

15

## Нестационарная тепловая дефектоскопия покрытий наружной и внутренней поверхностей металлических оболочек

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

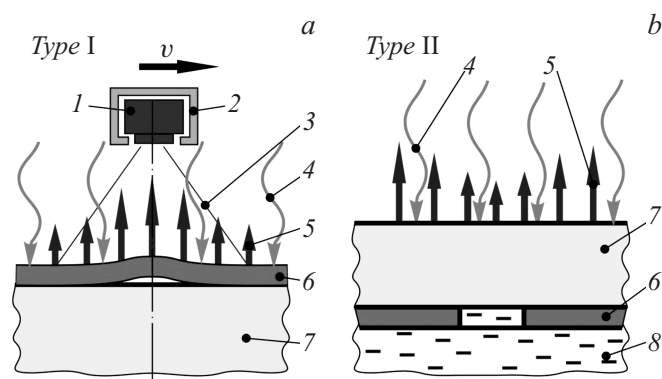
НИИ „Нанотехнологии и наноматериалы“ Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина  
E-mail: golovin@tsu.tmb.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2017 г.

Предложен и экспериментально апробирован способ неразрушающего контроля покрытий наружной и внутренней поверхностей металлических оболочек, основанный на видеорегистрации инфракрасного излучения поверхности, индуцированного кратковременным внешним нагревом. Компьютерная обработка нестационарного поля распределения температуры на наружной поверхности позволяет обнаруживать на внутренней, недоступной для наблюдения поверхности дефекты с латеральными размерами порядка или больше толщины металлической стенки, а также оценивать их геометрические характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45345.16863

Среди множества методов неразрушающего контроля и тепловой дефектоскопии металлических изделий, описанных, например, в [1–3], особый интерес представляют методы кинофильмирования нестационарной тепловой картины в инфракрасном (ИК) диапазоне [4,5], индуцируемой кратковременным нагревом доступной поверхности, например ее обдувом горячим воздухом или ИК-излучением. Такой подход позволяет обнаруживать уменьшение толщины стенки сосуда или трубопровода вследствие коррозии; деградацию, отслоение или частичную утрату защитного покрытия на наружной и внутренней поверхностях; образование внутренних отложений, накипи и т. п. Целью нашего исследования являлась разработка оригинальных методов и портативной аппаратуры для обнаружения дефектов и неоднородностей (локальных отслоений и разрушений защитных покрытий, образования депозитов и т. п.), локализованных на наружной и внутренней поверхностях металлических оболочек (в частности, трубопроводов, сосудов,



**Рис. 1.** Схемы ИК-контроля многослойной оболочки с помощью внешнего нагрева. *a* — ламинированная металлическая стенка с локальным отслоением защитного полимерного покрытия на наружной поверхности (*type I*), *b* — металлическая стенка сосуда с нарушением (повреждение, деградация, утоньшение и т.д.) внутреннего защитного полимерного покрытия (*type II*). 1 — ИК-видеокамера, 2 — термостабилизированный или теплоизолирующий бокс, 3 — поле зрения ИК-видеокамеры, 4 — греющий внешний тепловой поток  $q$ , 5 — ИК-излучение, 6 — защитное полимерное покрытие, 7 — металлическая стенка, 8 — жидкость,  $v$  — скорость сканирования (перемещения ИК-видеокамеры).

цистерн, реакторов и т.д.), а также определение их положения и геометрических размеров методом анализа нестационарных температурных полей на наружной поверхности оболочки с помощью оригинального программного обеспечения.

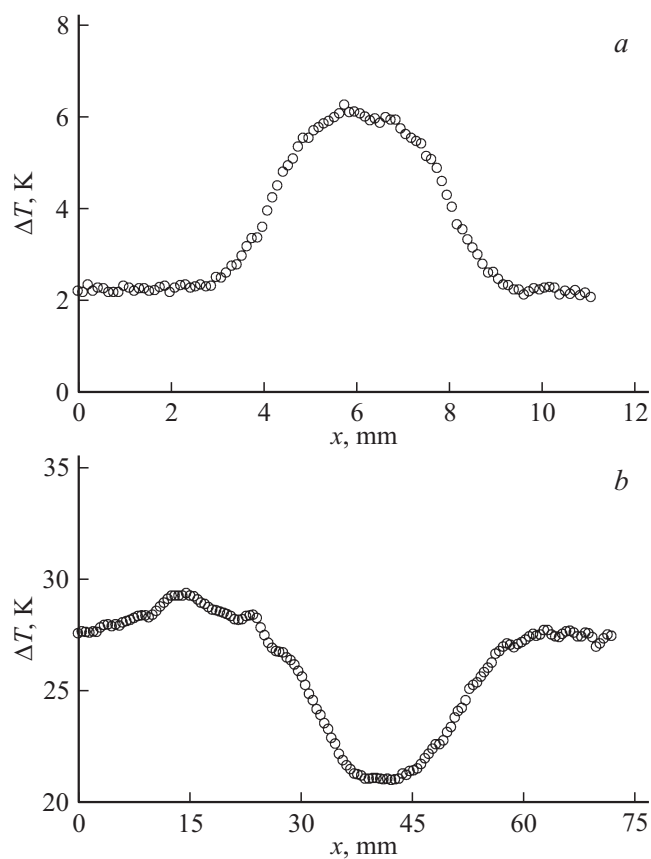
Нагрев ламинированной металлической оболочки осуществлялся квазистационарным однородным воздушным потоком регулируемой температуры  $T_h = 45\text{--}150^\circ\text{C}$  (рис. 1). ИК-изображение кинофильмировали тепловизором FLIR A35sc на базе неохлаждаемых  $\text{VO}_x$ -микроболометров, обладающих наибольшей чувствительностью в диапазоне длин волн  $\lambda = 7.5\text{--}13\ \mu\text{m}$ . Камера имела матрицу  $320 \times 256$  пикселей, угловое разрешение (IFOV)  $2.78\ \text{mrad}$ , 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 получать информацию о тепловых свойствах ламинированной стенки, наличии и

размерах дефектов (как в исходном состоянии, так и после провоцирующего развитие дефектов локального нагружения [6,7]). Исследовался ряд модельных ситуаций на двумерных дефектах, параллельных исследуемой металлической поверхности, в частности локальное отслоение защитного полимерного покрытия и локальные дефекты в аналогичном покрытии на внутренней поверхности металлической оболочки, находящейся в контакте с жидкостью.

Рассмотрим ситуацию с повреждением или отслоением защитного полимерного покрытия на наружной стороне оболочки (рис. 1, *a*). Поскольку теплопроводность и температуропроводность полимерного покрытия (полимеры, краска и т.п.) на один-три порядка величины меньше, чем таковые для металлической стенки, покрытие создает существенное тепловое сопротивление нормальному потоку тепла. Латеральный поток в таком покрытии пренебрежимо мал. Отслаивание покрытия создает дополнительное тепловое сопротивление потоку тепла вследствие образования тонкой воздушной прослойки (конвекционный теплоперенос в ней неэффективен, а теплопроводность воздуха, как минимум, на порядок величины меньше, чем у покрытия).

Локальное отслоение полимерного покрытия радиусом 2 мм создавалось методом индентирования пленки [6,7], нанесенной на металлическую подложку. Нагрев осуществлялся потоком теплого воздуха с температурой  $T_h = 45^\circ\text{C}$ . Вследствие переменной толщины воздушной прослойки, плавно сходящей к нулю на периферии дефекта, четкие границы отсутствуют, что и наблюдается в распределениях температуры. На рис. 2, *a* показан профиль разности температур вдоль оси  $OX$  до и после нагревания в течение 10 с. В процессе нагрева длительностью от единиц до сотен секунд температура как поверхности отслоения, так и бездефектной поверхности растет, а положение и ширина области быстрого изменения температуры меняются слабо. Наибольшая точность измерения размера дефекта покрытия обеспечивается при использовании уровня 50% от максимальной температуры в его центре.

Возможности обнаружения локальных дефектов покрытия, находящихся на недоступной для наблюдения внутренней стороне металлической оболочки контейнера, содержащего жидкость (локальное отсутствие покрытия; отслоение; утолщение, моделирующее депозит), тестировались на стальной емкости с толщиной стенки 1 мм, имевшей внутреннее защитное полимерное покрытие толщиной 1 мм (рис. 1, *b*). Емкость заполнялась водой комнатной температуры. В одном из экс-



**Рис. 2.** Температурные профили вдоль оси  $OX$ :  $a$  — металлической стенки с локальным отслоением наружного защитного полимерного покрытия радиусом 2 mm (*type I*),  $b$  — металлической стенки сосуда со сквозным нарушением внутреннего защитного полимерного покрытия радиусом  $r_2 = 8$  mm через 20 s от момента начала нагрева воздушным потоком (*type II*). Толщина металлической стенки 1 mm.

периментов во внутреннее полимерное покрытие искусственно вводили дефекты в виде сквозного отверстия радиусом  $r_1 = 3$  mm или  $r_2 = 8$  mm. На рис. 2,  $b$  показан профиль разности температур вдоль

оси  $OX$  на такой стенке с размером дефекта  $r_2 = 8$  mm через 20 s от момента начала нагрева воздушным потоком ( $T_h = 150^\circ\text{C}$ ).

При распространении тепла в таких многослойных стенках можно выделить несколько характерных времен  $\tau_i = R_i^2/\chi_i$ , соответствующих различным характерным размерам задачи  $R_i$ , где  $\chi_i$  — температуропроводность ( $\chi_m \approx (1-10) \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s для металлов и  $\chi_i \approx 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s для неметаллического покрытия). Наименьшее характерное время  $\tau_1$  соответствует прохождению тепловой волны сквозь металлическую оболочку в нормальном направлении и составляет  $\sim 0.1$  s для стальной стенки толщиной  $\delta_m = 1$  mm. Второе характерное время  $\tau_2$  соответствует латеральному перераспределению тепла на масштабах, сопоставимых с характерным латеральным размером дефекта  $\delta_d$ . Оно ограничивает сверху интервал времени между началом теплового импульса и оптимальным моментом регистрации распределения температуры в том случае, если требуется получить информацию не только о наличии, но и о геометрии дефекта. При нагреве внешним источником тепла третье характерное время  $\tau_3$  определяется размером области подвода тепла от внешнего нагревателя. При времени нагрева  $t_h > \tau_3$  существенную роль начинает играть латеральный отток тепла из исследуемой области, что искажает тепловую картину, снижает эффективность нагрева и влечет за собой необходимость использования более мощных источников энергии. Применительно к стальной оболочке  $\tau_3 \sim 100$  s для области нагрева размером 30 mm и  $\tau_3 \sim 1000$  s для области нагрева 100 mm.

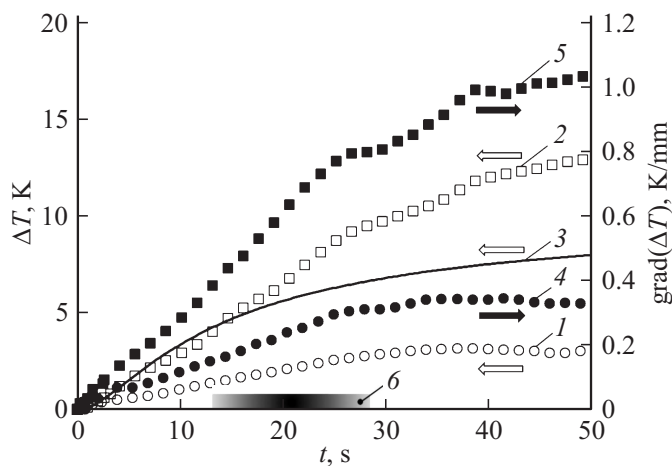
Для выявления дефектов покрытия, находящихся на недоступной стороне оболочки, контактирующей с жидкостью с постоянной температурой, посредством инициирования подвода или отвода тепла с наружной стороны, существенно важными являются все три обсуждаемых характерных времени. По достижении текущего времени  $t$ , превышающего  $\tau_1$  в несколько раз, на термограмме проявляется изображение дефекта с пространственным разрешением, сравнимым с толщиной металлической стенки. В дальнейшем его яркость растет, асимптотически приближаясь к некоторому пределу, зависящему от размера дефекта, а контрастность падает. При приближении времени наблюдения к  $\tau_3$  тепловая картина начинает дополнительно искажаться из-за латерального отвода тепла из обогреваемой области.

Для покрытия пренебрежимо малой теплопроводности с дефектом в виде сквозного отверстия радиусом  $\delta_d \gg \delta_m$  (рис. 1, *b*) при постоянной температуре жидкости, контактирующей со стенкой, температурный

контраст изображения можно оценить в приближении одномерной задачи (точные решения приведены в [8]). При  $t > \tau_1$  температура ИК-изображения бездефектной области линейно растет со временем по закону  $T_\infty \approx T_0(\text{Fo} + 1/3)$ , где  $T_0 = q\delta_m/\lambda$ ,  $\text{Fo} = q\chi_m t/\delta_m^2$  — безразмерное время,  $q$  — плотность подводимого теплового потока,  $\lambda$  — эффективный коэффициент теплопроводности стенки. Максимальная температура в центре дефекта  $T_c \approx q/\alpha(1 - e^{-\text{BiFo}})$ , где  $\text{Bi} = \alpha\delta_m/\lambda$  — число Био,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на границе стенка/вода. Для  $\tau_1/\text{Bi} \gg t \gg \tau_1$  разность температур  $\Delta T = T_\infty - T_c \approx q\alpha\delta_m^2/2\lambda^2\text{Fo}^2 = T_0 \cdot \text{BiFo}^2/2$ . При приближении длительности нагрева к  $\tau_2$  тепловое изображение начинает размываться. Динамика этого процесса оценивалась путем решения задачи о бесконечном цилиндре [8], на образующей которого происходит теплообмен со средой, имеющей температуру, линейно растущую во времени. Для  $t > \tau_2/20$  решение на оси цилиндра с точностью лучше 1% можно упростить до  $\Delta T_{lat} \approx k\delta_d^2/\chi_m \cdot 0.75(1 - e_{lat}^{-1.58\text{Fo}})$ , где  $k$  — скорость изменения температуры среды, а  $\text{Fo}_{lat} = \chi_m t/\delta_d^2$ . Для учета нелинейного роста  $\Delta T$  в реальном эксперименте (см. кривые 1 и 2 на рис. 3) решение, полученное в одномерном приближении, домножено на  $\Delta T_{lat}/kt$ . Несмотря на то что такая оценка является весьма грубым приближением, для  $\text{Fo}_{lat} < 1-2$  она дает хорошее согласие с экспериментом (кривые 2 и 3 на рис. 3) и позволяет задать оптимальную длительность нагрева (6 на рис. 3).

Для оценки наблюдаемой ширины размытия границ изображения дефекта в зависимости от времени на рис. 3 также показана величина  $\text{grad}(\Delta T)$ , полученная из линейной регрессии экспериментальных данных вблизи проекции границы дефекта на переднюю стенку (кривые 4 и 5 на рис. 3). Из приведенных зависимостей видно, что начиная с некоторого времени порядка  $\tau_2$  величины  $\Delta T$  и  $\text{grad}(\Delta T)$  растут практически синхронно.

Таким образом, для оптимизации производительности и чувствительности метода при выборе длительности регистрации следует учитывать следующие обстоятельства. Несмотря на общий рост температуры во всей нагреваемой области, скорость изменения  $\Delta T$  по различным причинам уменьшается с течением времени, а ширина границы начиная с некоторого момента практически перестает зависеть от времени, так что выбирать длительность измерения  $t_m$  больше минимально необходимой нецелесообразно. Оптимальная величина  $t_m$  определяется



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости разности температур  $\Delta T$  (1, 2) и  $\text{grad}(\Delta T)$  (4, 5) в центре дефекта радиусом  $r$  и на бесконечности при  $r_1 = 3 \text{ mm}$  (1, 4) и  $r_2 = 8 \text{ mm}$  (2, 5) в зависимости от времени нагрева  $t$ . 3 — теоретическая зависимость в соответствии с математической моделью, учитывающей нелинейный рост  $\Delta T$ , 6 — оптимальная длительность нагрева.

желаемым уровнем надежности обнаружения и реальным уровнем флуктуаций ИК-изображения, зависящим от шума самой камеры, временной и пространственной неоднородности внешнего теплового потока, неоднородности излучательных свойств поверхности, алгоритмов усреднения и фильтрации данных и других факторов. Ввиду того что при  $t \gg \text{Fo}_2$  разность температур сильно зависит от размера дефекта и слабо — от времени, конкретные значения тепловых характеристик системы определяют минимальный размер потенциально обнаружимых дефектов. Время нагрева, необходимое для обнаружения минимального обнаружимого дефекта, можно оценить с помощью соотношения  $\text{Bi Fo} \approx 2-3$ .

Итак, в работе установлена связь минимально выявляемого размера дефекта с величиной тестирующего потока тепла  $q$ . Показано, что для обеспечения приемлемой контрастности изображения в процессе контроля покрытия внутренней поверхности оболочки время нагрева  $t_h$  необходимо устанавливать в интервале  $\tau_1 < t_h < (2-3)\tau_2$ . Несмотря

на то, что это лежит за пределами адиабатического режима, такой диапазон обеспечивает наилучшую обнаружимость дефектов. Дальнейшее увеличение  $t_h$  не приводит к существенному росту точности определения параметров дефекта, но уменьшает скорость контроля (сканирования поверхности) и может вызвать нежелательный перегрев контролируемого изделия.

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] *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.
- [2] *Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F.G.* // *Sensors*. 2014. V. 14. P. 12305–12348.
- [3] *Vavilov V.P., Burleigh D.D.* // *NDT&E International*. 2015. V. 73. P. 28–52.
- [4] *Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. В. 19. С. 64–70.
- [5] *Петров Д.В., Генин Д.Е., Корольков В.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. В. 9. С. 20–26.
- [6] *Головин Ю.И.* Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
- [7] *Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И.* // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23. В. 16. С. 15–19.
- [8] *Carlslaw H.C., Jaeger J.C.* *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, 1959. 510 p.