

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

СТАРЧИК Ю.Ю.,
СЕРГЕЕВ А.И.

АННОТАЦИЯ

Проблема обеспечения безопасности производства на промышленных предприятиях всегда была и остается актуальной. Аварии или разрушения крановых металлоконструкций вызваны воздействием многих факторов, но всегда обусловлены образованием дефектов в элементах конструкции. При нагружении металлоконструкций в местах концентрации напряжений может происходить пластическая деформация, сопровождающаяся выделением тепла. Предлагается отслеживать тепловизионным методом неразрушающего контроля зарождающиеся трещины в крановых металлоконструкциях на стадии их зарождения. В статье приведена математическая оценка мощности выделения теплоты.

Ключевые слова: трещина; тепловизор; пластическая деформация; концентратора напряжений; предела текучести.

MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMOVISION METHOD OF RESEARCH OF CRANE METAL CONSTRUCTION

STARCHIK Y.Y.,
SERGEYEV A.I.

ABSTRACT

The problem of safety of production at the industrial enterprises always was and remains actual. Accidents or destructions of a crane metalwork are caused by influence of many factors, but always caused by formation of defects in design elements. When loading a metalwork in places of concentration of tension there can be the plastic deformation, being accompanied heat allocation. It is offered to trace a thermovision method of nondestructive control arising cracks in a crane metalwork at a stage of their origin. The mathematical assessment of power of allocation of warmth is given in article.

Keywords: crack; thermal imager; plastic deformation; concentrator of tension; fluidity limit.

В последние годы вопрос обеспечения безопасности эксплуатации сварных конструкций резко обострился из-за сильной изношенности производственного оборудования и участвовавших случаев технологических аварий и катастроф. В полной мере это относится и к грузоподъемным машинам (кранам) разного назначения, в том числе и к сварным металлоконструкциям мостовых кранов, которые составляют более 38% всех грузоподъемных механизмов на территории Российской Федерации.

В филиале БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске создана лаборатория энергоаудита, которая проводит тепловизионные обследования (энергоаудит) зданий и сооружений, представляя взаимосвязанный комплекс технических, организационных, экономических мероприятий, направленный на выявление возможности экономически эффективной оптимизации потребления энергетических ресурсов.

Мы предлагаем использовать тепловизионный метод контроля тепловизором ФЛИР 335 для крановых металлоконструкций, основанный на том, что при нагружении металлоконструкций в местах концентрации напряжений происходит пластическая деформация, сопровождающаяся

выделением теплоты. Распространение теплоты в конструкции приводит к тому, что на ее поверхности возникает сложное распределение температурного поля, которое можно зафиксировать тепловизором.

При нагружении металлоконструкций в местах концентрации напряжений может происходить пластическая деформация, сопровождающаяся выделением тепла [1]. При этом наличие областей пластической деформации может не влиять на безопасность эксплуатации всей конструкции [2]. Такая ситуация имеет место, например, в случае подъемных кранов, где областями концентрации напряжений являются сварные швы и стыки элементов крана. Кроме того, в случае трещиноподобных дефектов, когда напряжение сингулярно возрастает при приближении к вершине дефекта, область пластической деформации существует даже при сколь угодно малых напряжениях в толще конструкции [2].

Распространение тепла в конструкции приводит к тому, что на ее поверхности возникает сложное распределение температурного поля [3]. Формально, зафиксировав это распределение и решив обратную задачу нестационарной теплопроводности [3], можно восстановить рас-

пределение источников тепла, а, следовательно, и определить положение и размер дефекта. Этот факт может быть положен в основу методики тепловизионной диагностики металлических изделий.

В основе тепловизионного метода контроля лежит предположение о том, что пластическая деформация, сопровождается выделением тепловой энергии, возникающим в тот момент, когда локальное значение механического напряжения достигает условного предела текучести σ_{02} .

Рассмотрим полубесконечный слой металла (рисунок 1), внутри которого имеется трещина (в виде разреза шириной d), который характеризуется коэффициентом концентрации напряжений $K_t(r)$, где r – координата точки на поверхности фрагмента. Будем считать, что величина напряжения в бездефектной части фрагмента $\sigma_\infty(t)$ известна.

Вблизи концентратора напряжений величина механического напряжения равна:

$$\sigma(r,t) = K_t(r) \sigma_\infty(t). \quad (1)$$

При достижении величины напряжения в некоторой точке $R(t)$ вблизи концентратора напряжений значения σ_{02} , в ней начинается выделение теплоты. Установим начало координат в точке, в которой начинается выделение теплоты в момент t . Распределение теплового поля вблизи данной точки нужно зафиксировать с помощью тепловизора. В дальнейшем определяем значение коэффициента концентрации напряжений из формулы (1):

$$K_t(R(t)) = \frac{\sigma_{02}}{\sigma_\infty(t)} \quad (2)$$

Для проведения исследования тепловыделения был взят наиболее опасный концентратор напряжения – трещина.

Плоскость, в которой лежит трещина, перпендикулярна поверхности металла.

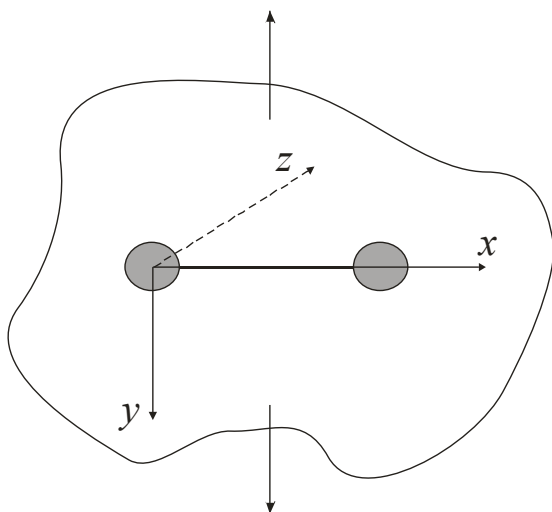


Рисунок 1 – Схематическое изображение полубесконечного слоя металла с трещиной

На рисунке 1 толстая сплошная линия соответствует трещине, вблизи краев которой возникает пластическая деформация (закрашенные области). Внешняя нагрузка прикладывается перпендикулярно плоскости трещины.

В этом случае вблизи правого и левого краев трещины возникают области пластической деформации, в которых выделяется теплота. Для упрощения задачи предположим, что область деформации вблизи каждого края имеет цилиндрическую форму. Радиус цилиндра определяем из формулы Ирвина:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_t}{\sigma_{02}} \right)^2 = \frac{d}{6} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{02}} \right)^2 \quad (3)$$

Так как трещина считается бесконечно узкой, то ее наличие не влияет на процесс распространения теплоты в металле. Таким образом, для расчета значений температуры u температурного поля в металле необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \Delta u + Q_0 \Theta(\tau - t) \Theta(z) \Theta(r - r_p), \quad (4)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$,

$\Theta(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда,

r_p – радиус зоны пластической деформации,

Q_0 – мощность выделения теплоты, c, ρ и λ – соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности металла,

Δ – оператор Лапласа.

В начальный момент времени $t=0$ температура металла равна температуре окружающей среды, которую будем считать равной нулю.

Уравнение теплопроводности (4) решим методом разделения переменных, представив решение в следующем виде:

$$\tilde{u}(\tilde{t}, \tilde{r}, \tilde{z}) = \sum_{m,n} \frac{I_{r,n} I_{z,m} \left\{ 1 - \exp \left\{ - \left[\left(\frac{\gamma_m}{\tilde{L}} \right)^2 + \left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \right)^2 \right] \tilde{t} \right\} \right\}}{\left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_m}{\tilde{L}} \right)^2} \cdot J_0 \left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \tilde{r} \right) \cos \left(\frac{\gamma_m}{\tilde{L}} \tilde{z} \right) \quad (5)$$

где значения β_n являются нулями функции Бесселя нулевого порядка:

$$J_0(\beta_n) = 0, \quad (6)$$

значения γ_m определяются из решения трансцендентного уравнения

$$\tan \frac{\gamma_m}{2} = \frac{\tilde{L} \tilde{\alpha}}{\gamma_m}, \quad (7)$$

а коэффициенты $I_{r,n}$ и $I_{z,m}$ задаются следующими выражениями:

$$I_{r,n} = \frac{\int_0^1 \tilde{z} J_0 \left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \tilde{z} \right) d\tilde{z}}{\tilde{R}^2 [J_0'(\beta_n)]^2} = \frac{\tilde{R}}{\beta_n} J_1 \left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \right) = \frac{2 J_1 \left(\frac{\beta_n}{\tilde{R}} \right)}{\beta_n \tilde{R} [J_1(\beta_n)]^2},$$

$$I_{z,m} = \frac{\int_0^{\frac{L}{2}} \cos\left(\frac{\gamma_m}{L} z\right) d\bar{E}}{\int_0^{\frac{L}{2}} \cos^2\left(\frac{\gamma_m}{L} z\right) d\bar{E}} = \frac{4 \sin\left(\frac{\gamma_m}{2}\right)}{\gamma_m + \sin(\gamma_m)} \quad (8)$$

В связи с тем, что в основном металлоконструкции кранов изготавливаются из стали 20, численные оценки будут получены для металлоконструкции из стали 20 со следующими характеристиками: $\sigma_{0.2} = 250$ МПа, $\lambda = 52$ Вт/(м С°), $\rho = 7859$ кг/м³, $c = 486$ Дж/(кг С°). Коэффициент теплоотдачи будем считать равным $a = 8$ Вт/(м² С°), что является типичным значением в случае безветренной погоды.

Положим, что образец нагружается так, что напряжение вдали от трещины в 2 раза меньше условного предела текучести $\sigma_{0.2}$. Предположим, что размер трещины равен $d = 1$ мм. Для оценки

мощности выделения теплоты Q_0 будем считать, что относительное удлинение образца (в котором доминирует пластическая составляющая) составляет величину порядка $\bar{\epsilon} = 0.1$. Тогда справедлива оценка:

$$Q_0 = \frac{d}{dt} \int \sigma d\epsilon = \frac{\sigma_{0.2} \bar{\epsilon}}{\tau} = \frac{30}{\tau} \text{ МДж/м}^3, \quad (9)$$

где τ – время нагружения образца, которое предположительно будет равно 1 сек.

В результате решения уравнения (4) и (9), применительно к металлоконструкции грузоподъемного крана, изготовленной из стали 20, получаем зависимости динамики нагрева вблизи вершины трещины от времени нагружения (рисунок 2) и изменение радиуса нагретой области от времени нагружения (рисунок 3).

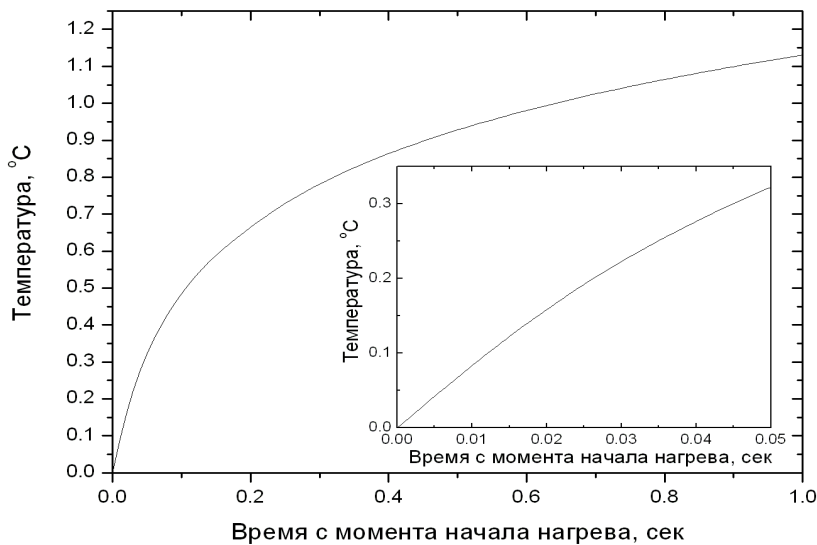


Рисунок 2 – Динамика нагрева поверхности металла вблизи вершины трещины. На вставке более подробно изображен начальный участок нагрева. (Решение уравнения (4) в точках $(x=0, y=0, z=0)$)

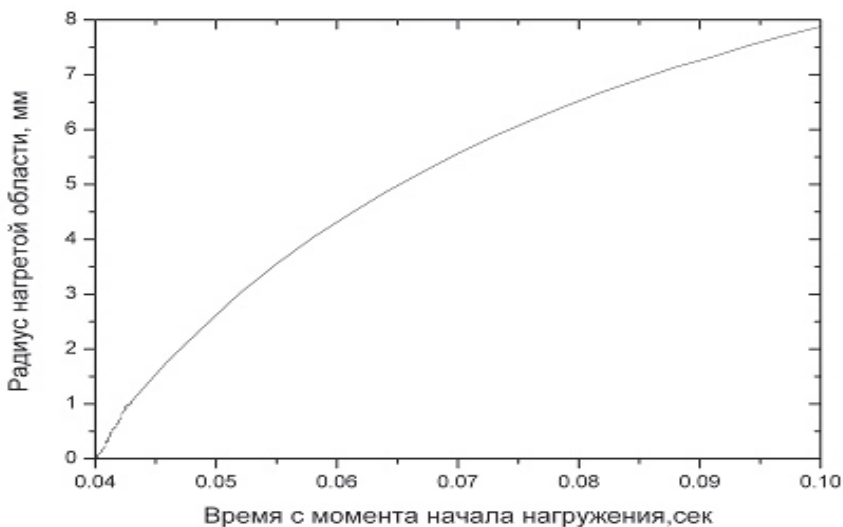


Рисунок 3 – Изменение радиуса нагретой области от времени нагружения

Из полученных зависимостей видно, что при нагружении металлоконструкции с циклом в 1 секунду в зоне пластической деформации образуется тепловое поле с радиусом 8 мм и максимальным перепадом температуры в 1.1°C.

За счет оттока тепла от вершины трещины увеличивается область на поверхности образца, в которой имеется возмущение температурного поля. Таким образом, через некоторое время после начала нагрева, температура повышается даже в тех областях, где тепловыделение отсутствует. Это утверждение продемонстрировано на рисунке 4, где показана динамика уширения профиля температуры.

Необходимо отметить, что максимальная температура, достигаемая за время нагрева, также существенно зависит от размера области тепловыделения: чем больше область, тем медленнее уширяется температурный профиль, а, следовательно,

до больше температуры нагревается дефектная область.

Это утверждение иллюстрируется на рисунке 5, где показана зависимость максимальной температуры в центре области тепловыделения от радиуса области. На графике видно линейная зависимость максимальной температуры в центре области от радиуса этой области при малых значениях радиуса. При значении радиуса больше 1 см возрастание температуры прекращается, что связано с ограничением максимально достигаемой температуры величиной энергии, выделившейся в результате пластической деформации ($A \approx \sigma_{02} \varepsilon = 30$ мДж).

Необходимо отметить, что радиус области порядка 1 см соответствует не трещиноподобному дефекту, а крупномасштабным концентраторам напряжений типа сварных швов и т.д.

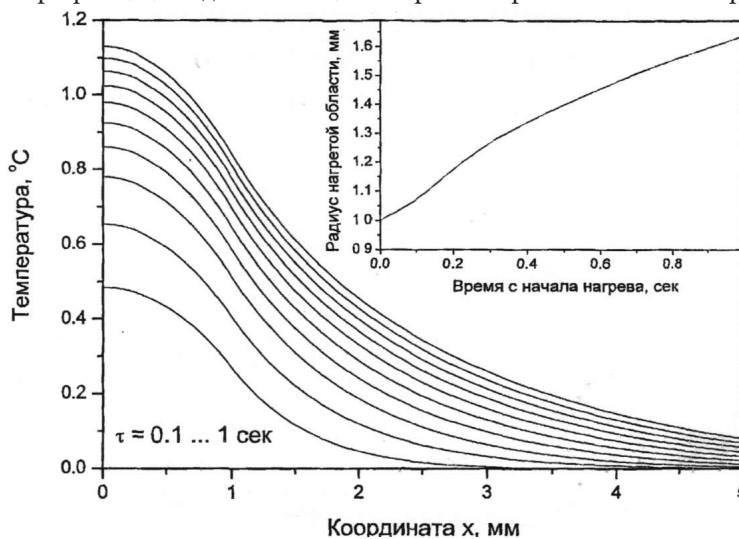


Рисунок 4 – Профиль температуры $T(t, x, y = 0, z = 0)$, построенный для различных моментов времени $t = 0.1, 0.2 \dots 1$ сек

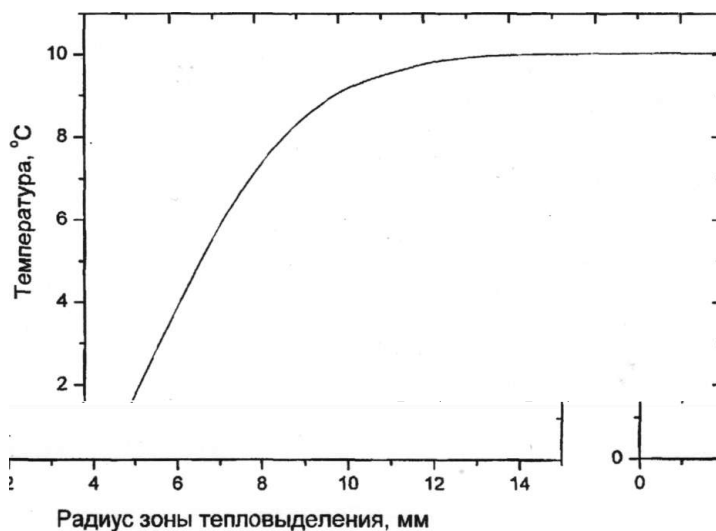


Рисунок 5 – Зависимость максимальной температуры в центре области тепловыделения от радиуса области (величина $\sigma_{02} \varepsilon$ время нагрева $\tau = 1$ сек при этом остается постоянной)

Обобщая полученные результаты, можно сказать, что на динамику нагрева металла вблизи дефекта существенное оказывает процесс оттока тепла в бездефектную область конструкции, благодаря чему существенно уменьшается скорость нагрева. Тем не менее, при типичных значениях теплофизических и механических характеристик материала конструкции температура в области дефекта достигает величины, порядка 1°C, что позволяет вполне достоверно зарегистрировать дефект.

Список литературы

1. *Матвиенко Ю. Г.* Модели и критерии механики разрушений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 145 с.
2. *Тепловой неразрушающий контроль изделий / Под ред. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др.* – М.: Наука, 2002. – 472 с.
3. *Котельников В. В.* Разработка методики теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов: Автореф. ... дис. к-та тех. наук. – М., 2009. – 18 с.