

15

## Электротоксовая тепловая дефектоскопия металлических пластин

© Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, Д.Ю. Головин, А.А. Самодуров

НИИ „Нанотехнологии и наноматериалы“ Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина  
E-mail: golovin@tsu.tmb.ru

Поступило в Редакцию 10 марта 2017 г.

Предложен и экспериментально апробирован электротермический способ неразрушающего контроля электропроводящих материалов. Он основан на видеорегистрации ИК-излучения поверхности, возникающего при возбуждении пластинчатого образца миллисекундным импульсом тока. Последующая компьютерная обработка картин нестационарного теплового поля позволяет обнаруживать дефекты миллиметрового и субмиллиметрового размера, а также оценивать их геометрические характеристики и коэффициент температуропроводности материала.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.19.45083.16769

Среди множества методов неразрушающего контроля и тепловой дефектоскопии металлических изделий, описанных, например, в [1–6], особый интерес представляют методы высокоскоростного кинофильмирования нестационарной тепловой картины в инфракрасном (ИК) диапазоне, индуцируемой пропусканием электрического тока [7–9]. Ток вызывает локальный разогрев объекта в области неоднородности. Такой подход требует использования источников тока большой импульсной мощности и дорогостоящих высокоскоростных тепловизионных камер. Существенно понизить требования к аппаратуре и сделать ее портативной могут адекватная компьютерная обработка теплового изображения и восстановление распределения внутренних источников тепла, обусловленных наличием тех или иных дефектов в материале/изделии. Цель настоящей работы состоит в определении положения, формы и геометрических размеров дефектов в металлических пластинах методом коррекции (восстановления) положения локальных джоулевых источников тепла с помощью оригинального программного обеспечения.

Листовой образец стали 65Г толщиной 1 mm нагревался импульсом тока с регулируемой амплитудой (30–150 А) и длительностью (5–3000 ms). ИК-изображение кинофильмировали тепловизионной системой FLIR A35sc на базе неохлаждаемых  $\text{VO}_x$ -микроболометров, обладающих наибольшей чувствительностью в диапазоне длин волн  $\lambda = 7.5\text{--}13 \mu\text{m}$ . Камера имела матрицу  $320 \times 256$  пикселей с шагом датчика детектора  $25 \mu\text{m}$ , максимальное угловое разрешение (IFOV) 2.78 mrad, чувствительность  $\sim 0.05^\circ\text{C}$  (в диапазоне температур от  $-20$  до  $+550^\circ\text{C}$ ) и частоту выводимых и сохраняемых кадров 60 Hz. Описанная система позволяла получить информацию о тепловых свойствах материала, наличии и размерах дефектов (как в исходном состоянии, так и после провоцирующего развитие дефектов локального нагружения [10]).

Для теоретической оценки распределения мощности источников тепловыделения в двумерной задаче использовалась теория конформных отображений дефектов в комплексной плоскости  $z$  [11]. В случае круглого отверстия в бесконечной плоскости отображение Жуковского в виде  $z + r^2/z$  (центр системы координат находится в центре отверстия, действительная ось ориентирована вдоль направления тока на бесконечности  $j_\infty$ ,  $r$  — радиус отверстия) позволило найти искомое распределение плотности тока. Плотность источников тепловыделения  $q \sim j^2$ , где  $j$  — локальная плотность тока. Последняя пропорциональна модулю локального значения производной функции отображения, откуда следует  $q \sim |1 - r^2/z^2|^2$ . Таким образом, симметричные максимумы плотности тепловыделения  $q_{\text{max}} = 4q_\infty$  достигаются на границах отверстия в точках, лежащих на перпендикуляре к направлению  $j_\infty$  ( $q_\infty$  — плотность тепловыделения на бесконечности). Распределение  $q$  вдоль оси  $y$ , перпендикулярной  $j_\infty$ , описывается формулой  $(1 + r^2/y^2)^2$ . На границе отверстия  $q \sim 2(1 - \cos 2\varphi)$ , где  $\varphi$  — текущий угол относительно  $j_\infty$ .

Для теоретической оценки распределения  $q$  в случае прямой трещины длиной  $2h$ , ориентированной перпендикулярно вектору  $j_\infty$ , может быть использовано конформное отображение  $(z^2 + h^2)^{1/2}$  (центр системы координат находится в центре разреза, действительная ось направлена вдоль  $j_\infty$ ). Аналогично случаю с круглым отверстием получаем  $q \sim |z^2/(z^2 + h^2)|$ , что дает в окрестности кончика разреза расходимость вида  $h/2r$ , где  $r$  — расстояние от вершины разреза. Грубо оценить регистрируемое превышение роста температуры над ростом температуры фона можно, усреднив  $q$  в круге заданного радиуса с

центром в вершине разреза и подставив в качестве радиуса характерное расстояние тепловой диффузии  $r_0 = (\chi t)^{1/2}$ , где  $\chi$  — коэффициент температуропроводности материала,  $t$  — время с момента начала импульса тока. Если  $r_0 \ll h$ , то такая процедура дает отношение максимальной температуры к температуре на бесконечности  $h/(\chi t)^{1/2}$ . Таким образом, увеличение длительности импульса тока приводит к соответствующему понижению контрастности термограммы, регистрируемой в конце импульса.

С другой стороны, использование коротких импульсов тока лимитируется множеством факторов, следующих, в частности, из необходимости более высоких значений  $j_\infty$  для создания достаточных локальных перегревов объекта по сравнению с шумом на термограмме. Создание высоких  $j_\infty$  требует мощных источников тока и вызывает сильные импульсные электромагнитные помехи, влияющие на работу всей аппаратуры. Кроме того, короткие импульсы требуют большего быстродействия и пространственного разрешения регистратора ИК-изображения, большей точности синхронизации с моментом регистрации термограммы и др. Каждый из этих факторов приводит к существенному увеличению стоимости установки.

Таким образом, с практической точки зрения представляет интерес разработка методик обнаружения и определения длины трещин, использующих относительно длинные импульсы тока невысокой плотности, что особенно существенно для изделий большого сечения. Уменьшение контрастности термограммы и соответственно увеличение влияния шумов должны компенсироваться совершенствованием алгоритмов анализа термограмм. Для построения таких алгоритмов использовалось компьютерное моделирование процессов распространения тепла.

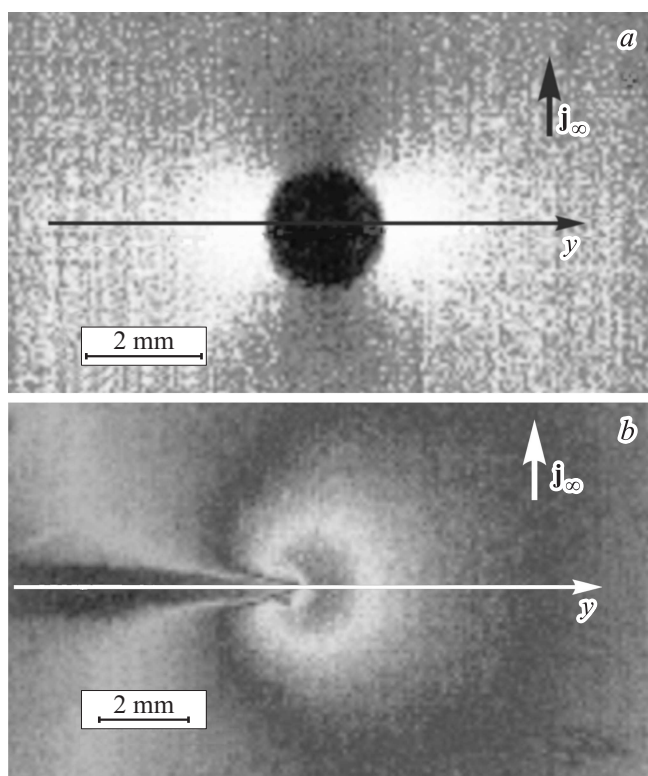
Численное моделирование тепловой задачи проводилось в приближении заранее известного распределения мощности тепловых источников, полученного из аналитического решения задачи протекания тока по бесконечной пластине с заданным дефектом (круглым либо тонким прямолинейным). Далее решалось неоднородное уравнение теплопроводности с постоянными коэффициентами и адиабатическими граничными условиями с использованием явной схемы вычислений на равномерной квадратной сетке с пространственным шагом, соответствующим разрешению ИК-камеры в каждом конкретном случае (обычно 50–100  $\mu\text{m}$ ), и временным шагом 10  $\mu\text{s}$ , что обеспечивало сходимость схемы для значений  $\chi$  вплоть до  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (табличные

значения  $\chi$  для стали  $12 \cdot 10^{-6} - 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Теплоотводом с поверхности пластины пренебрегалось, так как при коэффициенте теплоотдачи порядка  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  и перегреве в несколько градусов относительное изменение температуры за одну секунду не превышает 1%. Ввиду недостаточности информации об электропроводности образца и излучательной способности его поверхности значения температур, полученные в результате моделирования, масштабировались для наилучшего соответствия результатам эксперимента.

На рис. 1, *a* показана экспериментально полученная разность тепловых полей непосредственно до и после прохождения прямоугольного импульса тока по стальной пластине с круглым отверстием. На рис. 2, *a* приведены профили температуры, полученные экспериментально и по результатам моделирования для разных моментов времени вдоль оси  $y$ , перпендикулярной  $j_{\infty}$ . Хорошее согласие результатов моделирования и эксперимента позволяет использовать круглое отверстие в качестве просто создаваемого и хорошо определенного модельного объекта для нахождения коэффициента температуропроводности исследуемого материала и калибровки аппаратуры. При наличии отверстия известного диаметра этот метод позволяет определять  $\chi$  с точностью лучше чем 10%.

На рис. 1, *b* показана разность тепловых полей непосредственно до и после прохождения прямоугольного импульса тока длительностью 733 ms по стальной пластине с боковой перпендикулярной трещиной с длиной 6.4 mm и раскрытием 50–100  $\mu\text{m}$ , вводимой методом индентирования [10]. На рис. 2, *b* профили температуры вдоль оси  $y$ , перпендикулярной  $j_{\infty}$ , представлены для разных моментов времени  $t$  от переднего фронта импульса тока. Хорошее согласие результатов моделирования с экспериментом позволяет использовать эти профили для оптимального выбора функций, которые применяются для аппроксимации тепловых полей, создаваемых при обтекании током трещин неизвестной длины, с целью наиболее точного определения положения ее вершины по сильно зашумленной термограмме в автоматическом режиме.

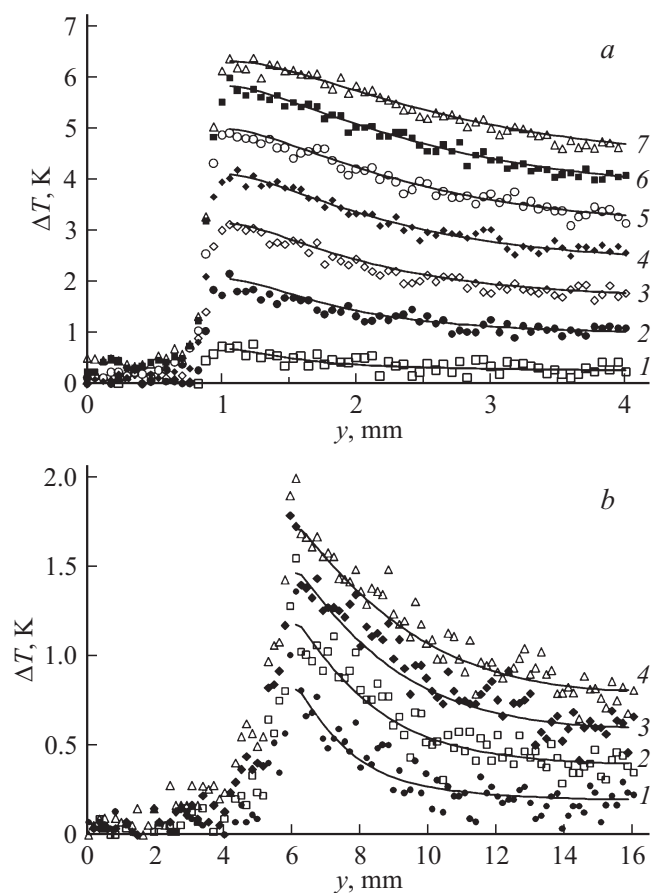
Для острых и протяженных дефектов контраст в ИК-диапазоне оставался существенным и легко измеряемым и при значительной роли теплопроводности, что позволило обнаруживать и характеризовать дефекты вплоть до субмиллиметрового масштаба. Важно отметить, что законы концентрации электрического тока и механических напряжений



**Рис. 1.** Разность тепловых полей непосредственно до и после прохождения прямоугольного импульса 150 А длительностью 117 ms по стальной пластине с круглым отверстием диаметром 2 mm (*a*) и прямоугольного импульса 30 А длительностью 733 ms по стальной пластине с боковой перпендикулярной трещиной длиной 6.4 mm (*b*).

на несплошностях любой геометрии подобны. По этой причине градиенты температурного поля и контраст тепловизионного изображения тем выше, чем более опасны дефекты с точки зрения вероятности зарождения и последующего распространения трещин.

Таким образом, в работе показано, что электротоксовая термометрия при последующей обработке тепловизионного изображения, регистри-



**Рис. 2.** Разности температурных профилей полей. *a* — непосредственно до и в процессе прохождения прямоугольного импульса тока 150 А длительностью 117 мс по стальной пластине с круглым отверстием диаметром 2 мм вдоль оси  $y$  в разные моменты времени, мс: 1 — 16.7, 2 — 33.3, 3 — 50, 4 — 66.7, 5 — 83.3, 6 — 100, 7 — 116.7. *b* — непосредственно до и в процессе прохождения прямоугольного импульса тока 30 А длительностью 733 мс по стальной пластине с боковой перпендикулярной трещиной длиной 6.4 мм вдоль оси  $y$  в разные моменты времени, мс: 1 — 183, 2 — 366, 3 — 549, 4 — 733. Время отсчитывалось от момента начала пропускания тока по пластине. Экспериментальные данные показаны точками, результаты моделирования — сплошными линиями.

руемого даже с не очень высокой скоростью съемки (время между кадрами больше характерного времени термической диффузии), позволяет корректно характеризовать геометрические размеры обнаруживаемых дефектов с субмиллиметровой точностью и определять коэффициент температуропроводности материала с точностью  $\sim 10\%$  или лучше. При этом можно использовать дешевые и портативные источники тока небольшой импульсной мощности и тепловизоры с невысокой скоростью съемки, позволяющие разработать легкий переносной прибор для контроля котлов, трубопроводов, емкостей в производственных или полевых условиях.

Разработка новой комбинированной методики и портативного прибора для оперативной диагностики дефектов, а также проведение экспериментальных исследований выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00181). Разработка аналитических и численных моделей осуществлена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-48-680817).

## Список литературы

- [1] *Ibarra-Castaneda C., Maldague X.P.* // Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems / Ed. H. Czichos. Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 175–220.
- [2] *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М: Спектр, 2009. 544 с.
- [3] *Oswald-Tranta B.* // Nondestruct. Test. Eval. 2007. V. 22. P. 137–153.
- [4] *Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F.G.* // Sensors. 2014. V. 14. P. 12305–12348.
- [5] *Vavilov V.P., Burleigh D.D.* // NDT & E International. 2015. V. 73. P. 28–52.
- [6] *Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M.* // J. Nondestruct Eval. 2016. V. 35. P. 18 (1–17).
- [7] *Libin M.N., Balasubramaniam K., Maxfield B.W., Krishnamurthy C.V.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1511. P. 539–546.
- [8] *Gao B., Woo W.L., Tian G.Y.* // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 25480 (1–12).
- [9] *Yang R., He Y.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 234103 (1–4)
- [10] *Головин Ю.И.* Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
- [11] *Сидоров Ю.В., Федорюк М.В., Шабунин М.И.* Лекции по теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1989. 480 с.