

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТОВ В  
ЭЛЕМЕНТАХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ  
ПОД НАГРУЗКОЙ, ПО ИК-ИЗЛУЧЕНИЮ**

Состояние конструкции определяется характером и значением приложенных к ней нагрузок и воздействий. При некоторых величинах нагрузок и параметрах воздействий можно выделить зоны, в которых возникают деформации и напряжения больших величин, чем на смежных участках. Такие участки будем рассматривать как потенциально опасные. При дальнейшем нагружении конструкций в потенциально опасных зонах напряженно-деформированное состояние (НДС) будет изменяться, могут зародиться дефекты на микроуровне, а НДС - приблизиться к критическому состоянию. При этом на мезоуровне дефекты развиваются до локально-критической величины. Возникновения недопустимой текучести материала в критических зонах или магистральной трещины может не произойти вследствие вероятностного характера проявления критических зон и постоянно меняющегося НДС в деформируемых элементах конструкции при росте нагрузки. Вследствие этого расчетным путем определить локализацию потенциально опасных участков не всегда возможно.

Процесс деформирования стальных элементов определяется образованием и развитием полос деформации, в пределах которых сталь находится в пластически активированном состоянии [1]. Экспериментальные данные [1, 2] свидетельствуют о том, что при пластической деформации, в полосах, выделяется значительное количество тепла, сопровождаемое инфракрасным излучением с поверхности тела. Вне этих полос материал работает упруго или в упругопластическом состоянии. Зарождение полос деформации и их развитие определяется расположением дефектов.

При упругой работе материала между изменением температуры деформируемого тела, деформациями и напряжениями в теле существует зависимость (1) [3]:

$$\Delta T = \frac{E\alpha_L T}{\rho c_p(1-2\nu)} \sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii} = -\frac{\alpha_L}{\rho c_p} T \sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii} = -K_m T \Delta \sigma, \quad (1)$$

где  $\sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}$  – сумма изменений трех линейных деформаций;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_L$  – температурный коэффициент расширения материала при температуре  $T$ ;  $C_\varepsilon$  и  $C_p$  – соответственно, удельные тепловыделения при постоянных деформации и давлении;  $K_m = \alpha_L / (\rho C_p)$ .

В работе [3] показано, что между потоком фотонов инфракрасного излучения  $\Delta\Phi$  с поверхности тела и изменением напряжений имеется также прямая зависимость. Действительно, дифференцируя уравнение Стефана-Больцмана, для фотонного детектора можно получить [3]:

$$\Delta\Phi = 13eB'T^2\Delta T. \quad (2)$$

Тогда из выражений (1) и (2) следует:

$$\Delta\Phi = 13eB'T^3K_m\Delta\sigma, \quad (3)$$

где  $B'$  – постоянная Стефана-Больцмана для фотонной эмиссии ( $1,52041 \cdot 10^{15}$  фотон.сек<sup>-1</sup>.м<sup>-2</sup>.К<sup>-3</sup>). Выражение (3) обосновывает использование сканирующих инфракрасных приборов для исследования напряжений на поверхности тел, при их работе в упругой стадии.

Радиационное температурное поле поверхности деформируемых элементов в процессе нагружения в лаборатории или в натуре записывается в виде ряда последовательных кадров (термофильма), следующих друг за другом с установленной на инфракрасном компьютерном термографе частотой (обычно 1 – 50 кадров в секунду) [1]. Каждый кадр термофильма фиксирует температурное поле поверхности в данный момент времени. Сопоставляя кадры можно проследить кинетику изменения температурного поля исследуемой поверхности и изменения температуры в потенциально опасных зонах, наблюдать рождение новых опасных зон, изменения в прежних зонах, зарождение макротрещин, кинетику их развития, процесс разрушения элемента [1]. Начальную локализацию опасных зон можно определять как расчетным методом, так и по данным инфракрасной термографии.

Выявление опасных зон в конструкциях предусматривают и отдельные нормативные документы. Например, ГОСТ Р 56511-2015 распространяется «на методы теплового вида неразрушающего контроля и устанавливает область применения, общие требования к аппаратуре и контрольным образцам, порядку подготовки и проведению контроля, оформлению результатов и требования безопасности». ГОСТ Р 53006—2008 определяет основные требования к нормативным документам, «регламентирующих процедуры оценки остаточного ресурса потенциально опасных технических объектов с использованием неразрушающих экспресс-методов». При этом к экспресс-методам отнесены пассивные физические методы

неразрушающего контроля, использующие в качестве информативных параметров физические поля, характеризующие собственную (внутреннюю) энергию металла объекта контроля (акустическую эмиссию, метод магнитной памяти металла, тепловой контроль и др.). В РД 153-112-017-97 (п.2.10) регламентируется выявление дефектов и определение зон концентраторов напряжений методом инфракрасной спектроскопии в металлоконструкциях вертикальных стальных резервуаров для хранения продуктов нефтепереработки и др. Выявление дефектов предписывается выполнять в процессе загрузки резервуара топливом в зонах, где расчетные напряжения достигают  $0,9\sigma_{02}$ . Коэффициент концентрации напряжений в области дефекта определяют отношением приращения температуры в области концентратора и бездефектной области (4):

$$\alpha_1^T = \Delta t_g / \Delta t_0, \quad (4)$$

где  $\Delta t_g$  - приращение температуры в области дефекта;  
 $\Delta t_0$  – приращение температуры в бездефектной области.

В других областях промышленности нет нормативов, регламентирующих применение инфракрасной термографии. Методики конкретных применений инфракрасной термографии для неразрушающего контроля стальных конструкций, изделий разрабатываются авторами конкретных исследований.

Так, ряд исследований в области механики твердого деформируемого тела выполнено под руководством О.А. Плехова в Пермском институте механики сплошных сред УрО РАН. В работах [4, 5] экспериментально исследуются генерация тепла в различных металлах при статическом и циклическом нагружении с использованием метода инфракрасной термографии. Исследовано пространственное и временное изменение температуры в вершине трещины, определены форма и интенсивность зоны диссипации тепла. Показана связь характеристик механики разрушения с теплообразованием в телах. Сравнением полученных экспериментальных данных с соотношениями линейной теории упругости показано, что в отдельных случаях имеется несоответствие формы зоны пластической деформации и характера тепловыделения в вершине трещины теоретическим моделям [5].

В монографиях Вавилова В.П. [6], Будадина О.Н. с коллегами [7] представлены результаты многолетних исследований по разработке и внедрению метода теплового неразрушающего контроля и программно-аппаратных в различные отрасли науки и техники. Обобщены и систематизированы современные достижения в области тепловых неразрушающих бесконтактных методов контроля металлических,

композитных и других материалов и изделий.

В монографии Пустового В.Н. [8] описаны методы расчета остаточной прочности и остаточного ресурса, перспективные методы технического диагностирования металлоконструкций с применением инфракрасной термографии, отмечается возможность выявления тепловым методом опасных зон в металлоконструкциях кранов и экспериментального определения коэффициентов концентрации напряжений. Методика теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов рассмотрена в диссертации Котельникова В.В. [9], в которой отмечается, что разработка и внедрение метода оперативного и достоверного неразрушающего контроля является актуальной задачей. Ее методическое обеспечение позволит значительно снизить объемы контроля и предоставит возможность оперативно определять техническое состояние сложных металлических конструкций. Методические предложения автора носят локальный характер. Они не охватывают теплообразование в других конструктивных формах.

Ряд актуальных задач теплообразования в разнообразных конструктивных формах при их статической работе рассмотрены в монографии Мойсейчика Е.А. [1], в том числе природа теплообразования при деформировании стальных изделий с разнообразными концентраторами напряжений, особенности температурных полей поверхности различных стальных изделий с конструктивно-технологическими дефектами, особенности определения коэффициентов концентрации по данным температурных измерений поверхностей и др.

В работе Е.С. Лукина [2] представлены методические основы исследования процесса деформирования и кинетики разрушения конструкционных сталей на основе термопластического эффекта, основы методики определения мощности внутренних тепловых источников при деформировании отдельных образцов и показано, что за момент появления предельного состояния можно принять характерные величины температуры поверхности образца.

В отчете [10] рассматриваются возможности дальнейшего применения инфракрасных тепловых методов для диагностики конструкций стальных мостов. Цель своей работы авторы [10] видят в том, чтобы исследовать возможности, чувствительность и ограничения при выявлении усталостных трещин в стальных конструкциях методом инфракрасной термографии. Для лабораторных экспериментов использовалась ИК-камера StressPhotonics, Inc. с частотой кадров 434 кадра/с. Авторы исследовали ряд факторов, сказывающиеся на точности

и достоверности метода (расстояние от прибора до конструкции, состояние поверхности, минимальная длина выявляемых трещин и др.). В работе анализировались возможности активных и пассивных подходов. Расстояние от поверхности до объектива камеры изменялось в интервале 22,5 см (пассивный метод) и 90 см (активный метод). В отчете установлены и другие полезные для разработки программы и методики исследований данные. В качестве нерешенных задач авторы выделяют следующие:

- ❖ сложности калибровки измерительной системы в условиях эксперимента (особенно в полевых условиях);
- ❖ в полевых условиях удобнее измерительная система, в которой ИК-камера и компьютер представляют один блок;
- ❖ минимальный размер трещины, обнаруживаемый ИК измерительной системой часто больше минимального размера трещины, выявляемого визуально.

Устранение части перечисленных недостатков авторы отчета [10] видят в повышении чувствительности ИК измерительной системы.

В отраслевом дорожном методическом документе Росавтодора (ОДМ 218.7.2.001-2021) [11] приведены рекомендации по дистанционному определению наличия и степени развития усталостных трещин в элементах металлических пролетных строений автодорожных мостов (включая ортотропные плиты) методом инфракрасной термографии. В документе рассмотрены общие сведения о применении метода ИК термографии для обследования металлических мостов, перечислены выявляемые дефекты и применяемые методы, изложена методика измерений обработки и интерпретации результатов.

Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых технологий, базирующихся на волновых методах (инфракрасных и др.) является перспективным направлением, позволяющим в сочетании с компьютерными методами разрабатывать регистрирующие системы для измерений полей деформаций в лабораторных образцах или элементах конструкций в процессе их деформирования. Программное обеспечение позволяет производить дистанционные измерения, управлять сбором первичной информации, получать и обрабатывать экспериментальные данные в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента. Для выявления зон концентрации напряжений и деформаций перспективными являются тепловые и оптические методы, а в сочетании со спекл-интерферометрией, тензометрией – для исследования напряжений и деформаций в опасных зонах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мойсейчик, Е.А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин: монография/ Е.А. Мойсейчик. – Минск: Ковчег, 2022. – 200 с.
2. Лукин, Е.С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Якутск: ИФТПС РАН, 2005 г. – 23 с.
3. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Кн.2. Пер. с англ./ Под ред. А Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
4. Терехина, А.И. Оценка нормальных и касательных напряжений в деформируемых металлах по данным инфракрасной термографии/ А.И. Терехина, А.А. Костина, О.А. Плехов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 241–251.
5. Федорова, А.Ю. Применения метода инфракрасной термографии для определения параметров линейной механики трещин/ А.Ю. Федорова, М.В. Банников, О. А. Плехов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 214–225.
6. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль/ В.П.Вавилов. – М.: ИД Спектр. – 2009. – 544 с.
7. Будадин, О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий/ О.Н.Будадин, А.И. Потапов, Т.Е. Троицкий-Марков. – М.: Наука. – 2002. – 473 с.
8. Пустовой, В. Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса/ В.Н. Пустовой. - М.: Транспорт, 1992. - 256 с.
9. Котельников, В.В. Разработка методики теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.11 / В.В. Котельников; МГТУ. – М., 2009. – 19 с.
10. The examination of infra-red techniques for inspection of steel structures. Final Report FHWA/IN/JTRP – 2000/18/ Vachirapun Trakulyingyong, Mark D. Bowman. Режим доступа: docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?...1680...jtrp.
11. Методические рекомендации по дистанционному определению наличия и степени развития усталостных трещин в элементах металлических пролетных строений автодорожных мостов (включая

ортотропные плиты) методом инфракрасной термографии. ОДМ 218.7.2.001-2021. – М.: Росавтодор, 2021. – 94 с.

*УДК 515.12*

*Яловенко И.А.*

*Научный руководитель: Брыкова Л.В., канд. пед. наук, доц.  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

## **ЛИСТ МЕБИУСА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**

За последнее столетие огромное влияние на ряд различных областей знания приобрела новая ветвь геометрии под названием топология. Данная наука быстро развивается и находит свое применение в различных областях. Топология проникает не только во все области математики, но и во многие другие науки.

Каждый из нас имеет представление о том, что такое «поверхность». Поверхность - это наружная сторона предмета, или граница, отделяющая геометрическое тело от внутреннего пространства или другого тела. Например, поверхность листа бумаги, поверхность стен, поверхность земного шара и многое другое, но в данном понятии есть много чего неожиданного и даже таинственного - это односторонняя поверхность [1].

Один из примеров топологии - таинственный и знаменитый лист Мёбиуса.

В 1858 году 19 века величайший математик Август Фердинанд Мёбиус представил Парижской академии материалы об «Односторонних поверхностях». В своей работе он продемонстрировал геометрическую поверхность, которая имела только одну сторону. После чего эта поверхность была названа листом Мёбиуса.

Лист Мёбиуса (петля Мёбиуса, лента Мёбиуса) – один из объектов области математики, которая называется «топология» («геометрия положения»). Отличительная черта этого листа заключается в том, что он имеет одностороннюю поверхность с краем, в которой из одной точки этой поверхности можно попасть в любую другую, не пересекая края [2].

Для создания листа будет достаточно иметь прямоугольную полоску бумаги, для ясности обозначим углы с одной стороны ленты А и В, а с другой – А' и В'. Далее концы склеиваются, предварительно повернув один из них на 180 градусов. Точка А' ляжет на точку В, а точка В' - на точку А (рис. 1).