

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И КОНТРОЛЬ РАЗРУШЕНИЯ
В СТАЛЬНЫХ РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОМ МЕТОДОМ**

*д-р техн. наук, доц. Е.А. МОЙСЕЙЧИК¹, канд. техн. наук А.Е. МОЙСЕЙЧИК²,
А.А. ЯКОВЛЕВ¹*

¹(Белорусский национальный технический университет, Минск)

²(ЗАО «Струнные технологии», Минск)

Рассматриваются особенности образования тепла, основные возможности и области эффективного применения пассивного метода теплового неразрушающего контроля стальных элементов и изделий. Сформулированы основные требования к аппаратуре пассивного теплового контроля. Излагается механизм теплообразования в стали и обоснована структура формулы изменения ее температуры при деформировании. Показано, что диагностирование стальных элементов в пассивном режиме должно производиться при функционировании в них тепловых источников, возникающих в результате силовых воздействий на конструкции. Рассматриваются особенности определения напряженного состояния в стальных элементах пассивным тепловым методом. Отмечено, что пассивный метод теплового неразрушающего контроля стальных конструкций, нагружаемых непрерывно возрастающими или убывающими во времени силами, под действием которых в потенциально опасных зонах элементов функционируют внутренние деформационные источники тепла и поверхностные температурные поля, позволяет по кинетике и аномалиям температурных полей осуществлять контроль работоспособности в упругой, упругоэластической стадиях работы стали, зарождения и развития разрушения. Мощность тепловых деформационных источников, места их возникновения и кинетика развития зависят от условий силового нагружения, внешних температурных воздействий, материала и конструктивной формы элементов.

Ключевые слова: *стальные элементы, деформационное теплообразование, температура поверхности, пассивный тепловой контроль, техническое диагностирование.*

Введение. Надежное функционирование современных технических систем, устройств и технологий обеспечивается работоспособностью инженерных сооружений, машин и механизмов, ответственные элементы которых выполняются из конструкционной стали. В стальных конструктивно-технологических формах в процессе изготовления и эксплуатации возникают дефекты, поля напряжений и деформаций. При работе несущих элементов в их опасных зонах, слабых звеньях достигаются предельные состояния, превышение которых приводит к трещинообразованию в материале элементов, их возможному разрушению и возникновению аварийной ситуации. Опасные зоны конструкций и характерные параметры стали в предельном состоянии ответственных растянутых стальных элементов должны находиться под периодическим или непрерывным неразрушающим контролем. Существующие методы неразрушающего контроля часто нельзя применить из-за непригодности конструктивных форм к проведению контроля, неопределенности расположения опасных зон, отсутствия прямой зависимости между измеряемым физическим параметром и расчетной характеристикой работоспособности, незнания фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в контролируемых зонах, недостоверного выбора вспомогательного, определяющего и аварийного параметров контроля.

До недавнего времени тепловая энергия пластических деформаций не рассматривалась в качестве предвестника предельного состояния и разрушения в элементах из-за недостаточной изученности закономерностей теплообразования при деформировании стали на опасных участках элементов, узлов, соединений. Сегодня тепловые пассивные методы применяются для первичной диагностики стальных несущих элементов, контроля напряженного и деформированного состояний [1], выявления зон пластических деформаций в нагруженных образцах, зарождения и развития в них трещин^{1; 2; 3}. Тепловой пассивный контроль применяется при определении остаточного ресурса конструкций⁴. Имеются примеры его использования в технологии изготовления стальных изделий^{3; 4}

¹ Базалесв М.І. Розробка фізико-технологічних основ термографічного контролю і моніторингу стану матеріалів для оцінки ресурсу устаткування і споруджень ядерної енергетики методами інфрачервоної радіометрії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.07 / Ін-т електрофізики і радіаційних технологій НАНУ. – Харків, 2015. – 36 с.

² Galietti U., Palumbo D. Application of thermal methods for characterization of steel welded joints [Electronic resource] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography / Québec, Canada (July 2–30, 2010). – URL: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf> (дата обращения: 25.08.2018).

³ Nobuaki Nagatomo, Hidetoshi Sakamoto, Yoshifumi Ohbuchi. Macroscopic evaluation of plastic deformation by thermography method [Electronic resource] // 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids / Jeju, Korea (June 9–13, 2013). – URL: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf> (дата обращения: 25.08.2018).

⁴ Применение теплового контроля в экспертизе промышленной безопасности плавильной печи / Е.В. Абрамова, Н.А. Быстрова, В.К. Белкин и др. // Докл. XX Всерос. конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике / Москва (3–6 марта 2014 г.). – М.: Спектр. – С. 206–209.

[2; 3]. В статье [3] на основании анализа современных методов и средств неразрушающего контроля сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой (капиллярных, оптических, вихретоковых, магнитных, электрических, тепловых, радиационных, акустических), отмечается, что недостатки каждого из перечисленных методов не позволяют гарантировать надежное выявление дефекта. По мнению авторов [3], перспективным направлением неразрушающего контроля является развитие и использование бесконтактных методов, а тепловые методы могут применяться как для контроля сварных соединений, так и для управления технологическим процессом сварки. На основе инфракрасных термографических измерений возможно управление параметрами сварки⁵. Его эффективность возрастает при совместном использовании тепловых методов и численного моделирования⁵. Решение задач технической диагностики стальных несущих систем предполагает выполнение анализа и оценку напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всей системы, а также кинетики его изменения с учетом имеющихся дефектов и повреждений [4; 5]. Существенным недостатком большинства методов неразрушающего контроля является то, что; 1) при испытаниях производятся измерения качественных параметров, не имеющих прямой связи с напряженно-деформированным состоянием; 2) такие испытания позволяют обнаружить дефект или проследить процесс зарождения и разрушения в элементе, но они не дают возможности определения прочности элементов, разрушающих нагрузок, срока службы, остаточного ресурса, управления технологическими и прочностными процессами.

Цель настоящей статьи – рассмотрение области эффективного применения, особенностей образования тепла и основных возможностей пассивного метода теплового неразрушающего контроля стальных элементов и изделий на основании экспериментальных исследований авторов.

Основная часть. *Современные требования к методам неразрушающего контроля работоспособности и безопасности конструкций, оборудования и машин.* Дефекты, возникающие в процессе изготовления и испытаний конструкций, их эксплуатации и ремонтов, оцениваются по существующим нормативным документам, методикам неразрушающего контроля, регламентирующим допустимость и параметры тех или иных несовершенств. По [6], «стандартная процедура дефектоскопического контроля достаточно сложна и, как правило, не охватывает объект полностью». И «актуальность рассматриваемой проблемы возрастает с увеличением срока эксплуатации, что диктует необходимость поиска более простых и эффективных методов решения задачи оценки состояния материалов, эксплуатируемых или подвергающихся испытаниям конструкций» [6]. В работах [7; 8] на основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса названы новые тенденции в методах контроля работоспособности и безопасности стареющего оборудования. Отмечается [7], что при определении остаточного ресурса необходимо, во-первых, учитывать индивидуальные особенности конкретного изделия «на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля с поверочными расчетами на прочность»; во-вторых, «заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и НК»; в-третьих, появилась «необходимость 100%-ного обследования стареющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон». В статье [7] на основе краткого анализа существующих методик поверочного расчета конструкций на прочность, возможностей и недостатков традиционных методов неразрушающего контроля напряжений делается вывод о необходимости «перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально других методов контроля и подходов», включающих определение параметров дефектов, НДС, определение фактических структурно-механических характеристик металла. Согласно авторам [7; 8], оценить «фактическое НДС конструкции» могут «только “пассивные” методы диагностики». Переход от традиционных технологий неразрушающего контроля к технологиям технической диагностики конструкций и сооружений предполагает наличие теории, методов и средств определения технического состояния объектов [8; 9]. Определение технического состояния объектов может производиться последовательным решением трех задач: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния. Наиболее сложной и ответственной является третья задача, решение которой определяет техническое состояние объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени⁶ [10]. Задача прогнозирования технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени до настоящего времени не получила полного решения. В работе [11] констатируется, что диагностика и продление срока службы стальных конструкций зданий и сооружений представляет собой сложную проблему, имеющую в настоящее время лишь частные решения. Важной составляющей технической диагностики элементов стальных конструкций является определение их реального НДС [12; 13]. А это предполагает, что техническое диагностирование объекта следует выполнять при нагрузках, равных рабочим или близким к ним.

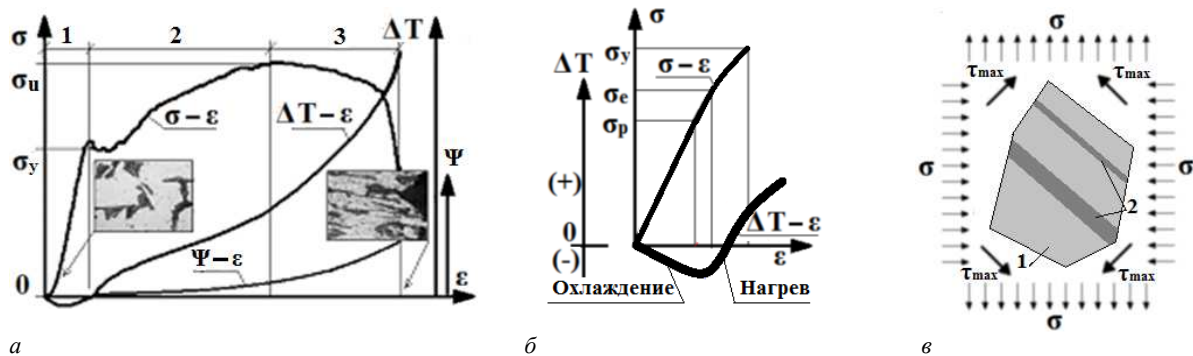
Деформационное тепло и техническое диагностирование стальных конструкций. Первоначально тепловые методы применялись в военных технологиях. С развитием теории, приборного, нормативного и организационного обеспечения теплового неразрушающего контроля получили дальнейшее развитие активные и пассивные тепловые методы в гражданских технологиях [14]. *Активные тепловые методы* применяются

⁵ Al-Karawi Janan, Schmidt Jürgen. Application of Infrared Thermography to the Analysis of Welding processes [Electronic resource]. – URL.: qirt.org/archives/qirt2004/papers/077.pdf (дата обращения: 7.08.2018).

⁶ ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.

в тех случаях, когда в объекте контроля не возникают внутренние тепловые источники. Активация тепловой энергии в контролируемом объеме производится за счет внешних воздействий [14; 15]. Работоспособность стальных элементов при возрастающей или убывающей во времени квазистатической, переменной или динамической нагрузке и при возникновении в них внутренних тепловых источников исследуют *пассивными тепловыми методами*^{7; 8} [1; 2; 16]. На основе пассивного теплового контроля прогнозируют напряженное состояние элементов с использованием вытекающей из теории У. Томсона линейной зависимости между мгновенными изменениями температуры тела и напряжениями упругого деформирования [17]. Теория У. Томсона не позволяет прогнозировать поведение конструкционной стали при ее работе в предельной и запредельных стадиях, характеризующихся возникновением пластических деформаций, зарождением и развитием трещин.

Процесс теплообразования в стали (рисунок 1) изменяется от ее охлаждения (стадия 1) до заметного нагрева при появлении пластических деформаций (стадии 2, 3).



а – диаграммы растяжения (σ - ϵ), нагрева (ΔT - ϵ) и развития повреждаемости (ψ - ϵ);
б – нагрев-охлаждение при упругом деформировании (участок 1);
в – участок стержня с зонами упругого охлаждения (1) и нагрева в полосе сдвига (2)

Рисунок 1. – Взаимосвязь между диаграммами растяжения, теплообразования, повреждаемости (**а, б**) и зоны охлаждения (1) и нагрева (2) контролируемого объема стального изделия

При этом изменяется макроструктура стали, растет повреждаемость ψ (см. рисунок 1, **а**), в материале происходят экзотермические твердотельные физико-химические реакции, инициированные процессом деформирования [16–21]. При упругом деформировании (стадия 1) происходит охлаждение стали (не больше 1 °С). При этом линейная зависимость ΔT - ϵ наблюдается при напряжениях σ , меньших предела пропорциональности σ_p . Выше σ_p начинаются отклонения от линейной зависимости, увеличивающиеся при напряжениях в стали, превышающих предел упругости σ_e (см. рисунок 1, **б**). Параллельно в выделенном объеме материала увеличивается число линий скольжения, в которых развиваются пластические деформации (см. рисунок 1, **в**). При напряжениях, превышающих предел текучести σ_y , линии скольжения заполняют весь выделенный объем. Работа пластического деформирования превращается в тепло и инициирует экзотермические физико-химические реакции в деформированном слое. Поэтому при деформировании выделенного объема (см. рисунок 1, **в**) его средняя температура (ΔT_d) будет зависеть от стадии деформирования. Если допустить, что доля пластически деформированного материала в выделенном объеме в текущий момент времени равна n , а упруго деформированного $(1 - n)$, то ΔT_d определится по выражению

$$\Delta T_d = (1 - n)\Delta T_e + n(\Delta T_p + \Delta T_r), \quad (1)$$

где ΔT_e , ΔT_p , ΔT_r – соответственно, изменение температуры выделенного объема за счет упругой, пластической деформаций и экзотермических твердотельных физико-химических реакций.

В первом приближении можно принять $n = 1$ (при $\sigma \geq \sigma_y$) и $n = 0$ (при $\sigma < \sigma_y$).

Внутренние источники тепловой стимуляции могут действовать непрерывно или в отдельные периоды функционирования объектов пассивного теплового контроля. Наиболее часто сооружения испытывают временные воздействия и нагрузки в периоды пуска-наладки, испытаний, кратковременных технологических циклов. В такие периоды работы сооружений в элементах происходит диссипация энергии, возникающей при функ-

⁷ Базалесев М.І. Розробка фізико-технологічних основ термографічного контролю і моніторингу стану матеріалів для оцінки ресурсу устаткування і споруджень ядерної енергетики методами інфрачервоної радіометрії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.07 / Ін-т електрофізики і радіаційних технологій НАНУ. – Харків, 2015. – 36 с.

⁸ Применение теплового контроля в экспертизе промышленной безопасности плавильной печи / Е.В. Абрамова, Н.А. Быстрова, В.К. Белкин и др. // Докл. XX Всерос. конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике / Москва (3–6 марта 2014 г.). – М.: Спектр. – С. 206–209.

ционировании объекта контроля, в тепловую, а содержащиеся в объекте контроля дефекты становятся активными, выделяют или поглощают тепловую энергию, и их можно диагностировать в пассивном режиме. Отсюда следует, что диагностирование объекта контроля в пассивном режиме производится при инициировании в нем тепловых источников в результате технологического функционирования и поэтому на него затрачивается меньше ресурсов, чем при активном режиме.

Определение напряжений в стальных элементах пассивным тепловым методом. Взаимосвязь между изменением напряженного состояния контролируемого малого элемента и его температуры ΔT впервые установил У. Томсон в 1857 г. [17]. Запишем эту зависимость в виде

$$\Delta T = -\frac{T_\alpha}{c_p \rho} \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (2)$$

где T – абсолютная температура элемента, К;
 α – коэффициент теплового расширения стали;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;
 ρ – плотность стали;
 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – главные напряжения.

Вид формулы (2) можно изменить с использованием понятия первого инварианта тензора напряженного состояния I_1 и обозначения $K_m = -\frac{\alpha}{c_p \rho}$:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{c_p \rho} \cdot T \cdot \Delta I_1 = -K_m \cdot T \cdot \Delta I_1. \quad (3)$$

Величину ΔI_1 представим в виде

$$\Delta I_1 = \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \Delta\sigma_1 \left(1 + \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \right) = \Delta\sigma_1 (1 + K_{21} + K_{31}). \quad (4)$$

Численно $K_{21} \leq 1, K_{31} \leq 1$. При одноосном напряженном состоянии $\Delta I_1 = \Delta\sigma_1$. Упругое растяжение-сжатие однородного, изотропного шара для элемента в центре шара дает $(1 + K_{21} + K_{31}) = 3$. Для других ситуаций $1 < (1 + K_{21} + K_{31}) < 3$. Отмеченная неопределенность не имеет места только при $K_{21} + K_{31} = 0$. Для других конкретных ситуаций сумму $(K_{21} + K_{31})$ можно определять на основании конечно-элементного расчета изделия. Коэффициент K_m определяется расчетом или экспериментально для конкретной марки стали и соответствующего температурного диапазона. Для температур от 223 до 373 К величины K_m для низкоуглеродистых марок сталей $K_m = (3,086 - 3,407)10^{-6}$ мм²/Н и его можно принимать по данным [22]. Например, если температура поверхности статически растягиваемого элемента из стали 22 К изменится на $\Delta T = 0,1$ К, то это будет соответствовать при $T = 293$ К изменению напряжений $\Delta\sigma_1 = 110,6$ Па. Расчет показал, что при определении напряжений по температурному полю поверхности высокие требования предъявляются к приборам измерения температуры и соответствующему программному обеспечению.

Проверка формулы У. Томсона тремя способами (по данным термографии, тензометрированием при упругой работе материала и на основании конечно-элементного анализа) позволила автору работы⁹ сделать вывод, что тепловой и конечно-элементный методы дают близкие результаты и применимы при работе стали вплоть до разрушения, а тензометрический метод – только при упругой работе.

Кинетика температурных полей деформируемых конструктивно-технологических форм. Экспериментально установлено [23], что разрушение и деформация металлов и сплавов сопровождаются инфракрасным излучением и частичным излучением в видимом диапазоне. Это позволяет контролировать НДС, предельные состояния элементов, зарождение и развитие разрушения в них методом инфракрасной термографии [14; 16]. При этом чувствительность используемых для контроля камер к перепаду температур должна быть не ниже 0,05 °С. Деформационное теплообразование в стали определяется многими факторами (материалом и стадией его работы, объемом очага деформации, скоростью деформирования, видом конструктивно-технологической формы, напряженным состоянием, распределением остаточных напряжений, влиянием внешней среды и др.). Температура на поверхности квазистатически деформируемых стальных элементов конструкций может пони-

⁹ 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.

жаться на $(0,2-1,0) \text{ }^\circ\text{C}$ и повышаться на $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и более. На разных стадиях разрушения возникают различные свечения. При ударном нагружении на копре МК-30 локальный разогрев в деформируемых зонах достигает сотен градусов ($800-1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ для сплава ВТ 8 и $100 \text{ }^\circ\text{C}$ для У8); при малых скоростях нагружения вспышки температуры составляют $(25-52) \text{ }^\circ\text{C}$ [24].

Визуализация температурных полей деформируемых растяжением элементов с конструктивными дефектами позволяет не только контролировать НДС, возникновение предельных состояний и зарождение разрушения, но и выделить новые закономерности в механизме зарождения и развития трещин в конструктивных элементах [20]. Термофильмы деформирования образцов показали, что в упругой стадии по направлению наибольших касательных напряжений в материале элементов зарождаются полосы сдвига (рисунок 2).

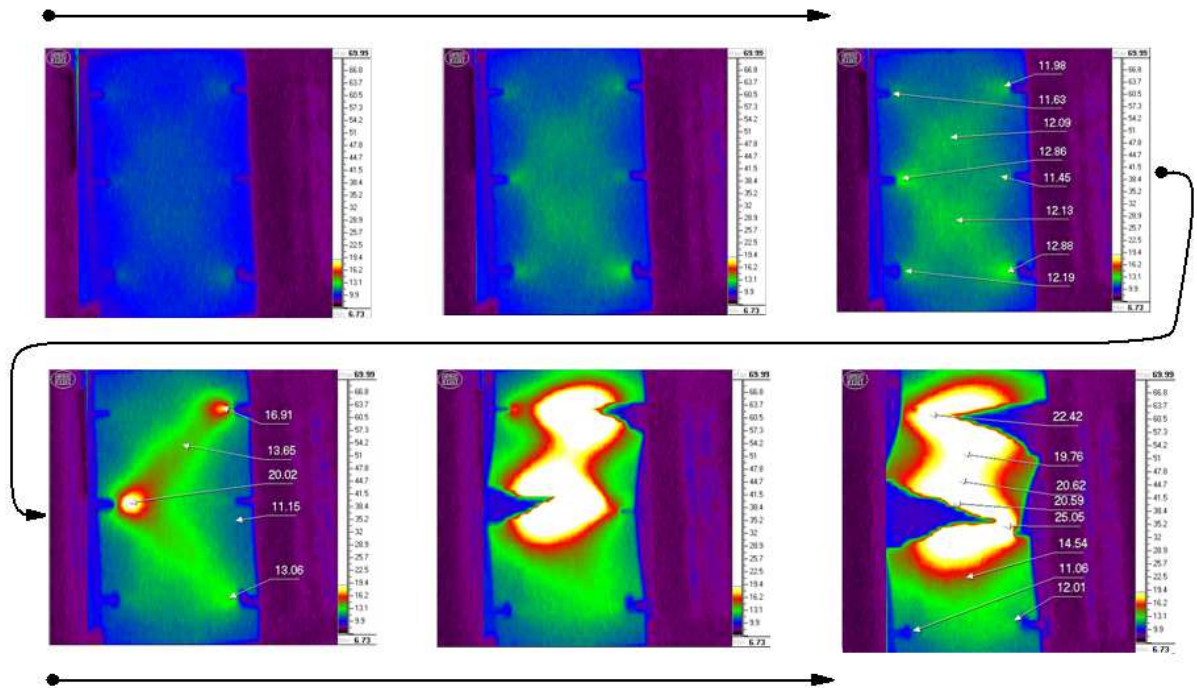
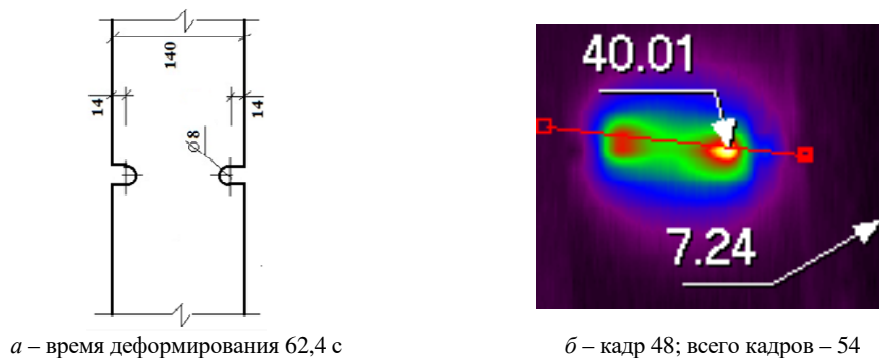


Рисунок 2. – Кадры термофильма квазистатического растяжения до разрушения листового элемента толщиной 18 мм с боковыми вырезами

Зарождение трещин в полосах сдвига сопровождалось аномальным возрастанием температуры стали в корне надрезов до $(22-25) \text{ }^\circ\text{C}$. Полосы сдвига при деформировании разделяли образец на блоки, размеры и форма которых определялись конструктивной формой. В опасных зонах растянутых образцов зарождались трещины как скола, так и отрыва, развитие которых приводило к вязкому, вязкохрупкому или хрупкому излому. Реализация конкретного механизма излома определялась напряженным состоянием зоны, в которой зарождалась начальная трещина [20; 22]. Кинетика изменения температуры в опасном сечении образца с двусторонними вырезами и в выделенной опасной точке показана на рисунке 3.



а – время деформирования 62,4 с

б – кадр 48; всего кадров – 54

Рисунок 3. – Схема образца с боковыми вырезами, температурное поле поверхности для кадра № 48 и графики изменения температуры по выделенному направлению (ϱ) и в выделенной точке (40.01) за период нагружения (ϑ) (начало)

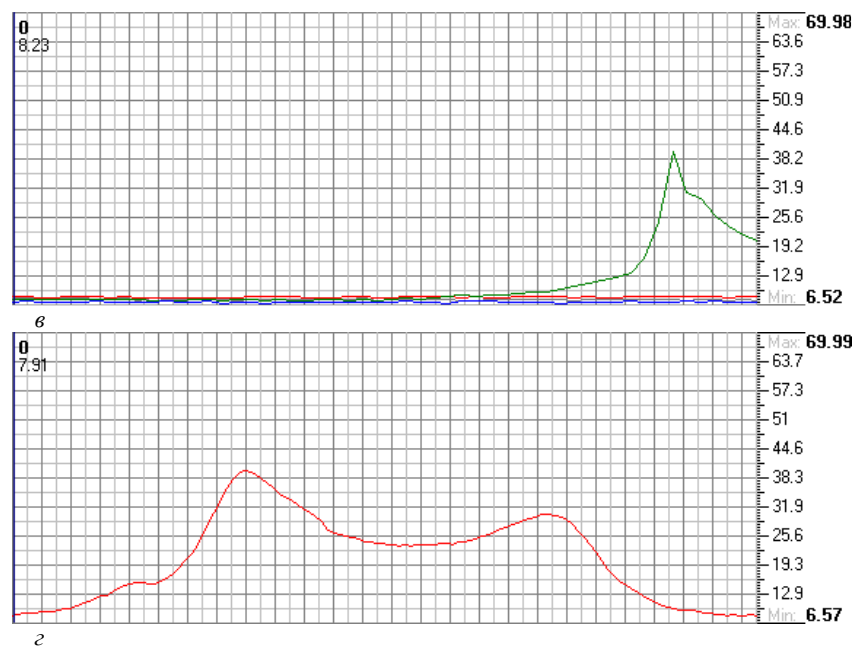


Рисунок 3. – Схема образца с боковыми вырезами, температурное поле поверхности для кадра № 48 и графики изменения температуры по выделенному направлению (г) и в выделенной точке (40.01) за период нагружения (б) (окончание, начало – с. 26)

Образец разрушился по выделенному сечению квазихрупко. Температура в основании надреза (очаге зарождения разрушения) повышалась до 40,01 °С при температуре окружающего воздуха 7,24 °С (см. рисунок 3, б). Изменение температуры вдоль выделенной линии отображено на графике рисунка 3, г. Пики температуры наблюдаются в основании боковых надрезов.

Заключение. Выполненный нами комплекс теоретических и экспериментальных работ доказывает, что пассивный метод теплового неразрушающего контроля стальных конструкций, нагружаемых непрерывно возрастающими или убывающими во времени силами, под действием которых в потенциально опасных зонах элементов функционируют внутренние деформационные источники тепла и поверхностные температурные поля, позволяет по кинетике и аномалиям температурных полей осуществлять контроль работоспособности в упругой, упругопластической стадиях работы стали, зарождения и развития разрушения. Мощность тепловых деформационных источников, места их возникновения и кинетика развития зависят от условий силового нагружения, внешних температурных воздействий, материала и конструктивной формы элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.
2. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов и др. – М.: Наука, 2002. – 472 с.
3. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой (обзор) / Е.В. Шаповалов, Р.М. Галаган, Ф.С. Клишар и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 1. – С. 10–22.
4. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.И. Нигаматова и др. // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 1. – С.1–32. DOI: 10.15862/01TS114
5. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. – М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
6. Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – № 2. – С. 3–18. DOI: 10.15407/tdnk2016.02.01
7. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
8. Ерёмин К.И., Матвеюшкин С.А. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений // В мире НК. – 2008. – № 4(42). – С. 4–7.
9. Комаровский А.А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2. – С. 22–27.
10. Венгринович В.Л. Мониторинг технического состояния в проблеме обеспечения техногенной безопасности. Обратная задача // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 57–81.

11. Фомина И.П., Голоднов А.И. Обоснование продления срока эксплуатации стальных балок // 36. наук. праць Україн. ін-ту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – 2013. – В. 11. – С. 140–147.
12. Голоднов А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений // Вісн. Придніпр. держ. акад. будів. та арх. – 2004. – № 7-8. – С. 34–40.
13. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. – М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. – 132 с.
14. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – 2-е изд. – М.: Спектр, 2013. – 575 с.
15. Тепловой контроль авиационных конструкций / А.В. Ковалев, В.И. Матвеев, В.В. Кошкин [и др. // MEGATECH. – 2011. – № 2-3. – С. 16–22.
16. Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for NonDestructive Testing. – New York: John Wiley-Interscience, 2001. – 684 p.
17. Thomson W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter // Quart. J. of Math. – 1857. – 1. – P. 57–77.
18. Мойсейчик Е.А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин. – Минск: Ковчег, 2022. – 200 с.
19. Мойсейчик Е.А. Распределение углерода и механизм теплообразования при холодном деформировании образцов из низкоуглеродистой стали // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2010. – № 5. – С. 22–26.
20. Мойсейчик Е.А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом // Приклад. механика и техн. физика. – 2013. – № 1. – С. 134–142.
21. Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е. Закономерности деформирования образцов типа Людвика-Шея и образцов с групповыми выточками // Теорет. и приклад. механика. – Вып. 31. – 2016. – С. 238–241.
22. Moysyichik E.A., Vavilov V.P., Kuimova M.V. Nondestructive testing of steel and constructions by using the phenomenon of deformation heat release // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2018. – 37(2). – [28]. DOI: 10.1007/s10921-018-0482-4
23. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов / К.Б. Абрамова, И.П. Щербakov, А.И. Русаков и др. // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, вып. 5. – С. 842–843.
24. Малыгин Г.А. Локальные разогревы в кристаллах при низкотемпературной деформации // Физика твердого тела. – 1977. – Т. 19, вып. 10. – С. 3152–3155.

REFERENCES

1. Pustovoi, V.N. (1992). *Metallokonstruktii gruzopod"emnykh mashin. Razrushenie i prognozirovanie ostatochnogo resursa*. Moscow: Transport. (In Russ.)
2. Budadin, O.N., Potapov, A.I., Kolganov, V.I., Troitskii-Markov, T.E. & Abramova, E.V. (2002). *Teplovoi nerazrushayushchii kontrol' izdelii*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Shapovalov, E.V., Galagan, R.M., Klishchar, F.S. & Zapara, V.I. (2013). Sovremennyye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya svarnogo soedineniya, vypolnennogo kontaktnoi tochechnoi svarkoi (obzor) [Modern methods and means of non-destructive testing of a welded joint made by contact spot welding (review)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]*, (1), 10–22. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I. & Mikhaldykin, E.S. (2014). Prochnostnoi monitoring mostovykh sooruzhenii i osobennosti ego primeneniya. Chast' 1. Mezhdunarodnyi i oteche-stvennyi opyt primeneniya monitoringa [Strength monitoring of bridge structures and features of its application. Part 1. International and domestic experience in the use of monitoring]. *Transportnye sooruzheniya [Transport facilities]*, 1(1), 1–32. DOI: 10.15862/01TS114 (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Bogdanov, E.A. (2006). *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
6. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A., Yaremenko, M.A., ... Kushnirenko, S.A. (2016). Intellektual'nye tekhnologii v otsenke sostoyaniya konstruktivnykh (AE tekhnologiya i kontroliruyushchaya apparatura novogo pokoleniya na ee osnove) [Intelligent technologies in assessing the state of structures (AE technology and new generation control equipment based on it)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]*, (2), 3–18. DOI: 10.15407/tdnk2016.02.01 (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Dubov, A.A. (2003). Problemy otsenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya [Problems of assessing the residual life of aging equipment]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor safety in industry]*, (3), 46–49. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Eremin, K.I. & Matveyushkin, S.A. (2008). Osobennosti ekspertizy i NK metallicheskiykh konstruktivnykh ekspluatiruemyykh sooruzhenii [Peculiarities of examination and NDT of metal structures of operated facilities]. *V mire NK [In the world of NDT]*, 4(42), 4–7. (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Komarovskii, A.A. (2000). Diagnostika napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Diagnostics of the stress-strain state]. *Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]*, (2), 22–27. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Vengrinovich, V.L. (2014). Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya v probleme obespecheniya tekhnogennoi bezopasnosti. Obratnaya zadacha [Monitoring of the technical condition in the problem of ensuring technogenic safety. Inverse problem]. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics]*, (1), 57–81. (In Russ., abstr. in Engl.)
11. Fomina, I.P. & Golodnov, A.I. (2013). Obosnovanie prodleniya sroka ekspluatatsii stal'nykh balok [Rationale for extending the service life of steel beams]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain'skogo institutu stalevikh konstruktivnykh imeni V.M. Shimanovskogo [Collection of scientific practices of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V.M. Shimanovsky]*, (B11), 140–147. (In Russ., abstr. in Engl. and Ukrainian)
12. Golodnov, A.I. (2004). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya – sostavnaya chast' rabot po prodleniyu resursa stroitel'nykh konstruktivnykh sooruzhenii [Modeling of the stress-strain state as an integral part of the work on extending the life of building structures]. *Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnitsva ta arkhitekturi [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Life and Architecture]*, (7-8), 34–40. (In Russ., abstr. in Engl. and Ukrainian)

13. Kononov, N.N. (2004). *Normirovanie defektov i dostovernost' nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenii*. Moscow: GUP NTTs PB. (In Russ.)
14. Vavilov, V.P. (2013). *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'*. Moscow: Spektr. (In Russ.)
15. Kovalev, A.V., Matveev, V.I., Koshkin, V.V. & Khizhnyak, S.A. (2011). Teplovoi kontrol' aviatsionnykh konstruksii. *MEGATECH*, (2-3), 16–22. (In Russ.)
16. Maldague, X. (2001). *Theory and Practice of Infrared Technology for NonDestructive Testing*. New York: John Wiley-Interscience. (In Engl.)
17. Thomson, W. (1857). On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter. *Quart. J. of Math.*, (1), 57–77. (In Engl.)
18. Moiseichik, E.A. (2022). *Teplovoi kontrol' materialov, stal'nykh konstruksii i mashin*. Minsk: Kovcheg. (In Russ.)
19. Moiseichik, E.A. (2010). Raspredelenie ugleroda i mekhanizm teploobrazovaniya pri kholodnom deformirovanii obratsov iz nizkouglerodistoi stali [Distribution of carbon and the mechanism of heat generation during cold deformation of specimens from low-carbon steel]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetata [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (5), 22–26. (In Russ., abstr. in Engl.)
20. Moiseichik, E.A. (2013). Issledovanie teploobrazovaniya i zarozhdeniya razrusheniya v stal'noi rastyanutoi plastine s konstruktivno-tekhnologicheskim defektom [Investigation of heat generation and fracture initiation in a stretched steel plate with a structural and technological defect]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]*, (1), 134–142. (In Russ., abstr. in Engl.)
21. Vasilevich, Yu.V. & Moiseichik, A.E. (2016). Zakonomernosti deformirovaniya obratsov tipa Lyudvika-Sheya i obratsov s gruppovymi vytochkami [Patterns of deformation of specimens of the Ludwik-Shey type and specimens with group undercuts]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika [Theoretical and applied mechanics]*, (31), 238–241. (In Russ., abstr. in Engl.)
22. Moyseychik, E.A., Vavilov, V.P. & Kuimova, M.V. (2018). Nondestructive testing of steel and constructions by using the phenomenon of deformation heat release. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(2), [28]. DOI: 10.1007/s10921-018-0482-4 (In Engl.)
23. Abramova, K.B., Shcherbakov, I.P., Rusakov, A.I. & Semenov, A.A. (1999). Emissionnye protsessy, soprovozhdayushchie deformirovanie i razrushenie metallov [Emission processes accompanying the deformation and destruction of metals]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*, 41(5), 842–843. (In Russ., abstr. in Engl.)
24. Malygin, G.A. (1977). Lokal'nye razogrevy v kristallakh pri nizkotemperaturnoi deformatsii [Local heating in crystals under low-temperature deformation]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*, 19(10), 3152–3155. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 10.05.2023

DETECTION OF HAZARDOUS STATES AND FAULT CONTROL IN STRETCHED STEEL ELEMENTS BY THERMAL METHOD

E. MOISEICHIK¹, A. MOISEICHIK²,
A. YAKOVLEV¹

¹ (Belarusian National Technical University, Minsk)

² (Unitsky String Technologies Inc., Minsk)

The article discusses the areas of effective application, the features of heat generation and the main possibilities of the passive method of thermal non-destructive testing of steel elements and products. The basic requirements for passive thermal control equipment are formulated. The mechanism of heat generation in steel is described and the structure of the formula for changing its temperature during deformation is substantiated. It is shown that the diagnostics of steel elements in the passive mode should be carried out with the functioning of heat sources in them, arising as a result of force effects on structures. The features of determining the stress state in steel elements by the passive thermal method are considered.

It is shown that the passive method of thermal non-destructive testing of steel structures, loaded with continuously increasing or decreasing forces in time, under the influence of which internal deformation heat sources and surface temperature fields function in potentially dangerous zones of elements, makes it possible to control the operability in elastic, elastic-plastic stages of steel operation, the origin and development of destruction. The power of thermal deformation sources, the places of their occurrence and the kinetics of development depend on the conditions of force loading, external temperature influences, material and structural shape of the elements.

Keywords: steel elements; deformation heat generation; surface temperature; passive thermal control; technical diagnostics.