

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №3, Том 8 / 2021, N 3, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-3-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS321.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS321 (<https://doi.org/10.15862/04SATS321>)

## Экспериментальные исследования процессов диссипации энергии в вершинах усталостных трещин в элементах мостовых конструкций

Соловьев Л.Ю., Федоренко В.А.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Соловьев Леонид Юрьевич, e-mail: [lys111@yandex.ru](mailto:lys111@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье авторами исследована возможность применения теплового метода контроля для диагностики усталостных трещин металлических пролётных строений и определены необходимые параметры для такого контроля. Исследования выполнены при усталостных испытаниях консольно закрепленных стальных образцов, моделирующих работу стенки балки пролетного строения, подкреплённой рёбрами жёсткости. Для проведения экспериментов были разработаны испытательная установка и методика нагружения при различной интенсивности воздействия. В качестве нагрузочного устройства использован электродвигатель с эксцентриками. Разогрев

поверхности образца фиксировался тепловизорами с температурной чувствительностями 0,03 К и 0,05 К и частотами съёмки 60 кадров/с и 9 кадров/с соответственно. Подтверждена возможность определения наличия трещины до её выхода на поверхность, то есть, на этапе её зарождения, а также определены размеры зоны саморазогрева в вершине трещины. Описана методика проведения лабораторного эксперимента по исследованию диссипативных процессов в элементах металлических пролётных строений.

**Ключевые слова:** инфракрасная термография; усталостные трещины; диссипация энергии; металлические мосты; неразрушающий контроль

## Experimental studies of the energy dissipation processes at the tops of fatigue cracks in the elements of bridge structures

Leonid Yu. Solovyev, Vladislav A. Fedorenko

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Corresponding author:** Leonid Yu. Solovyev, e-mail: [lys111@yandex.ru](mailto:lys111@yandex.ru)

**Abstract.** In the article, the authors investigated the possibility of using the thermal control method for diagnosing fatigue cracks in the metal superstructure, determined the necessary parameters for that control method. The studies were conducted during cantilevered steel samples fatigue tests simulating the superstructure beam wall operation, reinforced with stiffening ribs. To carry out the experiments were developed a test setup and a loading procedure at the various intensity of exposure. An electric motor with eccentrics is used as a loading device. The sample surface heating was recorded by thermal imagers with 0.03 K and 0.05 K temperature sensitivities and

60 frames/s and 9 frames/s shooting speed, respectively. Was confirmed the possibility of determining crack presence before its emergence to the surface namely at the stage of its initiation, and also were determined the self-heating zone dimensions at the tip of a crack. The conducting a laboratory experiment technique on the dissipative processes study in the metal superstructure elements is described.

**Keywords:** infrared thermography; fatigue cracks; energy dissipation; metal bridges; non-destructive testing

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



## Введение

### Introduction

На мостовых сооружениях, расположенных на автомобильных дорогах общего пользования федерального значения Российской Федерации, эксплуатируется более 1300, а на сети железных дорог — более 5000 сварных пролётных строений [1]. Время эксплуатации большинства из них составляет 20–30 лет на автомобильных и 40 лет на железных дорогах. Для подобных конструкций характерным дефектом являются усталостные трещины по сварным швам, в стенках балок, в элементах ортотропных плит. Причем на железнодорожных мостах количество трещин является значительным (более 800 шт.), а рост их количества происходит по экспоненциальному закону [2]. На автодорожных мостах на дорогах федерального значения ситуация существенно менее тревожная, но общая тенденция к увеличению количества трещин отмечается и здесь.

Наиболее часто встречающимися трещинами в металлических пролётных строениях являются трещины в стенках балок у верхних и нижних концов швов вертикальных рёбер жёсткости (рис. 1).



*Рисунок 1. Трещины в железнодорожных пролётных строениях (фото авторов)*

*Figure 1. Cracks in railway superstructures (photo by the authors)*

За последние 5–7 лет было зафиксировано появление подобных трещин и на автодорожных мостах на федеральных дорогах (рис. 2).



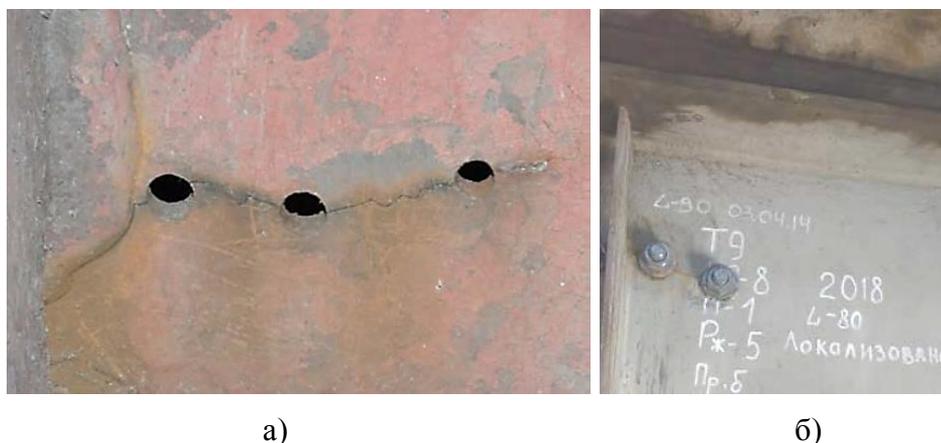
*Рисунок 2. Трещины в автодорожных мостах у верхних концов сварных швов (фото авторов)*

*Figure 2. Cracks in road bridges at the upper ends of welded seam (photo by the authors)*

Появлению таких трещин способствуют неплотности сопряжения «сухарика» ребра жесткости с верхним поясом, что создает свободу перемещения стенки в поперечном направлении и изгибающим моментам и циклическому нагружению зон сварных швов.

Прогноз их появления совершенно справедливо делается на основе вероятностного подхода. Однако при эксплуатации сооружения мы имеем дело с конкретными узлами и нам хотелось бы знать в каком состоянии именно они — отсутствуют ли там трещины совсем или уже есть зарождающиеся трещины, а если трещины уже появились, то каков прогноз скорости развития этих конкретных трещин. Расчетным путем такой прогноз для конкретного узла сделать практически невозможно, т. к. он зависит от фактически (а не статистически) накопленных повреждений и труднопредсказуемых факторов (например, уровня остаточных напряжений от сварки).

Диагностика усталостных трещин выполняется главным образом методом визуального и измерительного контроля с помощью простейших инструментов (лупы, рулетки, универсального шаблона сварщика, штангенциркуля и т. д.), дополняемым капиллярным методом и реже — ультразвуковой диагностикой. Однако все эти способы пригодны при наличии видимой трещины, и требуют для качественного проведения измерений непосредственного доступа к поверхности (а значит — особого внимания к безопасности проведения работ), а также достаточного опыта инженера. Известны ошибки в определении вершины трещины, когда после засверливания и заглушения ее высокопрочным болтом, трещина продолжала расти и процедуру локализации неисправности приходилось повторять (рис. 3).



**Рисунок 3.** Продолжение роста усталостных трещин после локализации (фото А.М. Усольцева [3]): а — рост трещины через отверстия; б — рост трещины после постановки высокопрочного болта

**Figure 3.** Continued growth of fatigue cracks after localization (photo by A.M. Usoltseva [3]): a — crack growth through the holes; b — crack growth after placing a high-strength bolt

Решить проблему точного определения положения вершин трещин, отследить их рост, заблаговременно (до появления необратимых повреждений) выявить области конструкции, в которых начались процессы микроразрушений, а значит дать возможность предотвратить их развитие можно с помощью относительно нового метода неразрушающего контроля — метода инфракрасной термографии (ИКТ). Метод основан на том физическом явлении, что любые механических деформации в материале сопровождаются переходом энергии деформирования в тепловую. Это явление стало известно еще в XIX веке [4] — при циклическом нагружении в упругом диапазоне работы материала и в адиабатических условиях температура тела меняется пропорционально изменению суммы главных напряжений:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \cdot T \cdot \Delta \sigma, \quad (1)$$

$\Delta T$  — изменение температуры;  $\Delta \sigma$  — сумма приращения главных напряжений;  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения;  $\rho$  — плотность;  $C_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $T$  — абсолютная температура, К.

В принципе подобным свойством обладают все материалы, однако металлы в силу присущей им высокой теплопроводности, являются наиболее чувствительными в этом отношении.

Согласно (1) повышенные амплитуды напряжений в зонах концентраторов напряжений приводят к появлению соответствующих им зон повышенных амплитуд температур на поверхности тела. При адиабатических условиях колебания температур на при упругом деформировании строго (и главное для инженерных целей — немедленно) следует изменению напряжений.

В случае пластических деформаций, а также при развитии разрушений в кристаллической решетке переход механической энергии деформирования в тепловую энергию становится необратимым и заметным — происходит саморазогрев металла. Даже при статическом нагружении непосредственно перед разрушением температура в области разрушения резко увеличивается на несколько градусов. Цикличность нагружения приводит к тому, что саморазогрев становится ощутимым даже при относительно малых амплитудах напряжений. Интенсивность саморазогрева характеризует интенсивность самого процесса разрушения.

Повышение температур поверхности тела в зонах концентраторов напряжений и разрушений материала делают эти дефекты и неисправности хорошо различимыми в инфракрасном спектре и позволяет

применять для их выявления и диагностики метод инфракрасной термографии (ИКТ).

Этот метод является бесконтактным (т. е. позволяет работать с безопасных расстояний, например, со смотровых приспособлений), быстрым (для контроля достаточно одной записи под проходящим грузовиком или поездом), позволяет выявлять скрытые повреждения. Программное обеспечение делает результаты диагностики интуитивно понятными. Появление в последнее время малобюджетных инфракрасных камер (тепловизоров или тепловизионных модулей) делает этот способ контроля инвестиционно привлекательным.

*История развития метода ИКТ.* Величина изменения теплового излучения при упругом деформировании невелика — изменение напряжения в упругом диапазоне на 1000 МПа приводит к изменению температуры на  $0,1^\circ$ . Это долгое время сдерживало развитие метода ИКТ, ограничиваясь рамками исследовательских лабораторий. При неупругом деформировании и особенно вблизи разрушения циклический разогрев металла резко увеличивается и может уже достигать десятка градусов. На этом свойстве с 1920-х годов XX века развивались методы ускоренного определения усталостной прочности материалов [5].

Необходимость в высокочувствительных датчиках, которыми являлись термопары, также ограничивало применимость метода ИКТ для исследований эксплуатируемых конструкций. Проблема с измерительной аппаратурой была принципиально решена с разработкой в 1967 г. способа бесконтактного измерения инфракрасного излучения (тепловидения) [6]. Появление инфракрасных камер в 1970-х годах принесло два важных улучшения в области калориметрических исследований: очень короткое время отклика по сравнению с термопарами; получение температурного поля, а не точечное измерение. Этот технологический прогресс сделал возможным развитие термоупругометрии.

Долгое время (до 1980-х годов) ограниченная чувствительность доступного инструментария сдерживала развитие термографии в качестве метода неразрушающего контроля. С развитием методов электрооптики и обработки сигналов, появилась и инфракрасная система визуализации — тепловизионные камеры (тепловизоры) [7–9] с высокой температурной чувствительностью (менее  $0,01$  К) и пространственным разрешением до нескольких мкм. Однако для таких камер требовалось охлаждение термочувствительных элементов до криогенных температур.

Дальнейший технологический скачок в тепловизионной технике произошел, когда появились неохлаждаемые болометры, которые несмотря на некоторую потерю чувствительности (максимальная паспортная чувствительность  $0,03$ – $0,05$  К) по сравнению с охлаждаемыми

аналогами сделали метод ИКТ экономически доступным для обследовательских организаций. В настоящий момент основными препятствиями для широкого внедрения высокотехнологичного метода ИКТ в повседневную практику обследования и диагностики мостов остаются слабая информированность инженеров об этом методе и проблемы с обработкой данных тепловизионных измерений.

*Современное состояние исследований.* В большинстве своем работы по применению ИКТ для металлических материалов ведутся в области фундаментальных исследований, связанных с ускоренными испытаниями на усталость, изучением процессов зарождения и роста трещин, а также усталостной прочности на основе параметров диссипации энергии при разрушении [10–16]. Основное практическое применение такие исследования находят в машино- и авиастроении [17].

Инженерным приложениям ИКТ для металлических строительных конструкций (к которым относятся и мосты) с их относительно низким уровнем эксплуатационных напряжений (а значит и относительно слабым тепловым откликом на механические воздействия) уделяется незаслуженно мало внимания и в основном — за рубежом (исследовательские группы Т. Сакагами и С. Чейза [18–22]). В России и Беларуси известны единичные работы О.А. Будадина и В.В. Котельникова для мостовых кранов [23], Е.А. Мойсейчика [24; 25] и в настоящее время дальнейшие исследования ими прекращены.

На наш взгляд это указывает на недооцененность метода. Хотя справедливости ради надо признать, что в некоторых зарубежных руководствах по обследованию мостов метод ИКТ, по крайней мере, упоминается [26–28]. Также имеется ряд работ, посвященных применению метода ИКТ при малых уровнях напряжений [29–31], что создает предпосылки к развитию этого метода применительно к строительным конструкциям.

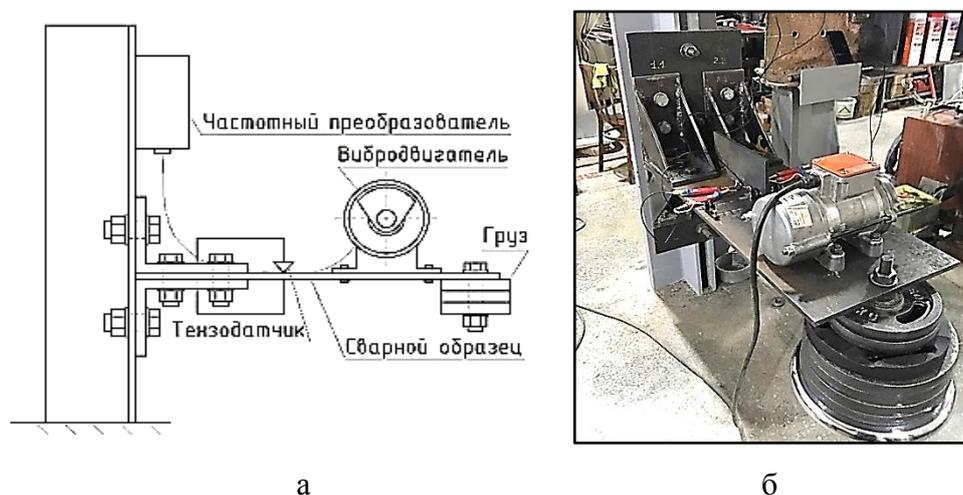
Представленное исследование является продолжением работ [32–36] и направлено на практическое применение метода ИКТ для диагностики усталостных повреждений в сварных конструкциях мостов.

## Методы

### Methods

Объектом исследования являются образцы, имеющие подобие с узлами конструкций и находящиеся в условиях, аналогичных реальным условиям нагружения.

Для экспериментальных исследований появления и роста данного типа трещин сотрудниками СибНИИ мостов СГУПС была сконструирована испытательная установка <sup>1</sup> (рис. 4). Образец для испытаний представлял собой консольно закреплённый металлический лист размерами 900×360×12 мм, к которому с двух сторон приварены рёбра жёсткости размерами 300×120×10 мм. Сварные швы выполнены полуавтоматической сваркой. Катет сварного шва равен 8 мм. Образцы выполнены из мостовой конструкционной стали 15ХСНД обычного исполнения и для повышения излучательной способности покрыты матовым графитовым спреем.



**Рисунок 4.** Испытательный стенд для испытаний сварных листовых образцов на многоцикловое нагружение: а — схема; б — фотография (фото авторов)

**Figure 4.** Bench testing unit for welded sheet specimens testing for high-cycle loading: a — diagram; b — photo (photo by authors)

Нагружение образца выполнялось с помощью вынуждающей силы, создаваемой вибродвигателем, который подключался к частотному преобразователю силы тока. Параметры цикла нагружения были подобраны в соответствии с реальным характером работы пролётного строения под обращающейся нагрузкой.

Исследование процессов диссипации энергии при механическом деформировании образца было выполнено с помощью инфракрасных неохлаждаемых детекторов InfraTec VarioCam 680 и Fluke Ti400 (рисунок 5). Характеристики детекторов приведены в таблице 1.

<sup>1</sup> Патент № 2730555 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2006.01), G01N 3/32 (2006.01). Установка для механических испытаний образцов листовых материалов на усталость при изгибе: № 2019143048: заявл. 29.08.2019; опубл. 24.08.2020 / Бокарев С.А., Жунев К.О., Соловьев Л.Ю.; заявитель СГУПС. — 8 с.: ил. — Текст: непосредственный.

**Таблица 1 / Table 1**  
**Характеристики инфракрасных детекторов (тепловизоров)**  
**Infrared detectors characteristics (thermal imagers)**

Характеристика Characteristic	Fluke Ti 400	InfraTec VarioCAM HD
Рабочий диапазон инфракрасного излучения, мкм Infrared radiation working range of, microns	8–14	8–14
Разрешение инфракрасного детектора, пиксели Infrared detector resolution, pixels	320 × 240	640 × 480
Чувствительность (NETD) при 30 °С, не более, °С Sensitivity (NETD) at 30 °С, no more, °С	0,05	0,03
Частота съемки, Гц (кадров / сек.) Shooting frequency, Hz (frames / sec.)	9	60
Объектив Lens	24°×17°	29,9°×22,6°
Мгновенное поле зрения iFOV, мрад Instant field of view iFOV, mrad	1,31	0,815
Захват области при стандартном объективе с расстояния 1 м, м×м Capturing the area with a standard lens from a distance of 1 m, m×m	0,42×0,32	0,53×0,4
Диапазон измеряемых температур, °С Measured temperature range, °С	-20 ... +1200	-40 ... +1200
Погрешность измерения температуры (при номинальной температуре 25 °С) Temperature measurement error (at 25 °С nominal temperature)	±2 °С или 2 %	±1 °С или ±2 %



а



б

**Рисунок 5. Расположение тепловизоров при испытаниях:**  
*а — тепловизор InfraTec VarioCam 680; б — тепловизор Fluke Ti400 (фото авторов)*

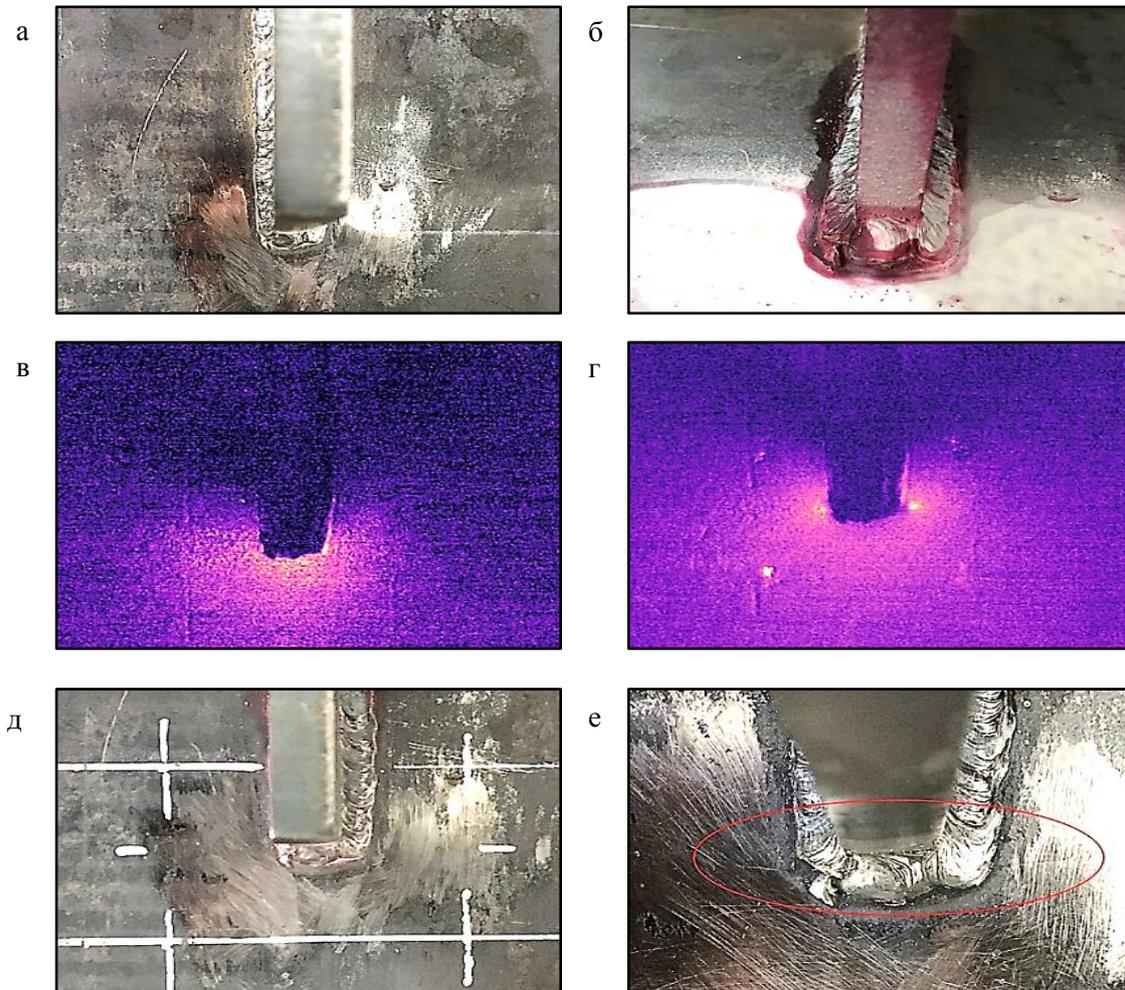
**Figure 5. Thermal imagers location during testing:**  
*a — InfraTec VarioCam 680 thermal imager; b — Fluke Ti400 thermal imager (photo by the authors)*

## Результаты

### Results

По результатам инфракрасной съёмки были получены термограммы с изображением распределения температур при саморазогреве металла в

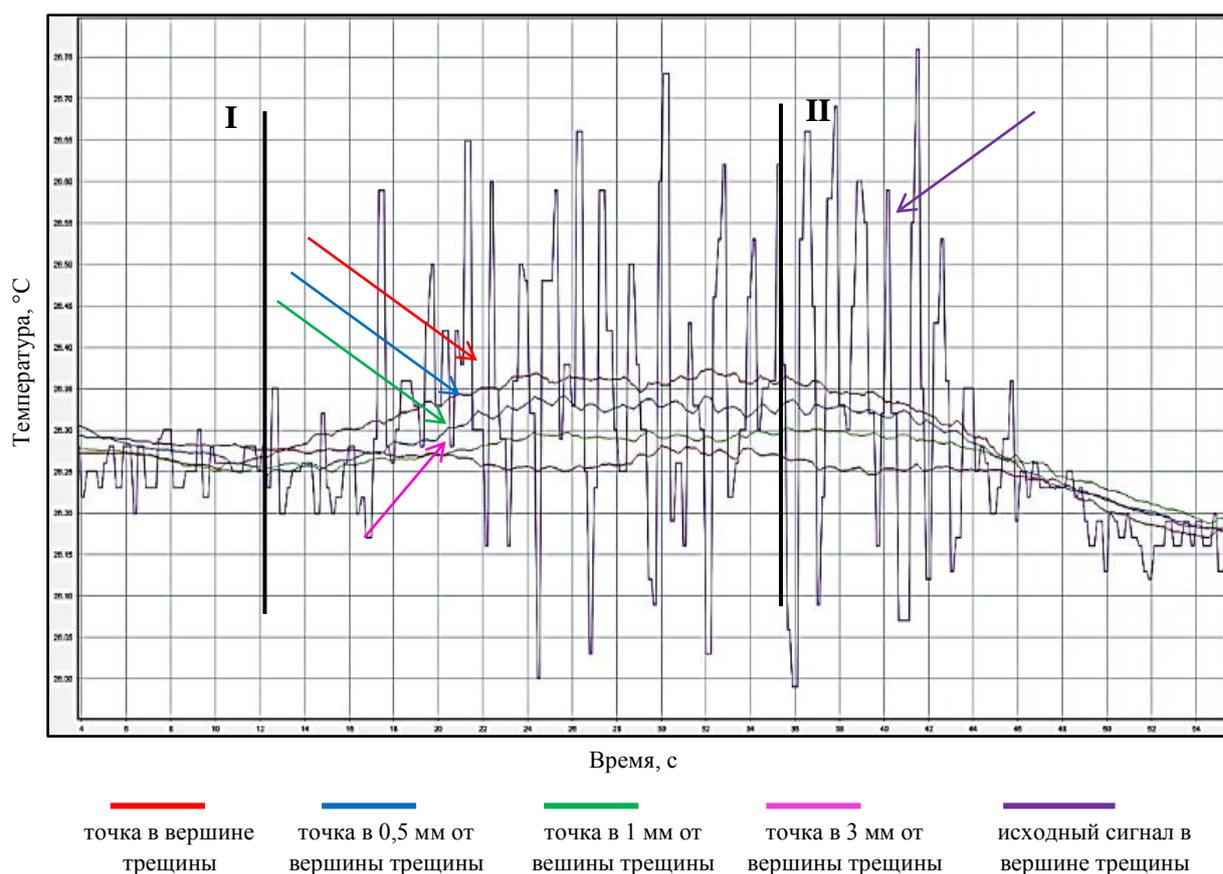
зоне усталостного разрушения. На рисунке 6 представлены сравнительные результаты исследования развития усталостных трещин методом инфракрасной термографии, а также визуальным осмотром и капиллярной дефектоскопией.



**Рисунок 6.** Результаты фиксации усталостной трещины в момент проведения испытаний различными методами: а — Образец после 2,450 млн циклов нагружения — визуально трещина не диагностируется; б — Образец после 2,450 млн циклов — методом капиллярной дефектоскопии трещина не диагностируется; в — Образец после 2,450 млн циклов — методом ИКТ зафиксирован интенсивный саморазогрев вблизи сварного шва; г — Образец после 2,470 млн циклов — методом ИКТ зафиксированы сформировавшиеся вершины трещин; д — Образец после 2,470 млн циклов — визуально трещина не диагностируется; е — Образец после 2,495 млн циклов трещина впервые зафиксирована визуально (фото авторов)

**Figure 6.** Results of fixing a fatigue crack at the time of testing by various methods: а — Sample after 2.450 million loading cycles — the crack is not visually diagnosed; б — Sample after 2.450 million cycles — the crack is not diagnosed by capillary flow detection; в — Sample after 2.450 million cycles — the ICT method recorded intense self-heating near the weld; г — Sample after 2.470 million cycles — the formed crack tips were fixed by the ICT method; д — Sample after 2.470 million cycles — the crack is not visually diagnosed; е — Sample after 2.495 million cycles, the crack was visually detected for the first time (photo by authors)

Как следует из приведённых результатов, после примерно 2,450 млн циклов ни визуально, ни с помощью капиллярной дефектоскопии трещина не была обнаружена. Однако с помощью инфракрасной термографии по границе сплавления был зафиксирован саморазогрев, что указывало на наличие повреждений. Очевидно, что в этот момент трещина либо еще не вышла на поверхность, либо имела волосяное раскрытие. После 2,470 млн циклов на термограмме ясно проявились вершины развивающейся трещины, по-прежнему не обнаруживаемой на поверхности ни визуально, ни методом капиллярной дефектоскопии. Визуально обнаружить трещину удалось лишь после 2,90 млн циклов. Таким образом, рассеивание энергии, сопровождающее процесс разрушения структуры металла, показало себя хорошим индикатором наличия в материале усталостных трещин за долго до их визуального обнаружения.



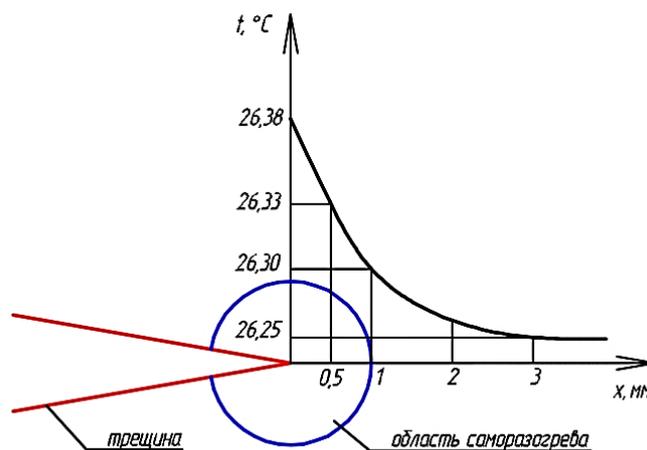
**Рисунок 7.** График изменения средней температуры по времени в зоне вершины усталостной трещины по мере отдаления от вершины трещины (рисунок авторов)

**Figure 7.** Graph of the average temperature change over time in the zone at the tip of a fatigue crack with distance from the tip of the crack (figure by the authors)

На рисунке 7 приведены графики изменения средней температуры в области вершины усталостной трещины по времени в процессе циклического нагружения. Цветными линиями показаны изменения средних температур в зонах, расположенных на расстояниях от 0,5 до 3 мм

от вершины трещины. Запись выполнялась до начала нагружения, в ходе нагружения и по окончании нагружения. Вертикальной линией «I» отмечен участок начала циклирования (включение вибродвигателя) — отчётливо прослеживается синхронное возрастание средних температур, причем чем ближе к вершине, тем такое возрастание сильнее. После периода возрастания за счет рассеивания температура стабилизируется — возникает термодинамическое равновесие. Вертикальная линия «II» показывает момент отключения вибродвигателя (окончание нагружения), после чего наблюдается снижение температуры (остывание образца).

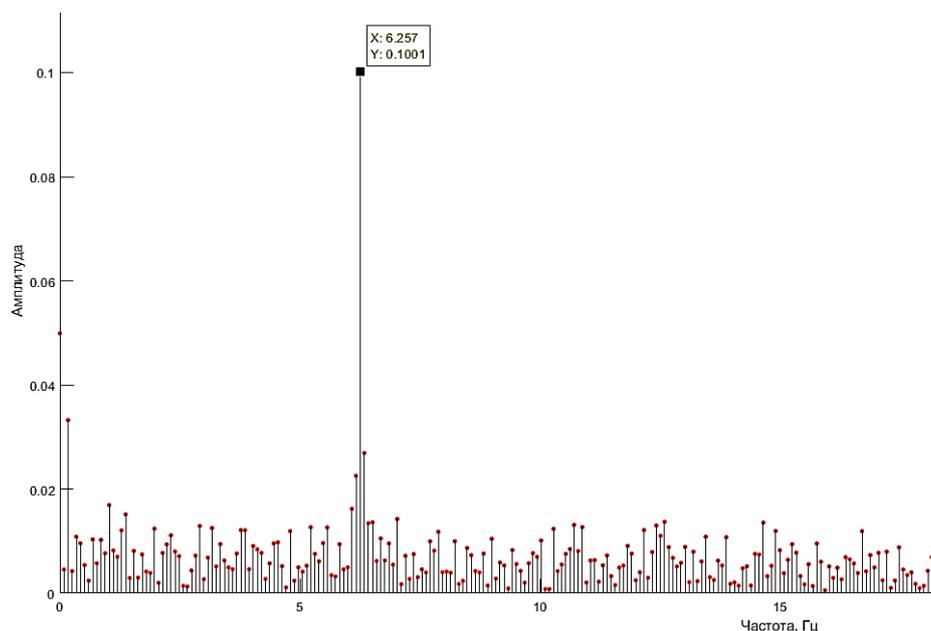
На графике рисунка 8 видно, что с удалением от вершины трещины средняя температура быстро снижается. Разница между температурами в вершине трещины и на неповрежденном участке составляет 0,13 °С.



**Рисунок 8.** График изменения средней температуры в зоне вершины усталостной трещины (рисунок авторов)

**Figure 8.** Graph of the average temperature change in the zone of the fatigue crack tip (figure by the authors)

Дополнительным наблюдением явилось определение частоты колебаний по изменению величины интенсивности инфракрасного излучения. На рисунке 9 изображен спектр частот, содержащихся в температурном сигнале, на котором видно отчётливый пик мощности на частоте 6,24 Гц, остальная часть является зашумлённой. Для контроля частота колебаний также фиксировалась с помощью тензодатчиков, установленных на образец и показавших такой же результат. Совпадение результатов измерения частот колебаний тензометрическим и инфракрасным методами еще раз подтвердило справедливость соотношения (1) — изменение теплового излучения происходит с частотой равной частоте циклического воздействия пропорционально изменению напряжений.



*Рисунок 9. Спектр частот температурного сигнала (рисунок авторов)*  
*Figure 9. Frequency spectrum of the temperature signal (figure by the authors)*

## Обсуждение

### Discussion

В работе представлены некоторые результаты экспериментальных работ, связанных с исследованием процесса диссипации энергии при циклических нагружениях. Очевидным результатом является то, что методом инфракрасной термографии можно фиксировать зарождающиеся трещины, которые еще не проявились на поверхности и являются короткими. Другим выводом можно считать тот факт, что поскольку изменения температуры пропорциональны изменению напряжений в вершине трещины, то это позволит применить метод для определения коэффициентов интенсивности напряжений, а значит и определить склонность трещины к дальнейшему росту.

С осторожным оптимизмом можно также надеяться, что с помощью инфракрасной термографии представится возможность определять напряженно-деформированное состояние конструкций. В частности, изменению напряжений на 100 МПа соответствует изменение температуры на 0,1 К. Чувствительность (способность различать температурный сигнал от уровня шума) промышленных тепловизоров с неохлаждаемыми матрицами (микроболометрами) уже сейчас составляет  $NETD \leq 0,05$  К. В наших экспериментах эта величина была зафиксирована на уровне 0,01 К при заявленной заводской чувствительности 0,05 К.

По сути, единственным препятствием здесь является то, что полезный инфракрасный сигнал при эксплуатационных напряжениях в конструкции находится на границе чувствительности приборов, что требует разработки специальных алгоритмов обработки сигналов и методик проведения измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Жунев, К.О.** Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений / К.О. Жунев, Ю.Н. Мурованный, А.Н. Яшнов. — DOI <https://doi.org/10.15862/06SATS220> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — URL: <https://t-s.today/06SATS220.html> (дата обращения: 02.04.2021).
2. **Бокарев, С.А.** Предупреждение появления усталостных трещин в сварных металлических пролетных строениях / С.А. Бокарев, А.М. Усольцев, А.И. Служаев. — DOI <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-4-181-193> // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2019. — Т 21. — № 4. — С. 181–193. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/657> (дата обращения: 02.04.2021).
3. **Усольцев, А.М.** Комплексный подход к обеспечению долговечности сварных пролетных строений железнодорожных мостов / А.М. Усольцев, Е.Г. Попова, М.Ю. Маликов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3. — С. 72–86. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109359> (дата обращения: 02.04.2021).
4. **Thomson, W.** On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam / W. Thomson. — DOI <https://doi.org/10.1017/S0080456800033172> // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. — 1853. — Т 20. — № 2. — С. 261–288. — URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/earth-and-environmental-science-transactions-of-royal-society-of-edinburgh/article/abs/xvon-the-dynamical-theory-of-heat-with-numerical-results-deduced-from-mr-joules-equivalent-of-a-thermal-unit-and-m-regnaults-observations-on-steam/197B48FC1F57C3BCF6E04B7682D8D49F> (дата обращения: 02.04.2021).
5. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Раздел 2. Материалы машиностроения. Том 3 / Гл. ред. акад. Е.А. Чудаков. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1947. — 712 с.
6. **Belgen, M.H.** Infrared Radiometric Stress Instrumentation Application Range Study, NASA Report CR-1067 / M.H. Belgen. — Колумбус: North American Aviation, INC., 1967. — 142 с. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680015499/downloads/19680015499.pdf> (дата обращения: 02.08.2021).
7. **Henneke, E.G.** Thermography — An NDI Method for Damage Detection / E.G. Henneke, K.L. Reifsnider, W.W. Stinchcomb. — DOI <https://doi.org/10.1007/BF03354475> // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. — 1979. — Т 31. — № 9. — С. 11–15. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03354475> (дата обращения: 02.04.2021).
8. **Nayroles, B.** Infrared telethermography and structures mechanics / B. Nayroles, R. Bouc, H. Caumon, J.C. Chezeaux, E. Giacometti. — DOI [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(81\)90129-4](https://doi.org/10.1016/0020-7225(81)90129-4) // International Journal of Engineering and Science. — 1981. — Т 19. — № 7. — С. 929–947. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020722581901294> (дата обращения: 02.04.2021).
9. **Blanc, R.H.** Infrared Radiometry Study of the Thermomechanical Behavior of Materials and Structures / R.H. Blanc, E. Giacometti // First International Conference of Stress Analysis by Thermoelastic Technics, Sira Ltd, London, November. — 1984 / Лондон: Sira Ltd, 1984. (дата обращения: 02.04.2021).
10. **Meneghetti, G.** On relation between J-integral and heat energy dissipation at the crack tip in stainless steel specimens / G. Meneghetti, M. Ricotta, G. Pitarresi. — DOI <https://doi.org/10.3221/JGF-ESIS.49.09> // Fracture and Structural Integrity. — 2019. — Т 13. — № 49. — С. 82–96. — URL: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/2502> (дата обращения: 02.04.2021).

11. **Berthel, B.** Thermographic Analysis of Fatigue Dissipation Properties of Steel Sheets / B. Berthel, B. Wattrisse, A. Chrysochoos, A. Galtier. — DOI <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2007.00349.x> // Strain. — 2007. — Т 43. — № 3. — С. 273–279. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-1305.2007.00349.x> (дата обращения: 02.04.2021).
12. **Boulanger, T.** Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels / T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00171-3) // International Journal of Fatigue. — 2004. — Т 26. — № 3. — С. 221–229. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112303001713> (дата обращения: 02.04.2021).
13. **Plekhov, O.** Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography / O. Plekhov, T. Palin-Luc, N. Saintier, S. Uvarov, O. Naimark. — DOI <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2005.00856.x> // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. — 2005. — Т 28. — № 1–2. — С. 169–178. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1460-2695.2005.00856.x> (дата обращения: 02.04.2021).
14. **Плехов, О.А.** Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии / О.А. Плехов. — DOI <https://doi.org/10.1134/S106378421102023X> // Журнал технической физики. — 2011. — Т. 81. — № 2. — С. 144–146. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20324786> (дата обращения: 02.04.2021).
15. **Терехина, А.И.** Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины / А.И. Терехина, М.В. Банников, О.А. Плехов, Э.В. Плехова. — DOI <https://doi.org/10.1134/S1063785012080238> // Письма в Журнал технической физики. — 2012. — Т. 38. — № 16. — С. 9–15. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20327953> (дата обращения: 02.04.2021).
16. **Vshivkov, A.** Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation / A. Vshivkov, A. Iziumova, O. Plekhov, J. Bär. — DOI <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.35.07> // Fracture and Structural Integrity. — 2015. — Т. 10. — № 35. — С. 57–63. — URL: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/1628> (дата обращения: 02.04.2021).
17. **Куриленко, Г.А.** Прогнозирование циклического ресурса деталей с макротрещинами термографическим методом / Г.А. Куриленко // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 321. — № 2. — С. 36–39. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17899264> (дата обращения: 02.04.2021).
18. **Imanishi, D.** Development of nondestructive crack inspection technique for steel structure using thermoelastic effect / D. Imanishi, Y. Nishina, H. Hayashi // Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18–22, 2013 (APCNDT 2013) / Мумбаи: Indian Society for Non Destructive Testing, 2014. — URL: <https://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/122.pdf> (дата обращения: 02.04.2021).
19. **Sakagami, T.** Application of infrared thermography to structural integrity evaluation of steel bridges / T. Sakagami, Y. Izumi, S. Kubo. — DOI <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289> // Journal of Modern Optics. — 2010. — Т. 57. — № 18. — С. 1738–1746. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500340.2010.511289> (дата обращения: 02.04.2021).
20. **Sakagami, T.** Nondestructive Evaluation of Fatigue Cracks in Steel Bridges Based on Thermoelastic Stress Measurement / T. Sakagami, Y. Izumi, D. Shiozawa, T. Fujimoto, Y. Mizokami, T. Hanai. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.267> // Procedia Structural Integrity. — 2016. — Т. 2. — С. 2132–2139. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616302785> (дата обращения: 02.04.2021).
21. **Chase, S.B.** Evaluation of Fatigue-Prone Details Using a Low-Cost Thermoelastic Stress Analysis System / S.B. Chase, Y. Adu-Gyamfi. — Шарлоттсвилль: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Virginia, 2017. — 48 с. — URL: [https://www.virginiadot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/17-r8.pdf](https://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/17-r8.pdf) (дата обращения: 02.04.2021).
22. **Sakagami, T.** TSA based evaluation of fatigue crack propagation in steel bridge members / T. Sakagami, Y. Mizokami, D. Shiozawa, Y. Izumi, A. Moriyama. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.200> // Procedia Structural Integrity. — 2017. — Т. 5. — С. 1370–1376. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617303190> (дата обращения: 02.04.2021).

23. **Котельников, В.В.** Теоретические и экспериментальные исследования контроля концентраторов напряжения металлоконструкций по анализу температурных полей поверхности / В.В. Котельников, О.Н. Будадин // Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 9. — С. 40–44. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15259907> (дата обращения: 02.04.2021).
24. **Мойсейчик, Е.А.** Выявление дефектов в стальных элементах конструкций с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля / Е.А. Мойсейчик, Е.К. Мойсейчик // Проблемы механики современных машин: Материалы V международной конференции, Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 года / ответственный редактор В.С. Балбаров Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2012. — С. 3–8. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381082> (дата обращения: 02.04.2021).
25. **Мойсейчик, Е.А.** Выявление дефектов стальных пролетных строений автодорожных и железнодорожных мостов с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля / Е.А. Мойсейчик // Автомобильные дороги и мосты. — 2010. — № 2. — С. 85–94. — URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/2820> (дата обращения: 02.04.2021).
26. Bridge Inspection Manual / Бурлэнге: Swedish National Road Administration, 1996. — 135 с. — URL: [https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/Bridges\\_inspection\\_Manuel.pdf](https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/Bridges_inspection_Manuel.pdf) (дата обращения: 02.04.2021).
27. ASTM D4580-03, Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding / DOI <https://doi.org/10.1520/D4580-03>. — Западный Коншохокен: ASTM International, 2003. — 4 с. — URL: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4580> (дата обращения: 02.04.2021).
28. ASTM D4788-03(2013), Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography / DOI <https://doi.org/10.1520/D4788-03R13>. — Западный Коншохокен: ASTM International, 2013. — 3 с. — URL: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4788> (дата обращения: 02.04.2021).
29. **Maquin, F.** Refined experimental methodology for assessing the heat dissipated in cyclically loaded materials at low stress levels / F. Maquin, F. Pierron. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.02.004> // Comptes Rendus Mécanique. — 2007. — Т. 335. — № 3. — С. 168–174. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072107000125> (дата обращения: 02.04.2021).
30. **Maquin, F.** Heat dissipation measurements in low stress cyclic loading of metallic materials: From internal friction to micro-plasticity / F. Maquin, F. Pierron. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.003> // Mechanics of Materials. — 2009. — Т. 41. — № 8. — С. 928–942. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663609000696> (дата обращения: 02.04.2021).
31. **Tighe, R.C.** Stress based non-destructive evaluation using thermographic approaches: From laboratory trials to on-site assessment / R.C. Tighe, G.P. Howell, J.P. Tyler, S. Lormor, J.M. Dulieu-Barton. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.08.005> // NDT & E International. — 2016. — Т. 84. — С. 76–88. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869516300767> (дата обращения: 02.04.2021).
32. **Соловьев, Л.Ю.** Исследование тепловыделения в металлах в условиях одноосного напряженного состояния как параметра усталостных повреждений в металлических мостах / Л.Ю. Соловьев. — DOI <https://doi.org/10.15862/12SATS319> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 12SATS319. — URL: <https://t-s.today/12SATS319.html> (дата обращения: 02.04.2021).
33. **Solovyev, L.** Method for Detecting Fatigue Damage to Bridges by Analyzing Dissipative Processes in Metals Under Periodic Loading / L. Solovyev, A. Solovyev. — DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_21) // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1116. / Под ред. Popovic Z., Manakov A., Breskich V. Кам: Springer, 2020. — URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3\\_21](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3_21) (дата обращения: 02.04.2021).
34. **Соловьев, Л.Ю.** Тепловой метод контроля усталостных трещин в сварных пролетных строениях мостов / Л.Ю. Соловьев // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 1. — С. 24–27. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44647516> (дата обращения: 02.04.2021).

35. **Solovyev, L.** Thermal Method in the Control of Fatigue Cracks in Welded Bridge Superstructures / L. Solovyev, A. Solovyev. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.084> // Transportation Research Procedia. — 2021. — Т. 54. — С. 355–361. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521002490> (дата обращения: 02.04.2021).
36. **Соловьев, Л.Ю.** Новые технологии в обследовании мостов / Л.Ю. Соловьев, А.Л. Соловьев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3. — С. 14–20. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109351> (дата обращения: 02.04.2021).

#### Сведения об авторах:

**Соловьев Леонид Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия, e-mail: lys111@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6961-8058>  
РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=440320](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=440320)

**Федоренко Владислав Анатольевич** — аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия, e-mail: sky.97@bk.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-1412>  
РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1115996](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1115996)

Статья получена: 30.07.2021. Принята к публикации: 08.09.2021. Опубликована онлайн: 22.11.2021.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального дорожного агентства Минтранса РФ (ГК 18/1-2020)

## REFERENCES

1. Zhunev K.O., Murovannyj Ju.N., Yashnov A.N. Fatigue life research of welded joints in railway girder. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(2). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS220>.
2. Bokarev S.A., Usoltsev A.M., Sluzhaev A.I. Prevention of Metal Bridge Spans from Fatigue Cracking. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(4): 181–193. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-4-181-193>.
3. Usoltsev A.M., Popova E.G., Malikov M.Yu. An Integrated Approach to Ensuring the Durability of Welded Spans of Railway Bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020; (3): 72–86. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109359> (accessed 2nd April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Thomson W. On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 1853; 20(2): 261–288. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0080456800033172>.
5. [Mechanical engineering. Encyclopedic reference. Section 2. Materials of mechanical engineering. Volume 3]. Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo mashinostroyitel'noy literatury; 1947. (In Russ.).
6. Belgen M.H. Infrared Radiometric Stress Instrumentation Application Range Study, NASA Report CR-1067. Columbus: North American Aviation, INC.; 1967. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680015499/downloads/19680015499.pdf> (accessed 2nd August 2021). (In Eng.).
7. Henneke E.G., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. Thermography — An NDI Method for Damage Detection. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1979; 31(9): 11–15. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03354475>.
8. Nayroles B., Bouc R., Caumon H., Chezeaux J.C., Giacometti E. Infrared telethermography and structures mechanics. *International Journal of Engineering and Science*. 1981; 19(7): 929–947. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(81\)90129-4](https://doi.org/10.1016/0020-7225(81)90129-4).
9. Blanc R.H., Giacometti E. Infrared Radiometry Study of the Thermomechanical Behavior of Materials and Structures. In: *First International Conference of Stress Analysis by Thermoelastic Technics*, Sira Ltd, London, November. — 1984. London: Sira Ltd; 1984.

10. Meneghetti G., Ricotta M., Pitarresi G. On relation between J-integral and heat energy dissipation at the crack tip in stainless steel specimens. *Fracture and Structural Integrity*. 2019; 13(49): 82–96. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.09>.
11. Berthel B., Wattrisse B., Chrysochoos A., Galtier A. Thermographic Analysis of Fatigue Dissipation Properties of Steel Sheets. *Strain*. 2007; 43(3): 273–279. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2007.00349.x>.
12. Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., Galtier A. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *International Journal of Fatigue*. 2004; 26(3): 221–229. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00171-3).
13. Plekhov O., Palin-Luc T., Saintier N., Uvarov S., Naimark O. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2005; 28(1–2): 169–178. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2005.00856.x>.
14. Plekhov O.A. Experimental study of thermodynamics of plastic deformation by infrared thermography. *Technical Physics*. 2011; 56(2): 301–304. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378421102023X>.
15. Terekhina, A.I., Bannikov, M.V., Plekhov, O.A., Plekhova E.V. Experimental study of heat generation at the vertex of a fatigue crack. *Technical Physics Letters*. 2012; 38(8): 736–738. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785012080238>.
16. Vshivkov A., Iziumova A., Plekhov O., Bär J. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation. *Fracture and Structural Integrity*. 2015; 10(35): 57–63. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.35.07>.
17. Kurilenko G.A. [Predicting the Cyclic Life of Parts with Macrocracks Using the Thermographic Method]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012; 321(2): 36–39. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17899264> (accessed 2nd April 2021). (In Russ.).
18. Imanishi D., Nishina Y., Hayashi H. Development of nondestructive crack inspection technique for steel structure using thermoelastic effect. In: *Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18–22, 2013 (APCNDT 2013)*. Mumbai: Indian Society for Non Destructive Testing; 2014. Available at: <https://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/122.pdf> (accessed 2nd April 2021). (In Eng.).
19. Sakagami T., Izumi Y., Kubo S. Application of infrared thermography to structural integrity evaluation of steel bridges. *Journal of Modern Optics*. 2010; 57(18): 1738–1746. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289>.
20. Sakagami T., Izumi Y., Shiozawa D., Fujimoto T., Mizokami Y., Hanai T. Nondestructive Evaluation of Fatigue Cracks in Steel Bridges Based on Thermoelastic Stress Measurement. *Procedia Structural Integrity*. 2016; 2: 2132–2139. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.267>.
21. Chase S.B., Adu-Gyamfi Y. Evaluation of Fatigue-Prone Details Using a Low-Cost Thermoelastic Stress Analysis System. Charlottesville: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Virginia; 2017. Available at: [https://www.virginia-dot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/17-r8.pdf](https://www.virginia-dot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/17-r8.pdf) (accessed 2nd April 2021). (In Eng.).
22. Sakagami T., Mizokami Y., Shiozawa D., Izumi Y., Moriyama A. TSA based evaluation of fatigue crack propagation in steel bridge members. *Procedia Structural Integrity*. 2017; 5: 1370–1376. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.200>.
23. Kotelnikov V.V., Budadin O.N. [Theoretical and experimental studies of the control of stress concentrators of metal structures by analyzing the temperature fields of the surface]. *Monthly Journal of Research and Production*. 2008; (9): 40–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15259907> (accessed 2nd April 2021). (In Russ.).
24. Moyseychik E.A., Moyseychik E.K. [Detection of defects in steel elements of structures using infrared non-destructive testing technologies]. In: *[Problems of mechanics of modern machines: materials of the V International Conference, Ulan-Ude, June 25–30, 2012]*. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2012. p. 3–8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381082> (accessed 2nd April 2021). (In Russ.).

25. Moysenchik E.A. Pinpointing defects of steel spans of railway and motorway bridges using infrared technologies of nondestructive testing. *Avtomobil'nyye dorogi i mosty*. 2010; (2): 85–94. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/2820> (accessed 2nd April 2021). (In Russ.).
26. Bridge Inspection Manual. Borlange: Swedish National Road Administration; 1996. Available at: [https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/Bridges\\_inspection\\_Manuel.pdf](https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/Bridges_inspection_Manuel.pdf) (accessed 2nd April 2021). (In Eng.).
27. ASTM D4580-03, Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding. West Conshohocken: ASTM International; 2003. Available at: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4580> (accessed 2nd April 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1520/D4580-03>.
28. ASTM D4788-03(2013), Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography. West Conshohocken: ASTM International; 2013. Available at: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4788> (accessed 2nd April 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1520/D4788-03R13>.
29. Maquin F., Pierron F. Refined experimental methodology for assessing the heat dissipated in cyclically loaded materials at low stress levels. *Comptes Rendus Mécanique*. 2007; 335(3): 168–174. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.02.004>.
30. Maquin F., Pierron F. Heat dissipation measurements in low stress cyclic loading of metallic materials: From internal friction to micro-plasticity. *Mechanics of Materials*. 2009; 41(8): 928–942. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.003>.
31. Tighe R.C., Howell G.P., Tyler J.P., Lormor S., Dulieu-Barton J.M. Stress based non-destructive evaluation using thermographic approaches: From laboratory trials to on-site assessment. *NDT & E International*. 2016; 84: 76–88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.08.005>.
32. Solovyev L.Yu. Investigation of heat release in metals under uniaxial stress state as a parameter of fatigue damage in metal bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(3): 12SATS319. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/12SATS319>.
33. Solovyev L., Solovyev A. Method for Detecting Fatigue Damage to Bridges by Analyzing Dissipative Processes in Metals Under Periodic Loading. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds). *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1116*. Cham: Springer; 2020. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3\\_21](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3_21) (accessed 2nd April 2021). (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_21).
34. Soloviev L.Yu. Thermal Method in Control of Fatigue Cracks in Welded Superstructures of Bridges. *Railway Track and Facilities*. 2021; (1): 24–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44647516> (accessed 2nd April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
35. Solovyev L., Solovyev A. Thermal Method in the Control of Fatigue Cracks in Welded Bridge Superstructures. *Transportation Research Procedia*. 2021; 54: 355–361. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.084>.
36. Solovyev L.Yu., Solovyev A.L. New Technologies in Bridge Inspection. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020; (3): 14–20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109351> (accessed 2nd April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).

---

**Information about the authors:**

**Leonid Yu. Solovyev** — Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, e-mail: lys111@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6961-8058>  
RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=440320](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=440320)

**Vladislav A. Fedorenko** — Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, e-mail: sky.97@bk.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-1412>  
RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1115996](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1115996)

---

Submitted: 30th July 2021. Revised: 08th September 2021. Published online: 22nd November 2021.

*This work was financially supported by the Federal Road Agency of the Ministry of Transport of the Russian Federation (GK 18/1-2020)*