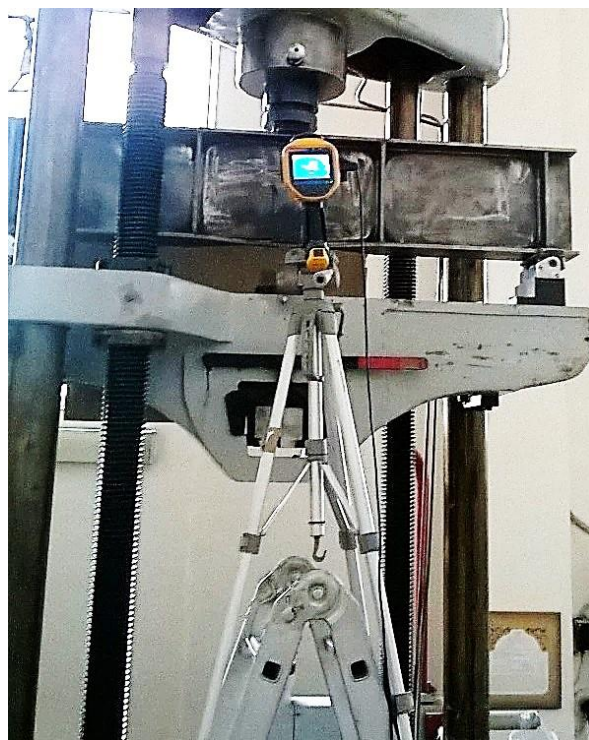


Рис. 3. Стенд для испытаний образца элемента металлоконструкции



Рис. 4. Трещина на образце

Порядок эксперимента был следующим. Образец закрепляли на стенде и тепловизором снимали термограмму контролируемой зоны образца без нагрузки (рис. 5, а). Затем образец загружался циклической нагрузкой с частотой 4,1 Гц. Амплитуду колебаний ступенчато увеличивали. На каждой ступени нагружения образец выдерживали до 3 мин, в течение которых температура образца стабилизировалась.

Каждый такой эксперимент повторялся четыре раза.

Получены термограммы площадью 22×29 см. Температура в вершине трещины в ненагруженном состоянии составила $23,3^\circ\text{C}$. На рис. 5, б представлена термограмма в момент нагружения внешней нагрузкой. Температура в вершине трещины увеличилась до $23,5^\circ\text{C}$.

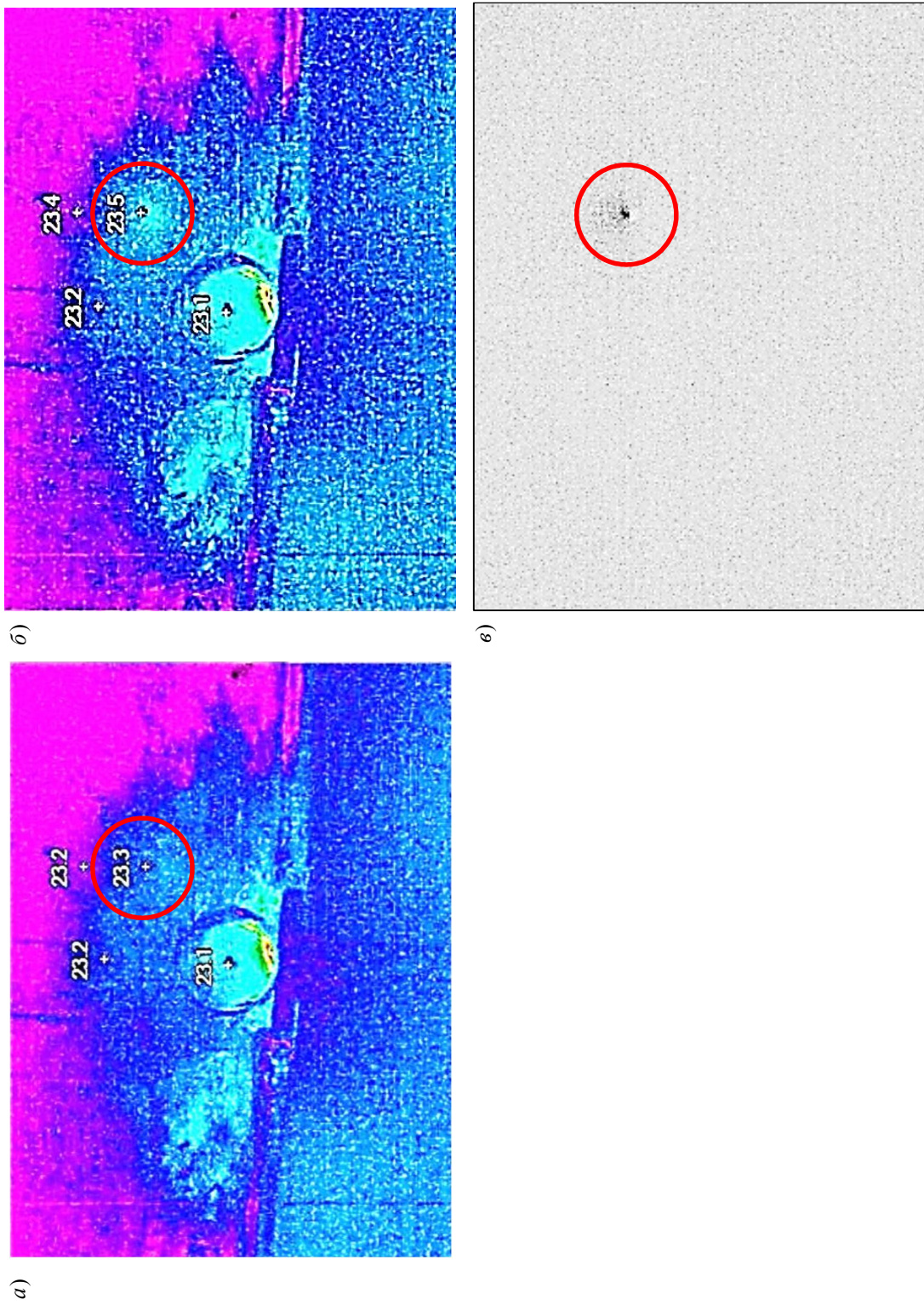


Рис. 5. Термограмма исследуемой области (кружком отмечена вершина трещины):
 а – в момент отсутствия внешней нагрузки; б – в момент действия внешней нагрузки; в – после фильтрации

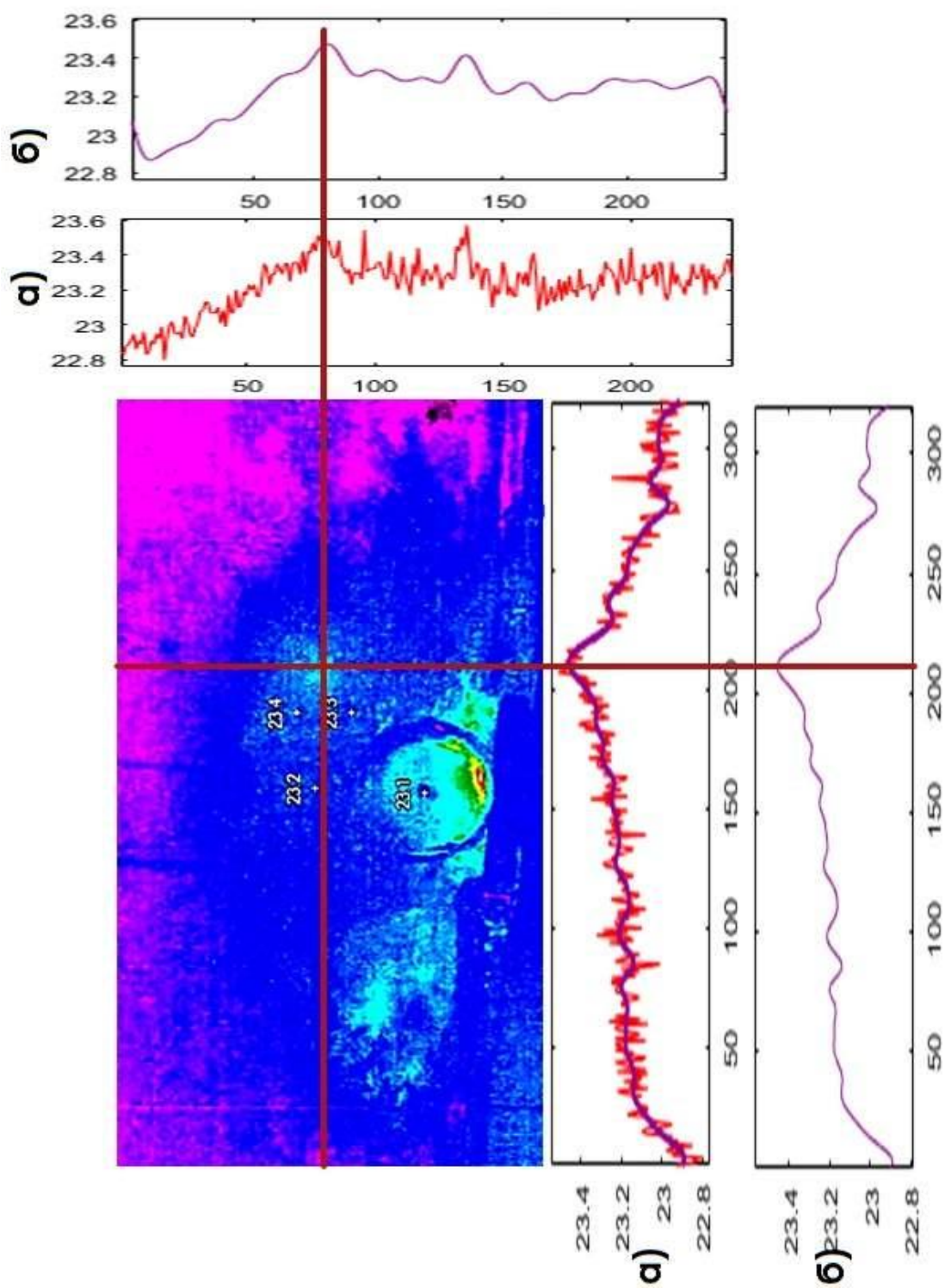


Рис. 6. Термограмма распределения температур по координатным осям:
а – первоначальная термограмма; б – термограмма после обработки вейвлетом Добеши

Строительный прокат мостовых металлоконструкций, в отличие от листов, применяемых в машино- и авиастроении, имеет достаточно большую толщину. Это приводит к повышенному поглощению тепла самим материалом и затрудняет визуальный контроль поврежденных зон на экране тепловизора, а следовательно, требуется дополнительная обработка и фильтрация термограмм [15]. Интенсивность цвета пикселя рассчитывалась по формуле

$$I = \sum_{k=0}^{N-1} (f(x, y, t_{k+1}) - f(x, y, t_k))^2, \quad (1)$$

где N – количество кадров в последовательности термограмм; $f(x, y, t_{k+1})$ – значения температуры в точке термограммы с координатами (x, y) в момент времени t_{k+1} ; $f(x, y, t_k)$ – то же в момент времени t_k .

Эффективным применением обработки термограмм является использование различных функций вейвлет-анализа. Для уменьшения влияния шумов (фильтрации) можно использовать механизм кратномасштабного анализа Малла [16] и вейвлет Добеши-4. На рис. 5, в представлена термограмма исследуемой зоны образца после фильтрации, в которой исключены точки, где температура при нагружении не изменяется.

Далее по отфильтрованной термограмме получают пространственные производные от температуры по направлениям x и y и вычисляют производную по времени от температуры и изменение температуры по сравнению с начальными значениями. Если на исходной термограмме присутствуют области, вносящие помехи в тепловую картину, то эту часть термограммы исключают из рассмотрения и анализируют только области, расположенные непосредственно вблизи концентратора напряжений.

На обработанной термограмме (рис. 6) хорошо видна зона повышенных напряжений в вершине трещины, совпадающая с представлениями о распределении повышенных напряжений в этой зоне, известными из механики разрушения.

В результате эксперимента определена зависимость изменения температуры в зоне концентратора напряжений от амплитуды напряжений σ (рис. 7). На графике видно, что имеется критическое напряжение $\sigma_{кр}$, при достижении которого начинается интенсивное тепловыделение – саморазогрев материала образца. Как отмечалось выше, критическое напряжение приводит к повышению температуры на величину ΔT , которая в нашем

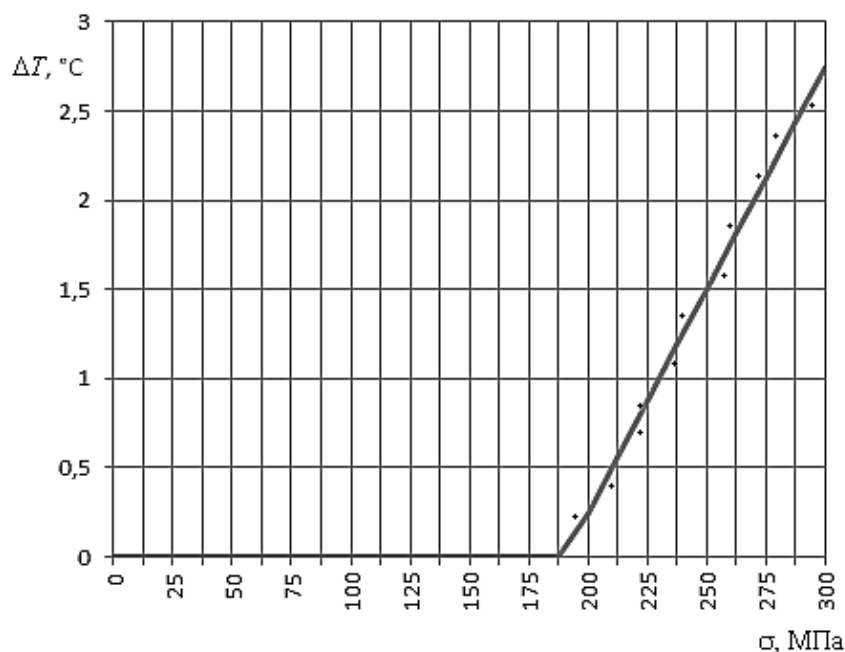


Рис. 7. Зависимость изменения температуры в зоне концентратора напряжений от амплитуды напряжений

случае соответствует чувствительности тепловизора и равна $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также на графике наблюдается практически линейная зависимость изменения температуры от величины $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{\text{кр}}$, где σ – максимальное напряжение в месте разогрева образца. Аналогичные результаты для нержавеющей стали были получены в работе [17].

В результате экспериментальных лабораторных исследований образца установлено, что методом инфракрасной термографии по эффекту саморазогрева металла можно достаточно точно и уверенно выявлять вершины усталостных трещин в конструкциях металлических мостов. Представляется очевидным,

что таким же методом можно устанавливать и зоны с микрповреждениями, еще не доступными визуальному осмотру. Для устранения шумов записываемого термосигнала можно успешно применять элементы вейвлет-анализа (в данном случае использован механизм кратномасштабного анализа Малла и функции Добеши-4). Повышение точности выявления зон с интенсивным тепловыделением после удаления шумов достигается использованием при компьютерной обработке термограмм суммы квадратов разностей значений температур по каждому пикселю каждой термограммы (кадра) из полной записи процесса циклического нагружения.

Библиографический список

1. Березин И. Я., Чернявский О. Ф. Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. 76 с.
2. Мальгин М. Г., Кирьян В. И., Дворецкий В. И. Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций // Автоматическая сварка. 2012. № 4. С. 3–7.
3. Мальгин М. Г., Кирьян В. И. Расчет на усталость сварных узлов ортотропных плит металлических пролетных строений мостов по локальным напряжениям // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2011. № 39. С. 91–97.
4. Корнеев М. М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов. Киев : Академпресс, 2010. Т. 1. 532 с.
5. Wolchuk R. Discussion of "Consistent Approach to Calculating Stresses for fatigue Design of Welded Rib-to-Web Connections in Steel Orthotropic Bridge Decks" by Robert J. Connor and John W. Fisher // Journal of bridge engineering ASCE. 2007. № 12 (6). P. 811–815.
6. Шабанов А. П., Шакиртов М. М. О влиянии коэффициента асимметрии внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала, расположенного в окрестности вершины трещиновидного дефекта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4. С. 12–18.
7. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М. : Спектр, 2009. 544 с.
8. 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. 36–42.
9. Chatterjee K., Tuli S., Pickering S. G., Almond D. P. A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques // NDT & E International. 2011. № 44 (7). P. 655–667.
10. Thermographic crack detection by eddy current excitation / G. Zenzinger, J. Bamberg, W. Satzger, V. Carl // NDT & E International. 2007. № 22 (2–3). P. 101–111.
11. Holland S. D. Thermographic signal reconstruction for vibrothermography // Infrared Physics & Technology. 2011. № 54 (6). P. 503–511.
12. Yun-Kyu A., Min K. J., Hoon S. Laser lock-in thermography for detection of surface-breaking fatigue cracks on uncoated steel structures // NDT & E International. 2014. № 65. P. 54–63.
13. TSA based evaluation of fatigue crack propagation in steel bridge member / T. Sakagami, Y. Mizokami, D. Shiozawa, Y. Izumi // Procedia Structural Integrity. 2017. № 5. P. 1370–1376.
14. Sakagami T., Izumi Y., Kubo S. Application of infrared thermography to structural integrity evaluation of steel bridges // Journal of Modern Optics. 2010. Vol. 57, № 18. P. 1738–1746.
15. Соловьев Л. Ю., Соловьев А. Л. Удаленный контроль усталостных трещин в металлических пролетных строениях мостов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Восьмой Междунар. науч.-практ. конф., 28 марта – 1 апреля 2017 г., Иркутск : в 2 т. Иркутск : ИрГУПС, 2017. Т. 1. С. 469–473.
16. Mallat S. G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The wavelet Representation // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1989. Vol. II, № 7, July. P. 674–693.
17. Gadaj S. P., Nowacki W. K., Pieczyńska E. A. Investigation of temperature distribution during plastic deformation of stainless steel // QIRT 96 – Eurotherm Series 50. Pisa : Edizioni ETS, 1997. P. 298–303.

S. P. Glushkov, L. Yu. Solovyev, A. L. Solovyev

Experimental Assessment of Welded Steel Bridges Durability by Infrared Thermography

Abstract. Fatigue cracks in structural elements of metal bridges are quite frequent and difficult to predict at the design stage. To detect such cracks at the operation stage, as a rule, visual inspection of problem areas is used, and non-destructive testing methods, such as ultrasonic flaw detection and acoustic emission, are used less often. Recently, the method of revealing fatigue cracks has been actively developed, based on recording and analyzing the heat dissipated during deformation of the material. Such an approach to the determination of the most probable places for the appearance of fatigue cracks in welded structures of metal bridges by the method of infrared thermography is discussed in this article. The physical basis is the phenomenon of metal self-heating under static and cyclic loading, which arises from the development of local microplastic deformations in certain zones leading to a significant increase in the release of heat. The results of experimental laboratory studies of a sample with fatigue cracks are presented. As a sample, a bend beam was used on two supports with a pre-grown crack under cyclic loading. In the course of the experiment, the thermograms were recorded and stored at a frequency of 9 frames / sec, and thus the data were obtained of the temperature dependence of the temperature of the investigated surface versus time. To eliminate noise, we used the processing of the obtained thermograms with the help of the Mallat multiple-scale analysis mechanism and the DeBoshi-4 wavelet analysis function. To increase the accuracy of identifying areas with intense heat generation after removing noise, it is suggested to use the sum of the difference in the squares of the temperature values for each pixel of each thermogram (frame) from the complete recording of the cyclic loading process.

Key words: *durability; steel bridge; fatigue cracks; infrared thermography; wavelet analysis.*

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

Соловьев Александр Леонидович – инженер НИЛ «Мосты» СГУПС. E-mail: deffill@mail.ru