

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Соловьев Л.Ю. Исследование тепловыделения в металлах в условиях одноосного напряженного состояния как параметра усталостных повреждений в металлических мостах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/12SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS319

For citation:

Solovyev L.Yu. (2019). Investigation of heat release in metals under uniaxial stress state as a parameter of fatigue damage in metal bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS319

Работа выполнена при поддержке гранта ОАО РЖД на развитие научно-педагогических школ

УДК 625.4

ГРНТИ 67.11

Соловьев Леонид Юрьевич

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

Доцент кафедры «Мосты»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: lys111@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=440320

Исследование тепловыделения в металлах в условиях одноосного напряженного состояния как параметра усталостных повреждений в металлических мостах

Аннотация. Целью работы является исследование процесса тепловыделения в металлах при симметричном цикле нагружения в условиях одноосного напряженного состояния для оценки развития усталостных повреждений в элементах металлических пролетных строений железнодорожных и автодорожных мостов. Автором рассмотрены изгибные и осевые нагружения образцов с искусственными концентраторами и без них. В ходе экспериментов образцы покрывали матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения 0,95. Для одновременной фиксации теплового излучения на верхней и нижней поверхности пазов, использованы зеркала. Для устранения помех, возникающих от теплового излучения окружающих предметов между этими предметами и образцами устанавливали экран из ткани. В результате экспериментальных работ автором установлено, что во всех образцах независимо от их конфигурации и режимов нагружения, усталостному разрушению (появлению видимых трещин) предшествовало резкое увеличение температуры поверхности при одинаковом уровне напряжений, названном автором критическим. Автором в ходе исследования выявлено, что величина критических напряжений для испытанных образцов при одноосном напряженном состоянии и симметричном цикле нагружения не зависит от количества концентраторов, их размеров и местоположения, а зависит от температуры саморазогрева и вида деформации. Таким образом критические напряжения можно считать характеристикой материала. Также автором отмечено, что при напряжениях, больших критических, наблюдается практически

линейная зависимость изменения температуры от общей величины приращения напряжений. Обобщая отмеченные свойства критических напряжений, можно утверждать, что такие напряжения могут использоваться для оценки развития усталостных повреждений при оценке технического состояния сооружения при обследованиях мостов.

Работа выполнена в рамках диссертационного исследования при поддержке гранта ОАО РЖД на развитие научно-педагогических школ.

Ключевые слова: долговечность; металлические пролетные строения; обследование мостов; оценка технического состояния; усталостные трещины; инфракрасная термография; критические напряжения

Введение

Усталостные повреждения в металлических мостах являются частым явлением, предсказать которое на стадии проектирования достаточно трудно в силу влияния множества случайных факторов, возникающих при эксплуатации сооружений. Современные автоматизированные системы мониторинга технического состояния мостов [1] не дают возможности в полной мере контролировать развитие усталостных повреждений при том, что их влияние на надежность конструкций пролетных строений является достаточно существенной [2]. Основным способом выявления таких повреждений по-прежнему остается визуальный контроль. Реже применяются различные методы неразрушающего контроля (ультразвуковая и акустико-эмиссионная дефектоскопия, магнитный резонанс и т. д.). Очевидно, что визуальным осмотром можно обнаружить только уже образовавшуюся трещину, а остальные методы дефектоскопии достаточно затратны по времени и трудоемкости, и требуют непосредственного контакта с исследуемой поверхностью.

Определение тепловыделения в металлах как параметра усталостных повреждений

Известно, что при переменных нагрузках металлический материал нагревается. Этот разогрев вызывается как внутренним трением (диссипацией энергии колебаний), так и трением соприкасающихся поверхностей неподвижных соединений (болтовых, заклепочных и т. д.). Тепловыделение является признаком и индикатором протекающего усталостного повреждения [3–7].

Эффективность тепловизионной съемки состоит еще и в том, что тепловизоры позволяют контролировать не отдельные точки, а распределение температур по некоторой площади (полю точек). В этом случае сравнение изменения температур близко лежащих точек поверхности дает возможность быстро выявлять проблемные зоны по резкому температурному контрасту дефектных и бездефектных участков. Кроме того, такое сравнение позволяет эффективно удалять шумы и не требует для этого сопоставления температурного сигнала с внешним (базовым) сигналом от нагрузки – здесь возможно применение так называемой самосинхронизации по полю измерений [8; 9]. Кроме того, результаты измерений можно получать прямо на месте работ в процессе их выполнения, а представление результатов является простым для понимания.

В настоящей работе исследовано тепловыделение в материале при симметричном цикле нагружения в условиях одноосного напряженного состояния. Симметричный цикл выбран, так как он является наиболее опасным при заданном максимальном напряжении цикла. Тепловыделение, а именно интенсивность потока инфракрасного излучения с поверхностей испытываемых образцов, измеряли по термограммам, полученным с помощью тепловизора FlukeTi450 с температурной чувствительностью (NETD) не более 0,05 °С.

Для исследования испытывали плоские образцы из стали ст.3 (рисунок 1). В поперечном сечении образцы, показанные на рисунке 1а,б, имели ширину 20 мм, толщину – 11,7 мм. Толщина сечения образцов, показанных на рисунке 1в,г, имели толщину 5 мм.

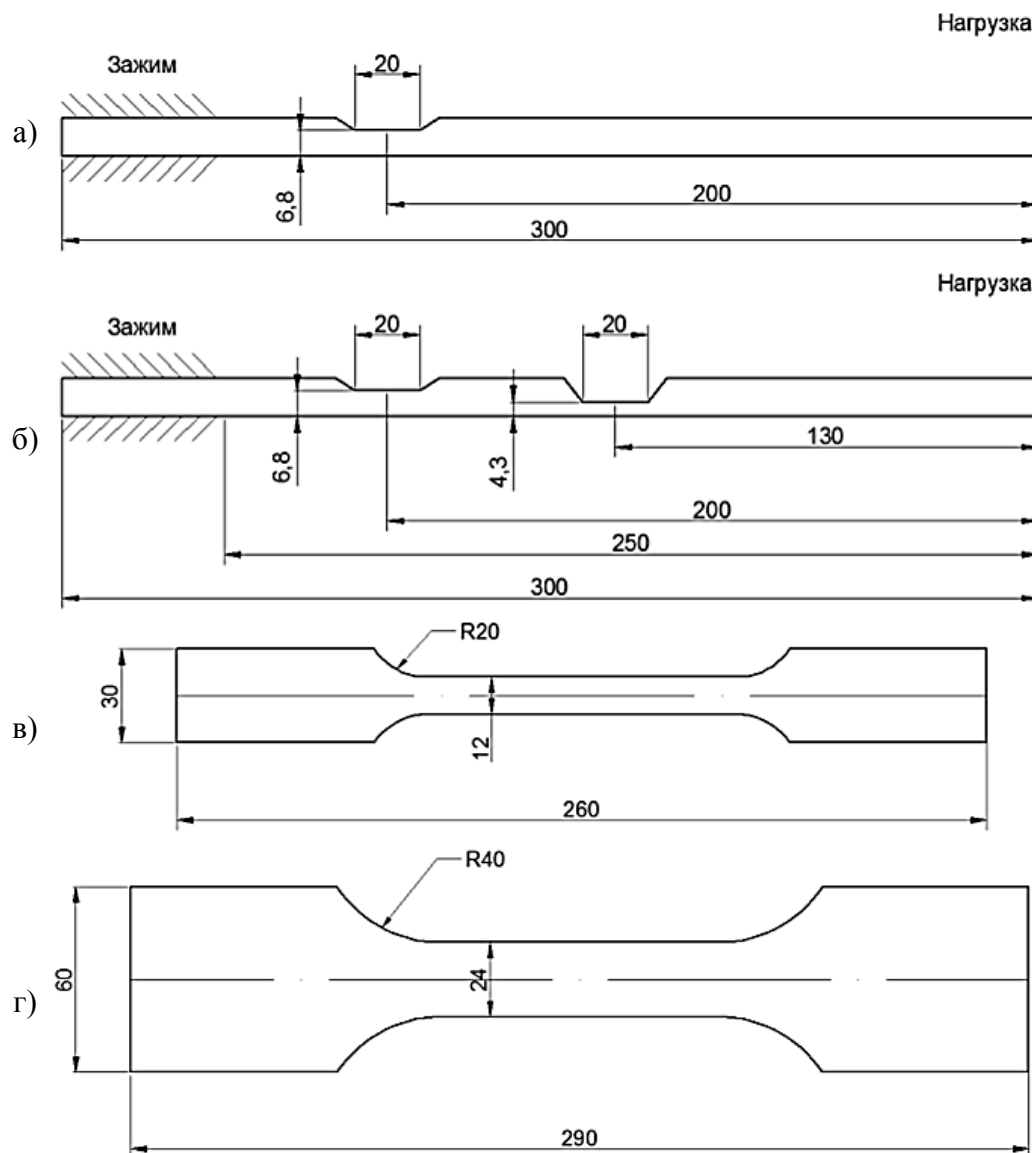


Рисунок 1. Плоские образцы (разработано автором):
а – с одним; б – с двумя пазами, в, г – образцы без пазов

При испытаниях образцы, показанные на рисунке 1а,б закрепляли в зажиме консольно за корневую часть и испытывали при изгибена вибростенде ST-3000. Образцы, показанные на рисунке 1в,г, закрепляли за расширенные концы в испытательной машине ГРМ-50 и испытывали при симметричном цикле односного растяжения-сжатия. Для того, чтобы не было дополнительного разогрева испытываемых образцовиз-за проскальзывания в месте зажима, образецфиксировался в зажиме с большим усилием поджатия.

Для уменьшения теплопередачи от образца в зажим сверху и снизу закрепляемой части каждого образца устанавливали асбестовые прокладки. Для локализации мест разогрева от микропластических деформаций при колебаниях, на образцы (рисунок 1а,б), наносили один или два паза-концентратора напряжений. На верхней и нижней поверхности пазов устанавливали тензодатчики с базой 10 мм, сигнал которых статически тарировали.

Следует отметить, что тепловизор регистрирует не температуру поверхности, а интенсивность ее инфракрасного излучения. Излучающая способность любой поверхности зависит не только от ее температуры, но и от коэффициента излучения ε_t . Максимальной излучающей способностью обладает абсолютно черное тело ($\varepsilon_t = 1$). Для реальных поверхностей коэффициент излучения зависит от состояния поверхности: шероховатости, наличия и толщины покрытия, от материала детали. Например, для алюминия и его сплавов коэффициент излучения $\varepsilon_t = 0,04-0,06$, с окисленной поверхностью $\varepsilon_t = 0,2-0,25$; для шлифованной стали $\varepsilon_t = 0,52-0,61$, для шлифованной латуни $\varepsilon_t = 0,05$, матовой тусклой $\varepsilon_t = 0,22$ [3]. При низких коэффициентах излучения изменение температуры поверхности на 1–3 °С тепловизором не фиксируется.

Для того чтобы обеспечить одинаковый и высокий коэффициент излучения исследуемых участков поверхности, образцы покрывали матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения $\varepsilon = 0,95$ [3–5]. Для одновременной фиксации тепловыделения на верхней и нижней поверхности пазов, использовали зеркала с внешним напылением отражающего слоя, установленные под углом $\pm 45^\circ$ к горизонту. Это позволило направить инфракрасное излучение с этих поверхностей в оптический блок тепловизора и зарегистрировать тепловыделение под прямым углом с поверхности исследуемого места образца. Для устранения помех, возникающих от теплового излучения окружающих предметов, температура которых больше температуры образца, между этими предметами и образцом устанавливали экран из ткани.

Порядок эксперимента был следующий. Образец (рисунок 1а) закрепляли в зажиме, снимали термограмму контролируемых зон образца до нагружения. Затем образец вводился в режим резонансных изгибных колебаний на 1 форме. Образец (рисунок 1б), закрепленный в зажимах испытательной машины ГРМ-50, нагружался при симметричном цикле растяжения, сжатия. Амплитуду напряжений при нагружении ступенчато увеличивали. На каждой ступени нагружения образец выдерживали 1–3 минуты, в течение которых температура образца стабилизировалась и снимали термограмму контролируемых зон образца. Каждый такой эксперимент повторялся 3–4 раза.

На рисунке 2, а показано изменение температуры в зоне концентраторов для образцов с двумя пазами в зависимости от амплитуды напряжений σ . Видно, что для материала имеется критическое напряжение $\sigma_{кр}$, при достижении которого начинается интенсивное тепловыделение – саморазогрев материала образца. Видно, что зависимость $T = f(\sigma)$ определяется не количеством концентраторов и их местоположением, а уровнем достигаемых напряжений, а значит – степенью развития усталостных повреждений.

Под критическим напряжением напряжение $\sigma_{кр}$, в дальнейшем будем понимать минимальное значение максимального напряжения цикла, при котором начинается тепловыделение в материале, от которого температура материала повышается до заданного значения ΔT и стабилизируется.

На рисунке 2б приведено распределение температуры по длине образца с двумя концентраторами напряжений. Здесь $Z = z / \ell$, z – расстояние по длине образца, от заделки до места паза, температура которого измерялась, ℓ – длина консоли образца. Паз около свободного конца был таким, чтобы, при колебаниях образца по первой форме, напряжение здесь было больше, чем в концентраторе около заделки. Поэтому при колебаниях образца разогрев начинался в пазе, который ближе к свободному концу образца. При повышении амплитуды колебаний разогрев здесь был больше, чем разогрев в пазе около заделки.

По результатам экспериментов, приведенных на рисунках 1 и 2, можно сделать выводы:

1. Если в каком-либо месте образца максимальное напряжение цикла σ при нагружении превысит определенное значение, т. е. $\sigma > \sigma_{кр}$, то в этом месте образца наблюдается локальный разрыв. Здесь $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение, которое зависит от материала, температуры саморазогрева и вида деформации.
2. Величина $\sigma_{кр}$ для испытанных образцов при одноосном напряженном состоянии и симметричном цикле нагружения не зависит от количества концентраторов, их величины, местоположения.
3. При напряжениях. $\sigma > \sigma_{кр}$ наблюдается практически линейная зависимость изменения температуры от величины $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{кр}$, где σ – максимальное напряжение в месте разогрева образца.

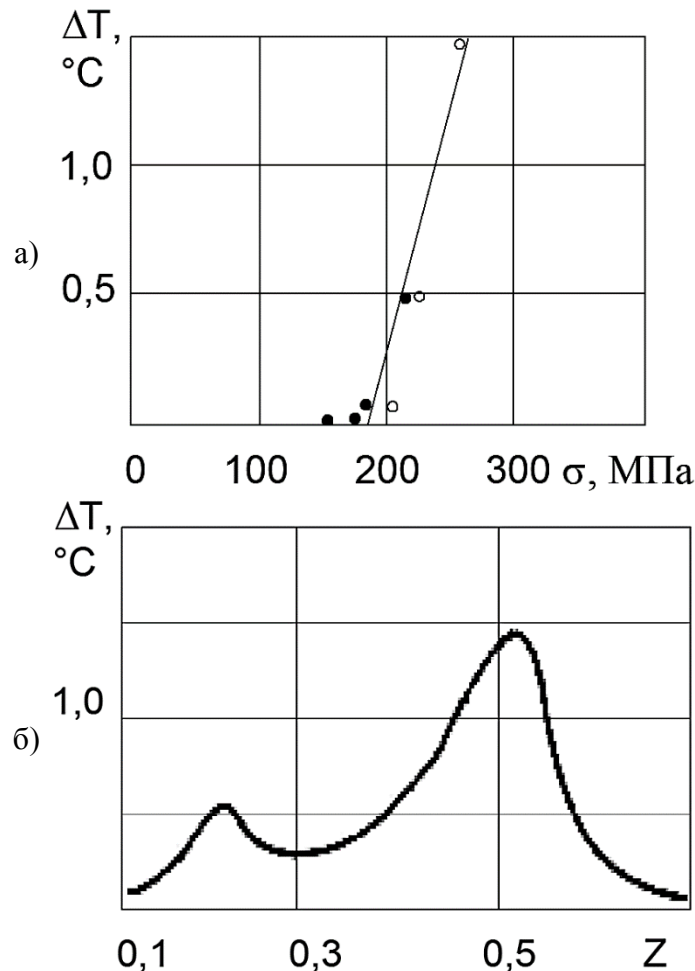


Рисунок 2. Изменения температуры саморазогрева в образцах
а – Зависимость температуры от максимального напряжения цикла;
б – Изменение температуры по длине образца с двумя пазами: ● – паз ближе к заделке,
○ – паз ближе к свободному концу образца (разработано автором)

Заключение

Важным достоинством тепловизионной съемки по сравнению с другими методами является то, что тепловизоры позволяют контролировать не отдельные точки, а распределение температур по некоторой площади (полю точек). В этом случае сравнение изменения температур близко лежащих точек поверхности дает возможность быстро выявлять проблемные зоны по резкому температурному контрасту дефектных и бездефектных участков.

Результаты измерений можно получать прямо на месте работ в процессе их выполнения, а представление результатов удобно для последующего анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яшнов, А.Н. Проектирование систем мониторинга технического состояния внеклассных железнодорожных мостов / А.Н. Яшнов, П.Ю. Кузьменков. Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т.1. С. 470–474.
2. Прибытков, С.С. Определение показателей надежности сварных пролетных строений по данным появления и развития усталостных трещин / С.С. Прибытков, М.Ю. Маликов. Политранспортные системы. Материалы IX Международной научно-технической конференции. Сибирский государственный университет путей сообщения. 2017. С. 66–73.
3. Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
4. Хадсон, Р. Информационные системы. М.: Мир, 1972. – 535 с.
5. Вавилов, В.П. Тепловизоры и их применения / В.П. Вавилов, А.Г. Климов – М.: Интел универсал, 2002. – 87 с.
6. Соловьев, Л.Ю. Удаленный контроль усталостных трещин в металлических пролетных строениях мостов / Л.Ю. Соловьев, А.Л. Соловьев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Восьмой Междунар. науч.-практ. конф., 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск: в 2 т. – Иркутск: ИрГУПС. – 2017. – Т. 1. – С. 469.
7. Куриленко, Г.А. Исследование повреждаемости металлов термодинамическим способом / Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 3. С. 105–109.
8. Sakagami, T. Development of self-reference lock-in thermography and its application to remote nondestructive inspection of fatigue cracks in steel bridges / T. Sakagami, Y. Izumi, N. Mori, S. Kubo. Quantitative InfraRed Thermography Journal, Volume 7, No. 1, 2010, pp. 73–84; doi: 10.3166 / qirt. 7. 73–84.
9. Oswald-Tranta, B. Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals, Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2019, doi: 10.1080/17686733.2019.1592391.

Solovyev Leonid Yur'evich

Siberian transport university, Novosibirsk, Russia
E-mail: lys111@yandex.ru

Investigation of heat release in metals under uniaxial stress state as a parameter of fatigue damage in metal bridges

Abstract. The purpose of the issue is to study the process of heat release in metals under a symmetric loading cycle under conditions of uniaxial stress in order to assess the development of fatigue damage in the elements of metal superstructures of railroad and highway bridges. The author considered bending and axial loads of specimens with and without artificial concentrators. During the experiments, the samples were covered with matte paint, which ensured an emission coefficient of 0.95. For simultaneous fixation of thermal radiation on the upper and lower surfaces of the slots, mirrors were used. To eliminate interference from thermal radiation from surrounding objects, a fabric screen was installed between these objects and samples. As a result of experimental work, the author found that in all samples, regardless of their configuration and loading conditions, fatigue failure (the appearance of visible cracks) was preceded by a sharp increase in surface temperature at the same stress level, which the author called critical. The author during the study revealed that the magnitude of the critical stresses for the tested samples under uniaxial stress state and symmetric loading cycle does not depend on the number of concentrators, their sizes and location, but depends on the self-heating temperature and the type of deformation. Thus, the critical stress can be considered a characteristic of the material. The author also noted that at stresses greater than critical, an almost linear dependence of the temperature change on the total value of the stress increment is observed. Summarizing the noted properties of critical stresses, it can be argued that such stresses can be used to assess the development of fatigue damage when assessing the technical condition of a structure during bridge inspections.

The work was performed as part of a dissertation research with the support of a grant from Russian Railways for the development of scientific and pedagogical schools.

Keywords: durability; metal superstructures; bridge inspection; technical condition assessment; fatigue cracks; infrared thermography; critical stresses

REFERENCES

1. Yashnov A.N., Kuz'menkov P.Yu. (2016). Design of monitoring systems for the technical condition of extra-class railway bridges. *Transport infrastructure of the Siberian region*, 1, pp. 470–474 (in Russian).
2. Pribytkov S.S., Malikov M.Yu. (2017). Opredelenie pokazateley nadezhnosti svarnykh proletnykh stroeniy po dannym poyavleniya i razvitiya ustalostnykh treshchin. [*Determination of reliability indicators of welded spans according to the appearance and development of fatigue cracks.*] Novosibirsk: Siberian State University of Railway Engineering, pp. 66–73.
3. Kriksunov L.Z. (1978). Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki. [*Infrared Technology Reference.*] Moscow: Soviet Radio, p. 400.
4. Khadson R. (1972). Informatsionnye sistemy. [*Information Systems.*] Moscow: World, p. 535.
5. Vavilov V.P., Klimov A.G. (2002). Teplovizory i ikh primeneniya. [*Thermal imagers and their applications.*] Moscow: Intel station wagon, p. 87.
6. Solov'ev L.Yu., Solov'ev A.L. (2017). Udalennyy kontrol' ustalostnykh treshchin v metallicheskih proletnykh stroeniyakh mostov. Tom 1. [*Remote control of fatigue cracks in metal spans of bridges. Volume 1.*] Irkutsk: Irkutsk State Transport University, p. 469.
7. Kurilenko G.A. (2015). The study of metal damage by the thermodynamic method. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 3(326), pp. 105–109 (in Russian).
8. Sakagami T., Izumi Y., Mori N., Kubo S. (2010). Development of self-reference lock-in thermography and its application to remote nondestructive inspection of fatigue cracks in steel bridges. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 1(7), pp. 73–84. DOI: 10.3166.
9. Oswald-Tranta B. (2019). Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. DOI: 10.1080/17686733.2019.1592391.