

Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования

Fundamentals of thermal control bearing structures using the deformation of heat

Мойсейчик А.Е., Мойсейчик Е.А.

Moiseichik A.E., Moiseichik E.A.

В статье изложены аналитические модели деформационного теплообразования в твердых телах, элементах конструкций при работе материала в упругой, упруго-пластической стадиях, зарождении и развитии разрушения. На примере крупноразмерных образцов и натуральных стальных конструкций показано, что развивающиеся при этом полосы скольжения служат как основными источниками теплообразования в нагруженных усилиями элементах конструкций, так и определяют дальнейшее зарождение и развитие разрушения в конструктивных формах. Показано, что процесс деформационного теплообразования позволяет выявлять дефекты конструкций на всех стадиях их жизни, и названы основные этапы технологии такого теплового контроля несущих конструкций. Выявлены причины, вследствие которых высокоэффективные методы неразрушающего контроля работоспособности несущих стальных и других конструкций практически не применяются на объектах повышенной опасности Беларуси, и показаны пути устранения такого отставания.

The article describes the analytical model of the deformation of heat in solids, structural elements at work in an elastic material, the elastic-plastic stage, the origin and development of destruction. On an example of large-scale and full-scale models of steel structures shown that developing with slip bands serve as the main sources of heat in the effort loaded structural elements, and further define the origin and development of fracture in a constructive manner. It is shown that the process of heat strain can detect defects in design at all stages of their lives, and called the main stages of the thermal control technology support structures. The reasons due to which highly effective methods of non-destructive testing performance bearing steel and other structures are not practically used at high risk of Belarus and the ways to eliminate the backlog.

Введение

Экспериментально установлено [1-14], что при деформировании элементов стальных изделий происходит изменение температуры деформируемого материала. Такое изменение температуры для ста-

тически деформируемых объемов образцов из различных марок стали протекает в соответствии со схемой рисунка 1.

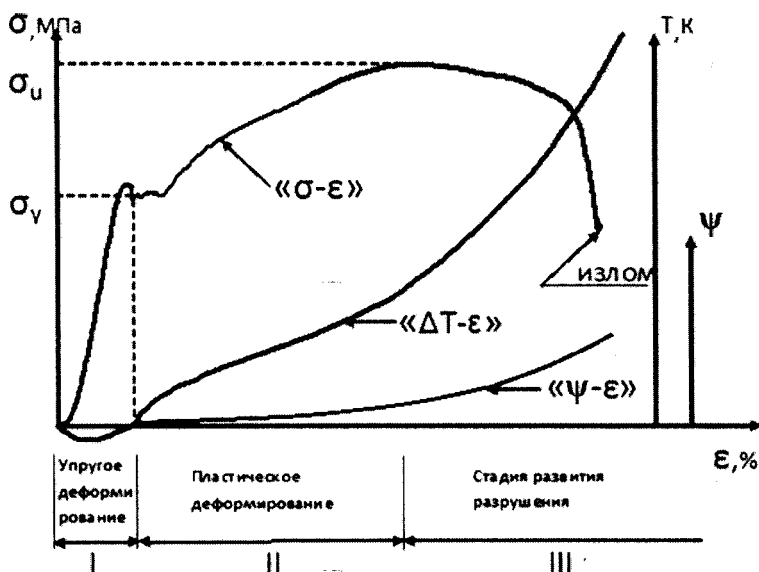


Рис. 1. Схема изменения средней температуры поверхности (ΔT) и повреждаемости (ψ) стали при одноосном деформировании на величину ϵ

Процесс изменения температуры деформируемых зон материала можно разделить на три стадии: на первой стадии при упругой работе металла происходит понижение его температуры (примерно до градуса при больших объемах деформируемого материала); для второй стадии характерно значительное повышение температуры (средняя температура рабочей зоны повышается на несколько десятков градусов); на последней стадии происходит резкий подъем температуры материала в окрестности излома и последующее его охлаждение. При ударном деформировании температура материала на третьей стадии может повышаться на сотни градусов [5, 6, 8]. Такой ход изменения температуры деформируемых объемов материала предопределяется физико-химическими процессами, инициируемыми в твердом теле его деформированием [15], изменением его структуры и повреждаемости (ψ) в процессе нагружения. Процесс образования тепла в деформированных объемах материала в результате физико-химических процессов, инициированных деформацией этих объемов, можно определить термином «деформационное теплообразование», которое, являясь «естественным проявителем» происходящих внутри сплавов физико-химических и механических изменений, позволяет получить важную информацию о природе теплообразования в нагруженных конструктивных элементах стальных и других изделий; уточнить

знания о расчетных моделях тепловых эффектов и их связи с механикой разрушения элементов конструкций; разработать основы пассивного теплового неразрушающего контроля элементов конструкций на основе компьютерной термографии. Целью настоящей статьи является рассмотрение существующих моделей деформационного теплообразования в материалах при силовых воздействиях, сопоставление их с данными экспериментов и разработка методологических основ пассивного теплового неразрушающего контроля элементов конструкций.

1. Модели теплообразования при деформировании материалов

1.1. Термоупругий эффект

Из законов термодинамики [16] следует зависимость между энтропией, температурой и энергией в виде:

$$dS = \frac{1}{T} \frac{\partial u}{\partial T} dT - \sum^{i,j} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} d\varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где: S – энтропия; U – энергия; T – абсолютная температура; σ_{ij} – компонента тензора напряжений; ε_{ij} – компонента тензора деформаций; $i, j = 1, 2, 3$.

Зависимость между компонентами тензоров напряжений и деформаций можно представить в виде:

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (2)$$

$$E = 2G(1 + \mu), \quad (3)$$

где: G – модуль сдвига, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, α – коэффициент теплового расширения, δ_{ij} – символ Кронекера $\delta_{ij} = \{ \{ 1(i = j) | 0(i \neq j) \} \}$.

Учитывая, что $\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{\partial Q}{\partial T} = C_\varepsilon \rho$, представим выражение (1) с учетом (2) и (3) в виде:

$$dS = C_\varepsilon \rho \frac{dT}{T} - \frac{E}{1-2\mu} (d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3), \quad (4)$$

где: C_ε – теплоемкость при постоянном напряжении, ρ – плотность материала.

Интегрируя выражение (4), получим:

$$S = C_\varepsilon \rho \log \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right) + \frac{E}{1-2\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3). \quad (5)$$

В выражении (5) ΔT – разность температур, соответствующая первому инварианту тензора деформации $I_{\varepsilon_1} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$. Для небольших изменений ΔT имеем:

$$S = C_\varepsilon \rho \frac{\Delta T}{T} + \frac{E}{1-2\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3). \quad (6)$$

Умножая обе части выражения (6) на T , получим для фиксированной величины первого инварианта тензора напряжений $I_{\sigma_1} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$:

$$Q = H = TS = C_\varepsilon \rho \Delta T + \frac{ET}{1-2\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3), \quad (7)$$

где: Q – тепло; H – свободная энергия Гельмгольца; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в рассматриваемой точке.

$$C_p - C_\varepsilon = \frac{3E\alpha^2 T}{\rho(1-2\mu)}. \quad (8)$$

Из (2), (3), (7), (8) следует:

$$Q = C_p \rho \Delta T + T\alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (9)$$

При адиабатических условиях $Q = 0$. Тогда из правой части выражения (9) следует:

$$\Delta T = -\frac{T\alpha}{C_p \rho} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (10)$$

Выражение (10) можно представить в виде:

$$\Delta T = -KT(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (11)$$

где: $K = \frac{\alpha}{c_p \rho}$ – константа материала в температурном диапазоне ΔT .

Согласно формуле (11), впервые опубликованной В. Томсоном [17], между мгновенными изменениями температуры упруго деформируемого тела и напряжениями существует линейная зависимость. Так, при упругом одноосном растяжении стального образца (стадия I) будет происходить понижение температуры деформируемого объема, а при упругом сжатии – повышение.

1.2. Термопластический эффект

При упруго-пластическом и пластическом деформировании тела (стадии II, III) происходит нагрев тела. Если в некоторой точке $M(x, y, z)$ непрерывного и неоднородного тела функционирует деформационный источник тепла, выделяющий за время dt в единице объема количество тепла qdt , то изменение температуры тела будет определяться уравнением теплопроводности [18]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (12)$$

Уравнение (12) для одномерных процессов в деформируемой среде с постоянным коэффициентом теплопроводности λ имеет вид [19]:

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \xi^2}, \quad (13)$$

где ξ – абсцисса выделенной точки $M(x, y, z)$ в системе координат, связанной с движущейся средой. Необходимость введения координаты ξ вызвана сложным механизмом пластического движения среды при деформировании [19]. При этом на поверхности пластически деформируемого тела появляется своеобразный рисунок, образованный полосами различного направления. Впервые такие полосы были описаны Людерсом [7, 20, 21] и названы его именем (в русскоязычной литературе – линии Чернова - Людерса). Дальнейшими исследованиями было установлено, что полосы Людерса совпадают с линиями скольжения в пластически деформированном теле, вдоль которых отсутствуют деформации растяжения или сжатия [19]. Основные физико-химические процессы в твердом теле протекают в объеме пластически деформированного материала, расположенного вдоль полос

скольжения. В полосах скольжения при дальнейшем деформировании образуются свободные поверхности и по ним развивается излом как в образцах [21], так и в натуральных конструкциях [23]. Взаимосвязь полос скольжения и траектории излома в двутавровых профилях иллюстрирует рисунок 2.

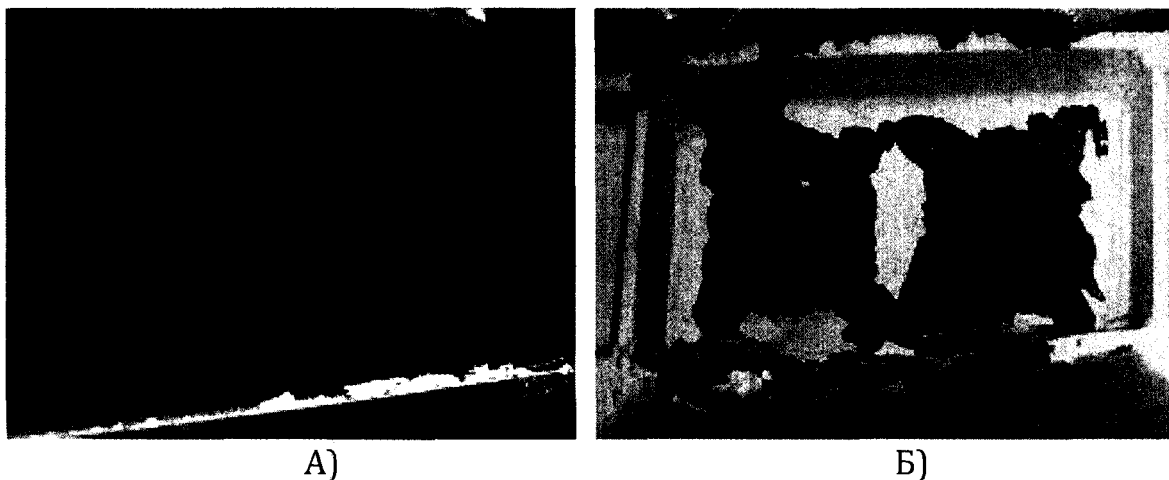


Рис. 2. Полосы скольжения в стенке двутавра каркаса многоэтажного здания (А) и вид полос скольжения и траектории излома в энергопоглотителе сдвигового типа после сейсмических воздействий (Б) [23]

Линии скольжения являются линиями разрыва скоростей плоского течения металла в изделиях [19]. Между координатами ξ и x имеет место соотношение [19]:

$$x = x_0 + \xi - v\tau, \quad (14)$$

где v – скорость перемещения металла через линию разрыва скоростей; x_0 – абсцисса начальной точки подвижной системы координат в момент времени $\tau=0$.

С учетом соотношения (14) уравнение (13) приводится к виду [19]:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{v}{a} \frac{dT}{dx} = 0, \quad (15)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности материала.

Решение уравнения (15) при заданных граничных условиях имеет вид [19]:

$$T = (T_c - T_0) \exp\left(-\frac{v}{a}x\right) + T_0, \quad (16)$$

где T_0 – начальная температура материала; T_c – температура на линии разрыва скоростей, которая может достигать несколько сотен градусов [5, 6, 8].

Так как нагретый до температуры T пластически деформированный слой материала толщиной h_v (рис. 3) вдоль линий скольжения в деформированном теле соседствует с полосами упругодеформированного более холодного материала толщиной b_v ($b_v \gg h_v$), то средняя температура материала T_m будет зависеть от теплопроводности материала и определяться соотношением:

$$T_c \gg T_m > T_0. \quad (17)$$

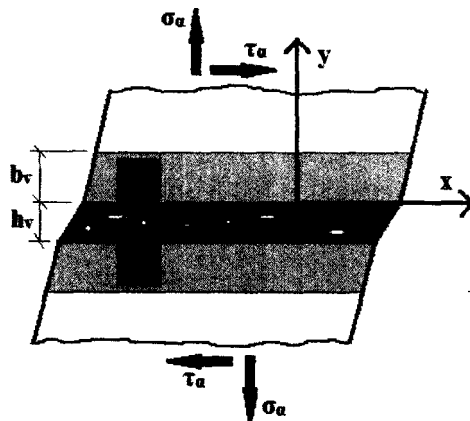


Рис. 3. Схема нагрева материала в окрестности полосы сдвига

1.3. Температура пластины при наличии конвективного охлаждения

На примере длинной пластины толщиной 2δ , находящейся в среде с температурой T_c , рассмотрим по аналогии с [22] взаимозависимость между температурой в срединной плоскости пластины T_0 , температурой на поверхности пластины T_n , и ее толщиной 2δ (рис. 4А).

Допустим, что внутренние деформационные тепловые источники распределены равномерно по объему пластины и имеют удельную мощность q_v . При этих условиях отвод образующегося деформационного тепла происходит за счет теплообмена со средой вдоль оси x (рисунок 4). Примем, что коэффициенты теплоотдачи поверхности (α) для каждой поверхности и теплопроводности материала пластины (λ)

постоянны в рассматриваемом интервале температур. Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (18)$$

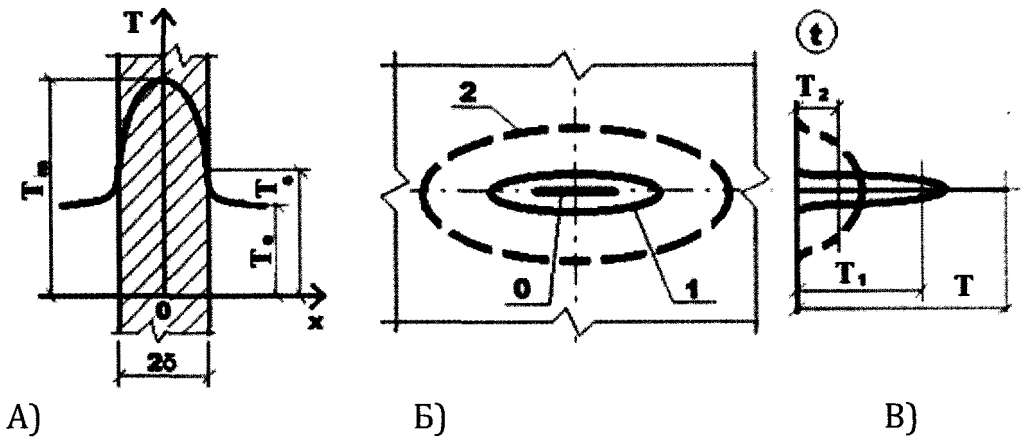


Рис. 4. Изменение температуры по толщине бесконечной пластины с внутренними источниками теплоты (А), схема нагрева пластины плоским деформационным источником (Б) и эпюра распределения температур (В)

Граничные условия для половины пластины δ примут вид:

$$x = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0; \quad (19)$$

$$x = \delta; -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\delta} = \alpha(T_{\text{п}} - T_c). \quad (20)$$

Интегрируя (18), получаем решение в виде:

$$T = -\frac{q_v}{2\lambda} x^2 + C_1 x + C_2, \quad (21)$$

где из условия (19) $C_1 = 0$, а из условия (19) и первого интеграла выражения (18) имеем: $\frac{\lambda \cdot q_v \cdot \delta}{\lambda} = \alpha(T_{\text{п}} - T_c)$, откуда

$$T_{\text{п}} = T_c + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha}. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21) получаем при $x = \delta$:

$$C_2 = T_c + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} \delta^2. \quad (23)$$

С учетом (22) и (23) выражение (21) представляется в виде:

$$T = T_c + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} \delta^2 \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (24)$$

Из (24) следует, что температура в стенке изменяется по параболе, достигая максимального значения при $x = 0$, а наименьшего - при $x = \pm \delta$.

Разность температур между произвольной точкой сечения и серединой пластины ΔT составляет:

$$\Delta T_x = T - T_c = \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} \delta^2 \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (25)$$

Максимальная разность температур середины и поверхности пластины равна:

$$\Delta T = \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} \delta^2. \quad (26)$$

Из (24, 25) следует, что ΔT зависит от мощности внутренних равномерно распределенных по объему тепловых источников (q_v), коэффициента теплоотдачи поверхности (α), коэффициента теплопроводности (λ) и толщины пластины (δ). В климатическом диапазоне изменения температуры (-80°C - +40°C) $\lambda = \lambda(1 + b\Delta T)$, т.е. с понижением температуры λ уменьшается, также снижается и α (вследствие образования пленки, инея на поверхности). Таким образом, при деформировании пластины при отрицательных температурах ΔT_x будет больше, чем деформировании при положительных температурах. Данные по термографии стальных пластин толщиной 1,5-3,0мм дают ориентировочную величину $q_v = 32000 \text{ Вт/М}^3$, для стальных пластин толщиной 12-18мм - $q_v = 120000 \text{ Вт/М}^3$. По формуле (26) для малоуглеродистой стали получаем в первом приближении для стальных пластин толщиной 3мм и 18мм соответственно $\Delta t = 4^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 90^\circ\text{C}$. Это повышение температуры фиксируется термографом на протяжении

примерно секунды и менее и на небольшой площади поверхности образца в зоне скольжения. На меньших участках и при более коротких промежутках времени возможен всплеск Δt на большую величину. Это подтверждается следующим. Допустим, в пластину толщиной 2δ плоским источником внесено количество тепла Q в некоторый начальный момент времени t_0 . В момент t_1 это количество тепла распространилось на объем V_1 , а в момент времени t_2 – на объем V_2 . Считая, что объемы V_1 и V_2 равны объемам цилиндров высотой 2δ и площадями оснований F_1 и F_2 , ограниченных соответственно кривыми 1 и 2 (рисунок 4Б, В) и, допуская, что пластина теплоизолирована по боковым поверхностям и тепло распространяется только в плоскости пластины, получим: $Q = c \cdot m_1 \cdot T_1 = c \cdot m_2 \cdot T_2$. Из этого условия следует, что $\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{F_2}{F_1}$ и средняя температура источника $T_0 \gg T_1$.

2. Пример термографии модели стального энергопоглотителя сдвигового типа

В этом случае реализуется превращение механической энергии сейсмических колебаний зданий и сооружений в тепловую в энергопоглотителях, например, сдвигового типа. Предельное состояние при работе пластинки в энергопоглотителе сдвигового типа происходит посредством излома пластинки по направлению линии Людерса.

В процессе экспериментальных исследований производилось нагружение ряда моделей из малоуглеродистой стали растягивающим усилием до разрушения на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение». Стенка модели имела размеры 100x100x10мм. Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов в испытательной машине Р-100 отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

Изменение температуры поверхности сдвигаемых стенок без конструктивных дефектов таких образцов при нагружении показано на кадрах рисунка 5. Подобным образом происходило теплообразование и в натурном энергопоглотителе многоэтажного здания, показанном на рисунке 2. На начальной стадии нагружения (упругая работа стали) температура поверхности близка к равномерной. В окрестности нагруженных сдвигающими усилиями кромок температура несколько ниже, чем в середине пластины. Это является результатом повышенного отвода теплоты в более холодные окаймляющие пла-

стины. При дальнейшем деформировании диагональ в направлении растягивающей силы увеличивается, а диагональ в перпендикулярном направлении уменьшается.

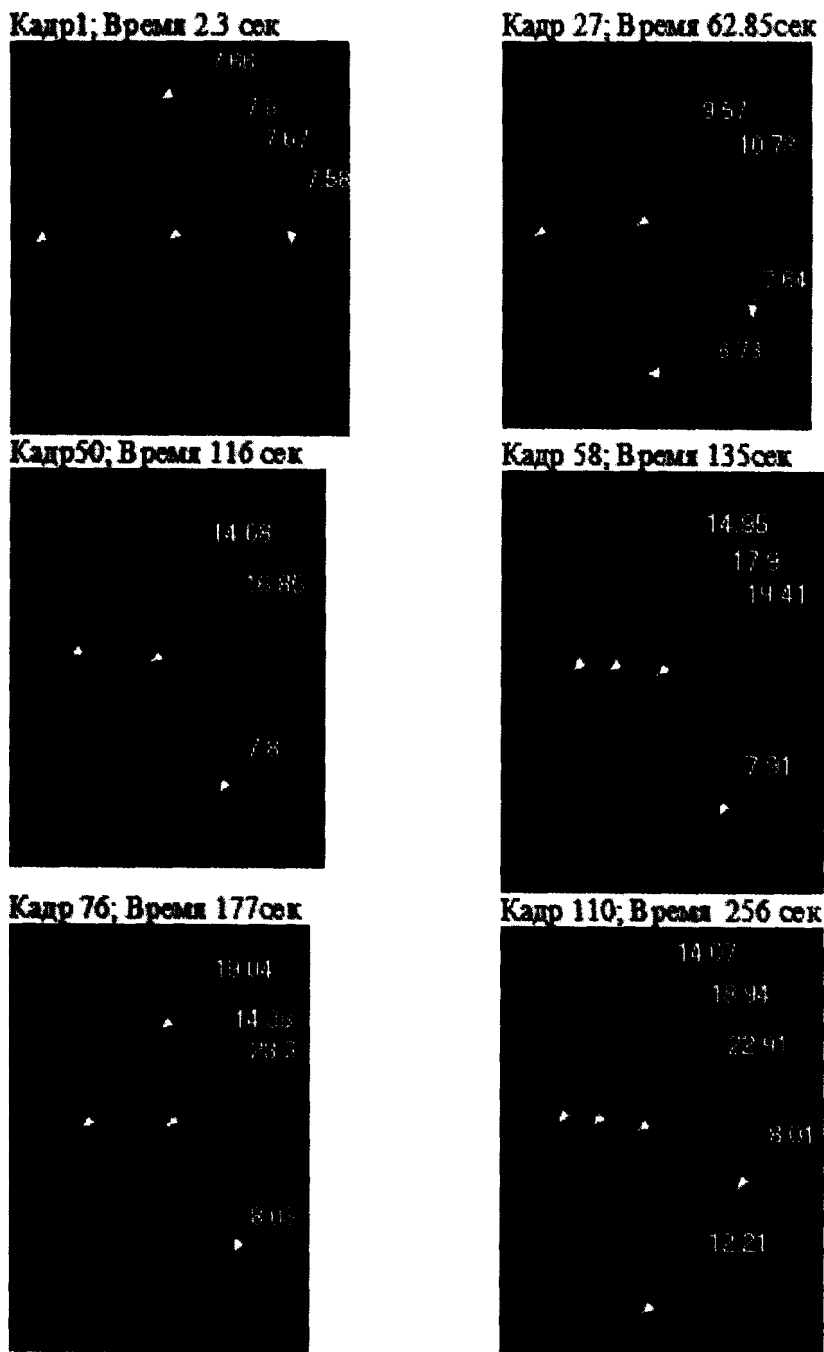


Рис. 5. Кадры термофильма деформационного нагрева образца без конструктивно-технологических дефектов в стенке

Возникающие из-за сжатия в направлении, перпендикулярном к оси действия нагружающего усилия, изгибные напряжения вызывают дополнительное охлаждение в растянутых кромках и нагрев – в сжатых. При потере устойчивости пластины в гребне основной волны образуется растяжение на выпуклой стороне и сжатие на вогнутой стороне при пластической стадии работы материала. Было зафиксировано значительное повышение температуры в средней части пластины, в области образования волн с растянутыми кромками. При дальнейшем нагружении выпуклая зона в гребне волны более интенсивно охлаждается и происходит небольшое понижение температуры. Конструктивно-технологические дефекты (отверстия, вырезы в стенке энергопоглотителя) в сдвигаемых элементах конструкций приводят к локализации деформаций, в зоне которых средняя температура поверхности стали при деформировании может повышаться на несколько десятков градусов и предопределять зарождение и развитие очагов разрушения в пластине, нагруженной сдвигающими усилиями. На начальной стадии нагружения (упругая работа стали) температура поверхности стенки без конструктивно-технологических дефектов близка к равномерной. В окрестности нагруженных сдвигающими усилиями кромок температура несколько ниже, чем в середине пластины. При дальнейшем деформировании возникающие изгибные напряжения вызывают дополнительное охлаждение в растянутых кромках и нагрев – в сжатых. При наличии дефектов в стенке сдвигаемой пластины их расположение и форма предопределяют процессы зарождения и развития разрушения и связанное с ними деформационное теплообразование. При одиночном отверстии в центре пластины нагрев в окрестности отверстия происходит при появлении и развитии пластических деформаций в средней части пластины и превращении круглого отверстия в овальное. Зона предразрушения возникает на расстоянии нескольких миллиметров от кромки отверстия и там же локально повышается температуры поверхности. Этому моменту соответствует наибольшая величина растягивающей силы. Для пластины с двумя боковыми вырезами заметно небольшое деформационное охлаждение стали у устья надреза при упругой работе и значительное локальное повышение температуры, которое с зарождением трещины в этой зоне превышает температуру поверхности примыкающих участков более, чем в 2 раза (до 47,11°C и более). Надрезы в окаймляющих полках вносят искажение в распределение температуры по поверхности упруго работающей стенки и вызывают локаль-

ный деформационный нагрев и приводят к снижению жесткости стенки и величины деформирующей образец силы.

3. Основные этапы пассивного теплового неразрушающего контроля с использованием деформационного теплообразования

Такой метод успешно реализован для контроля теплозащитных функций ограждающих конструкций зданий и сооружений, выявления дефектных участков, нагрев которых происходит за счет энергии горячих процессов, электрического тока, энергии трения, колебательных движений [24]. Лишь в единичных случаях этот метод применялся для контроля работоспособности конструкций, выявления дефектных зон, при контроле зарождения и развитии разрушения элементов конструкций. Так, в работе [25] пытались разработать методику пассивного теплового контроля для выявления дефектных зон несущих стальных конструкций мостовых кранов. При этом использовалась панорамная съемка конструкции моста крана термографом «ИРТИС-2000» и в итоге получен трудно различимый сигнал на уровне чувствительности прибора. В работе [26] термографом той же модели удалось выявить не только изменение температуры элементов упруго нагруженной подкрановой балки, но и визуализировать границы остаточных сварочных напряжений в стальной конструкции. Во втором случае повышение контрастности теплового сигнала получили за счет небольшой накачки механической энергии в балке и фокусирования термографа на дефектной зоне.

В связи с изложенным сформулируем основные методологические положения, соблюдение которых необходимо для получения контрастного теплового сигнала с использованием деформационного тепла и достоверного выявления дефектных зон в составе стальной конструкции. Как правило, дефектные участки стальных конструкций, нагруженных собственным весом, эксплуатационной нагрузкой, находятся в тепловом взаимодействии с прилегающими участками более холодного металла и омывающей воздушной средой. Возникающий при этом кондуктивный и конвективный теплообмен ведет к выравниванию температур смежных участков металла.

В таких условиях контрастный тепловой сигнал можно получить при выполнении следующих условий.

1. Предварительно необходимо выявить места расположения конструктивно-технологических дефектов в исследуемой стальной конструкции. Это производится или на основании предварительного

упруго-пластического расчета конструкции, или на основании использования аналогов, опыта исследования конструкций. При этом целесообразно определить величину нагрузки, при которой появляются пластические деформации в концентраторах (дефектах).

2. Исследуемую конструкцию необходимо нагрузить усилиями, величина которых должна быть не выше 50–80% от предельно допустимых. Более достоверные результаты термографирования будут при 2-х, 3-х кратном последовательном приложении нагрузки (накачка конструкции энергией).

3. Инфракрасное компьютерное термографирование следует производить в процессе нагружения с 2-хкратным дублированием. Методика съемки должна учитывать технические характеристики используемого компьютерного термографа. Как правило, при выявлении дефектов в стальных конструкциях панорамную съемку не следует применять. Расстояние от объектива термографа до исследуемой поверхности необходимо принимать в пределах 0,5-2м. Съемку следует вести в условиях минимального инфракрасного излучения среды, внешних тел. Требования к термографируемой поверхности минимальные (хорошая видимость, эксплуатационное покрытие поверхности (слой краски, окалины, равномерный слой пыли можно не снимать, удалить только набрызги грязи, бетона и т.п. неоднородности).

Пассивный тепловой метод в Беларуси широко применяется для контроля теплопотерь зданий и сооружений. Для контроля работоспособности несущих конструкций, выявления дефектов, участков зарождения разрушения конструкций, т.е. для предотвращения аварий и чрезвычайных ситуаций, на белорусских производствах с повышенной опасностью этот метод практически не применяется. Объяснить это можно как отсутствием необходимой нормативно-правовой базы в республике, так и неподготовленностью персонала. Как следует из приведенного выше краткого анализа моделей теплообразования в твердых деформируемых телах, для успешного применения тепловых методов неразрушающего контроля машиностроительных, строительных, нефтехимических и других металлических конструкций персонал должен обладать достаточными знаниями и умениями как в области теплофизики твердого тела, так и механики конструкций. Методом пассивного теплового неразрушающего контроля с использованием деформационного теплообразования по изложенной выше методологии можно надежно контролировать состояние стальных конструкций, работающих в составе объектов повышенной опасности

(резервуары, газгольдеры, трубопроводы, грузоподъемные машины и механизмы, пролетные конструкции стальных мостов и других конструктивных систем). Эти конструкции имеют свои особенности, которые должны учитываться при разработке технологических документов неразрушающего теплового контроля. Из сказанного следует, что внедрению тепловых методов контроля будет способствовать комплексная работа по направлениям, показанным на рисунке 6.



Рис. 6. Приоритетные направления разработки обеспечений тепловых методов неразрушающего контроля

В первую очередь необходимы усилия по разработке нормативно-технической базы теплового неразрушающего контроля. В энергетике, нефтехимии, железнодорожном транспорте нет руководящих документов с изложением регламентирующих требований по технологии проведения пассивного теплового контроля. Такая документация отсутствует и в департаменте по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госпромнадзор). Для сравнения следует указать, что в аналогичных ведомствах Российской Федерации имеется более развитая нормативная база, регламентирующая применение тепловых неразрушающих методов на объектах повышенной опасности (РД-13-04-2006, РД-153-34.0-20.363-99, РД-153-34.0-20.364-00, МДС 23-1.2007, ФР.1.32.2006.026657, ПГЭ 2.3.5.-2012/3 и другие).

Выводы

1. Рассмотрены основные модели деформационного теплообразования твердых тел и показана эффективность применения пассивных тепловых методов для контроля работоспособности натуральных конструкций.

2. Сформулированы основные требования к технологии такого контроля.

3. Выявлены недостатки и намечены пути внедрения тепловых методов контроля работоспособности несущих конструкций на объектах повышенной опасности Беларуси.

Литература

1. Weber, W. Über die spezifische Wärme fester Körper, insbesondere der Metalle. - Annalen der Physik und Chemie.-1830.-Zweite Serie 20.- S. 177-213.
2. Hort, H. Die Wärm Vorgänge beim Recken von Metallen.-Mitt. Forschungsarbeit. Ing. Wes.-1907.-Н. 41.- S. 1-53.
3. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Белл Ф.Дж. В 2-х частях. Часть I. Малые деформации: Пер. с англ./ Под ред. А.П. Филина.- М.: Наука, 1984.-600 с.
4. Дружинин, С.И. Теория сопротивления материалов.-Л.: Кубуч, 1930.-478 с.
5. Нескучаев, В.Д. О нагреве тел при неупругом ударе/В.Д. Нескучаев, Д.А. Штанько //Журнал технической физики.-Т. 5.-Вып. 2.-1935.-С. 374-384.
6. Растегаев, М.В. О гипотезе фазовых превращений, наблюдаемых в полоске Кравз-Тарнавского/ М.В. Растегаев// Металловедение и термическая обработка металлов.-1959.-№7.-С. 19-23.
7. Надаи, А Пластичность и разрушение твердых тел. Том. 2.-М.: Мир, 1969.-863 с.
8. Яловой, Н.И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением/ Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин, Д.И. Васильев.-М.: Высшая школа, 1973.- 631 с.
9. Stärk, K.F. Thermometrische Untersuchungen zum zyklischen Vervormungs verhalten metalischer Werkstoffe.-Diss. zur Erlangung der Würde Dr.-Ing.-Stuttgart Univ.- 1980.-S. 175.
10. Harig, H., Middeldorf, K. Thermometrische Methoden bei der mechanischen Werkstoffprüfung. - Werkstoffprüfung, 1984, s. 441-451.
11. Реморов, В.Е. Научно-методические основы исследования трещиностойкости металла по тепловому эффекту пластической деформации в зоне разрушения: автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук:01.02.06 / В.Е. Реморов. - Новокузнецк, 1998. - 41 с.
12. Horvath, L. Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau typischen Bauteile mit Thermovision. Dissertation zu Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs.-Cottbus: BTU.-2002.-84 s.

13. Лукин, Е.С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. -Якутск: ИФТПС РАН, 2005г.-23 с.
14. Токтогулова, Д.А. Тепловые эффекты на различных стадиях пластического течения поликристаллических металлов и сплавов (Fe,Ni, 14X18N10T,03X20H45M4BЧ), облученных нейтронами: Автореферат дисс. канд. физ.-мат. наук.– Алматы, 2009.-17 с.
15. Мойсейчик, Е.А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом/ Е.А. Мойсейчик // Прикладная механика и техническая физика. – 2013.-№1.- С. 134-142.
16. Базаров, И.П. Термодинамика.- М.: Высшая школа, 1991.-376 с.
17. Thomson, W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter.- Quart. J. of Math.-1857.-1.-P. 57-77.
18. Карслоу, Г.С. Теория теплопроводности.-М.-Л.:ОГИЗ, 1947.-288 с.
19. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов.-М.-Металлургия, 1972.-408 с.
20. Lüders, W., 1860. " Über die Äusserung der elasticität an stahlartigen Eisenstäben und Stahlstäben, und über eine beim Biegen solcher Stäbe beobachtete Molecularbewegung// "Dingler's Polytech., 1860, VIII, J. 155.- S. 18-22.
21. Nadai, A. Der Bildsame Zustand der Werkstoffe.-Berlin: Verlag von J. Springer, 1927.- 171 s.
22. Михеев, М.А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И.М. Михеева. Изд. 2-е.- М.: Энергия.- 1977. -344 с.
23. Cardiner, S., Clifton, G.C., MacRae, G.A. Perfomance, Damage Assessment and Repair of a Multistorey Eccentrically Braced Framed Building Following the Christchurch Earthquake Series// Steel Innovations Conference 2013, Christchurch, New Zealand, 21-22 February 2013.-16 p. - <http://www.scnz.org/content/steel-innovations-papers/PERFORMANCE>
24. Будадин, О.Н. Тепловой контроль/О.Н. Будадин, В.П. Вавилов, Е.В. Абрамова.-М.: ИД Спектр, 2011.-230 с.
25. Котельников, В.В. Разработка методики теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов.- Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к. т. н.-М.:МВТУ.-2009.- 18 с.
26. Мойсейчик, Е.А. Выявление опасных зон в стальных подкрановых балках по изменению деформационного температурного поля/ Е.А. Мойсейчик // Вестник гражданских инженеров, 6(41), 2013.-С.28-34.

Статья поступила в редакцию 05.09.14