

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-6-23-31

УДК (UDC) 620.179.1;620.192.6

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ НОВЫМИ МЕТОДАМИ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ*

© Юрий Иванович Головин^{1, 2}, Александр Иванович Тюрин², Дмитрий Юрьевич Головин², Александр Алексеевич Самодуров²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

² НИИ нанотехнологии и наноматериалов, Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия; e-mail: nano@tsu.tmb.ru

Статья поступила 31 октября 2017 г.

Приведены результаты применения новых методов, средств контроля и диагностики, основанных на компьютерном анализе картин мультимасштабной динамической термографии. В зависимости от размеров inspectируемой области, а также характера, особенностей расположения, ориентации и размеров дефектов использовали различные источники энергии для зондирующего динамического нагрева контролируемого изделия: поток воздуха, сфокусированный лазерный пучок, точечный контакт. Нестационарную тепловую картину контролируемого участка регистрировали тепловизором высокого разрешения и затем анализировали с помощью оригинальных модельных подходов и разработанного специализированного программного обеспечения. Развитие дефектов провоцировали калиброванной локальной силовой нагрузкой с помощью встроенного генератора силы, что давало возможность выявить динамичные (склонные к росту) дефекты, оценить степень их опасности для дальнейшей эксплуатации и остаточный ресурс изделия. Используя предлагаемые методы, можно обнаруживать и количественно характеризовать дефекты различного типа (трещины, расслои, отслоения и деградацию покрытий, дефекты сварки и клеевых соединений, депозиты транспортируемых веществ и др.), размеров (от долей до десятков миллиметров) и расположения в изделии (не только вблизи наружной, но и внутренней поверхности сосудов, трубопроводов, реакторов, цистерн и др.). Разработанные методики позволяют также определять и теплофизические характеристики материала, в частности, коэффициент температуропроводности с точностью лучше чем $\pm 3\%$.

Ключевые слова: термография; тепловизор; неразрушающий контроль; дефекты покрытий; трещины; нестационарная теплопроводность; число Фурье; коэффициенты тепло- и температуропроводности.

NEW METHODS OF THERMOGRAPHIC CONTROL USING MULTI-SCALE ANALYSIS OF NON-STATIONARY THERMAL FIELDS

© Yuriy I. Golovin^{1, 2}, Alexander I. Turin²,
Dmitry Yu. Golovin², Alexander A. Samodurov²

¹ M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

² Nanotechnology and Nanomaterials Research Institute, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia; e-mail: nano@tsu.tmb.ru

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00181) и РФФИ (проект № 17-48-680817).

Submitted October 31, 2017.

A set of new approaches and techniques of non-destructive testing is described and implemented within a unified computer analysis of the patterns of multi-scale dynamic thermography. Depending on the size of the inspected area, nature, location, orientation and size of the defects, various energy sources were used for probe dynamic heating of the controlled article: air flow, focused laser beam, and point contact. The non-stationary thermal picture of the monitored area was recorded with a high resolution thermal imaging device and then analyzed using original model approaches and developed software. A set of discussed approaches allows detecting and quantitative characterizing of the defects of various types, size (from fractions to tens of millimeters) and orientation, including cracks, coating delamination or degradation, welding and glue seams defects, deposits, etc., both at the outer and inner surfaces of tubes, tanks, and reactors, etc. The developed methods provides determination of the thermophysical characteristics of the material, i.e., the thermal diffusivity coefficient with an accuracy better than $\pm 3\%$.

Keywords: thermography; thermal camera; non-destructive testing; coating defects; cracks; non-stationary thermal conductivity; thermal conductivity and diffusivity coefficients.

Растущие требования к повышению надежности и предсказуемости поведения изделий в условиях эксплуатации ставят разнообразные и все более сложные задачи в отношении контроля качества и состояния объекта. Основные задачи технической диагностики можно объединить в четыре большие группы: 1) обнаружение и локализация дефектной зоны; 2) количественная характеристика дефектов; 3) оценка склонности дефектов к развитию и степени опасности для дальнейшей эксплуатации; 4) прогнозирование остаточного ресурса изделия в целом. Обычно подобные задачи решают инспекционными и дефектоскопическими средствами [1 – 5], что делает контроль трудоемким, дорогостоящим и требующим больших временных затрат. Вместе с тем техническую диагностику, контроль, дефектоскопию и оценку степени опасности развития обнаруженных дефектов желательно проводить с использованием ограниченного (в идеале — одного) числа физических принципов, в рамках единой техно-

логической платформы и с помощью одного универсального прибора.

Весьма перспективны динамические термографические методы контроля, которые потенциально имеют ряд преимуществ [6 – 14]. Они обладают большей информативностью и пространственным разрешением, более высокой чувствительностью к неоднородностям, чем стационарные или квазистационарные методы, но требуют более интенсивных источников тепла и высоко разрешающей системы регистрации.

Как известно, нестационарные температурные поля в исследуемом объекте лучше создавать путем кратковременного подвода энергии к интересующей области. Также можно использовать поверхностный нагрев, в частности, обдувание горячим воздухом, импульсное облучение видимым светом или инфракрасным (ИК) излучением.

Методы термографии нестационарных температурных полей, индуцируемых внешними источниками энергии и регистрируемых современными тепловизорами, чувствительными к собственному ИК-излучению объекта в ближнем и среднем диапазоне длин электромагнитных волн (0,78 – 3 и 3 – 50 мкм соответственно [15]), позволяют решать многие задачи технического контроля и диагностики [5 – 10]. Однако в аналитических и компьютерных моделях необходимо учитывать, что любой способ термографического контроля имеет свои особенности.

Цель работы — разработка методов и средств обнаружения дефектов и неоднородностей различных форм и масштабов в металлических и неметаллических изделиях, а также в металлических оболочках с наружным и внутренним защитным или теплоизолирующим покрытием, определение их геометрических размеров и склонности к развитию в условиях эксплуатации.

Использовали методы, основанные на регистрации нестационарных температурных полей

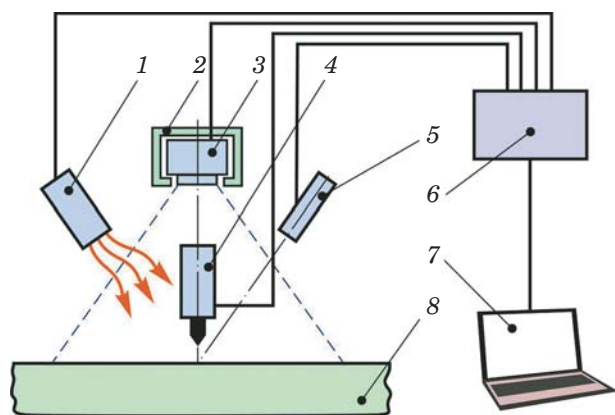


Рис. 1. Схема измерительного комплекса для термографического контроля и диагностики: 1 — генератор однородного потока горячего воздуха; 2 — термостабилизированный или теплоизолирующий бокс; 3 — тепловизор; 4 — устройство для локального контактного нагрева и силового нагружения (индентирования); 5 — лазер; 6 — контроллер; 7 — компьютер; 8 — исследуемый объект

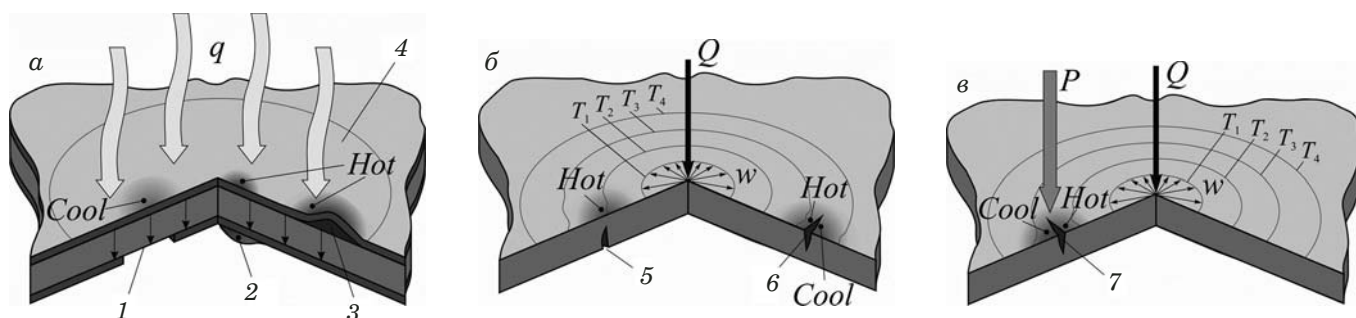


Рис. 2. Схемы нагрева: *a* — однородным распределенным потоком горячего воздуха; *б, в* — локальный (точечный) нагрев, включая инициирование трещины устройством для локального силового нагружения (индентирования) дефектной зоны (*1* — сквозное нарушение внутреннего защитного полимерного покрытия; *2* — локальное полимерное наслоение на внутренней поверхности защитного полимерного покрытия; *3* — отслоение защитного полимерного покрытия на внешней стороне; *4* — область однородного нагрева распределенным потоком горячего воздуха; *5, 6* — несквозные трещины на внутренней и наружной сторонах; *7* — трещина, стимулируемая локальным силовым нагружением; *Q* — тепловой поток; *q* — плотность введенного потока тепла; *w* — плотность потока тепла в изделии; *Hot, Cool* — зоны повышенной и пониженной температур вблизи дефекта; $T_1 - T_4$ — изотермы (показаны концентрическими окружностями); *P* — локальная сила)

на наружной поверхности изделия с помощью ИК-видеосъемки с последующей обработкой цифровых изображений с применением оригинального программного обеспечения. Схема измерительного комплекса приведена на рис. 1.

Нагрев контролируемого объекта осуществляли несколькими способами (рис. 2): в случае больших поверхностей — квазистационарным однородным воздушным потоком ($T_a = 45 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), в случае малых — сфокусированным лазерным пучком или точечным контактом с предварительно нагретым горячим телом.

Цифровое ИК-изображение наружной поверхности получали с помощью тепловизора FLIR A35sc, обладающего наибольшей чувствительностью в диапазоне длин волн $7,5 - 13\text{ мкм}$ (матрица — 320×256 пикселей, угловое разрешение (Instantaneous Field of View — IFOV) — $2,78\text{ мрад}$, порог чувствительности — $\sim 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в диапазоне температур от -20 до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$), частота выводимых и сохраняемых кадров — 60 Гц). Для подавления шумов в матрице камеры (тепловизора) сигнал с каждого пикселя усредняли по нескольким соседним кадрам (от 1 до 60 в зависимости от темпа разогрева).

Установка (см. рис. 1) позволяла получать количественные данные о дефектах в изделии, разделять статические неопасные дефекты и склонные к эволюции динамические, провоцируя рост последних методом локального силового нагружения [16 – 21], оценивать степень опасности дефектов для дальнейшей эксплуатации и остаточный ресурс изделия, а также определять теплофизические характеристики материалов.

Чтобы исключить ложные локальные неоднородности в яркости ИК-изображения, обусловленные различиями в излучательной способно-

сти отдельных участков контролируемой поверхности, из сигнала, получаемого с каждого пикселя матрицы в процессе нагрева (T_h), вычитали сигнал (T_0) до начала нагрева. Разницу температур $T = T_h - T_0$ в дальнейшем анализировали.

Решения уравнения нестационарной теплопередачи для каждого типа задачи и краевых условий сопоставляли с результатами эксперимента, используя метод регрессии [22].

На рис. 3 представлена видеодиаграмма кинетики разогрева, получаемая тепловизионной системой.

Тепловая дефектоскопия и контроль изделий с помощью обдува потоком горячего воздуха

Контроль изделий больших размеров (трубопроводов, химических реакторов, цистерн и др.) требует специфических методов, которые можно применять как в полевых, так и заводских условиях. С помощью таких методов обнаруживают и локализуют дефектные зоны, характеризуют дефекты количественно, определяют степень их опасности для дальнейшей эксплуатации, оценивают остаточный ресурс. Другими словами, такие методы многофункциональны и мультимасштабны [23, 24].

Стальные сосуды емкостью 1 м^3 с теплоизоляционным (или защитным) слоем на недоступной для оптического контроля стороне обдували горячим воздухом. Динамическое ИК-изображение регистрировали высокоразрешающим тепловизором.

Изначально сосуд и находящаяся в нем вода либо воздух находились в тепловом равновесии с

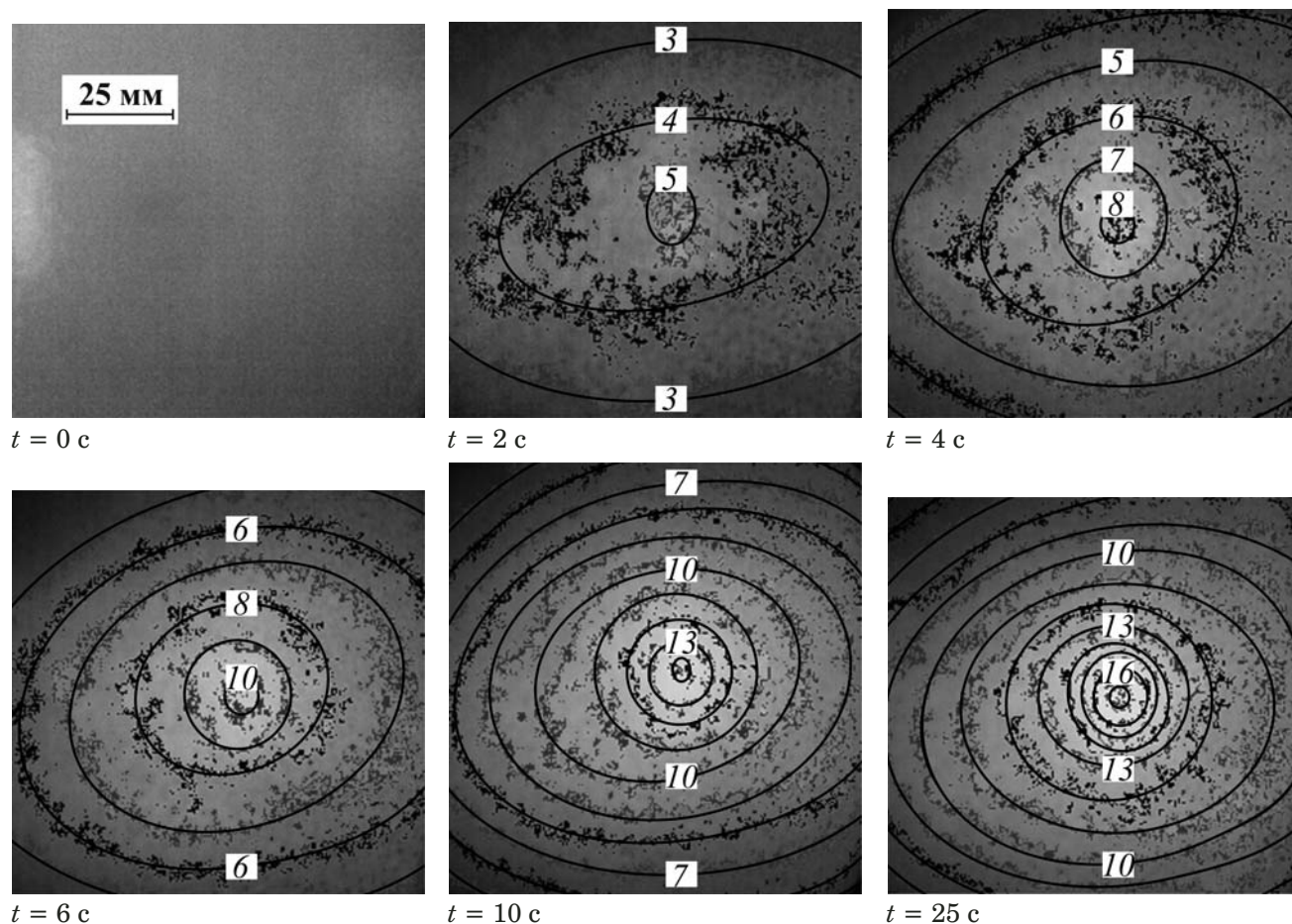


Рис. 3. Видеограмма кинетики разогрева стенки стального сосуда (толщина 1 мм) с локализованным полимерным депозитом в виде диска (радиус 8 и толщина 1 мм) на внутренней поверхности потоком горячего воздуха (точками показаны первичные экспериментальные данные с матрицы тепловизора, относящиеся к изотерме с целым числом градусов ($\pm 0,2^\circ\text{C}$), линиями — сглаженные аппроксимации, цифрами — температуры локального нагрева в данный момент времени относительно температуры до начала обдува)

окружающей средой при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$. В нулевой момент времени наружную сторону стенки сосуда начинали обдувать потоком горячего воздуха с температурой T_x , отличающейся от T_0 на величину $\Delta T_a = T_a - T_0$. Нестационарное температурное поле с наружной стороны оболочки регистрировали тепловизионной видеокамерой.

На интервалах времени, существенно превышающих характерные интервалы Фурье $\tau_i = \delta_i^2 / \chi_i$, где δ_i и χ_i — толщина и теплопроводность i -го слоя, нестационарную задачу теплопередачи через двуслойную стенку можно рассмотреть в квазистационарном приближении, считая тепловой поток внутри каждого слоя установившимся, а зависимость температуры от координаты — линейной. Также полагали, что тепловое сопротивление металлического слоя δ_m / λ_m , где δ_m и λ_m — его толщина и теплопроводность, много меньше такового на границах с внешними средами (α_i^{-1}), а температуру T внутри него мож-

но считать независимой от координаты вдоль направления теплового потока. В этом приближении уравнение теплового баланса системы имеет следующий вид:

$$\alpha_a (\Delta T_a - T) - c_m \frac{dT}{dt} = c_r \frac{d[(T + T_r)/2]}{dt} + \alpha_w T_r = q_s, \quad (1)$$

где α_a и α_w — коэффициенты теплоотдачи на внешних границах для воздуха и воды соответственно; c_m и c_r — теплоемкости для металлического и теплоизоляционного слоев; T_r — температура теплоизолирующего слоя на границе с водой; q_s — плотность теплового потока на границе металлического и теплоизолирующего слоев.

Пренебрегая теплом, поглощенным теплоизолирующим слоем, и, следовательно, избавля-

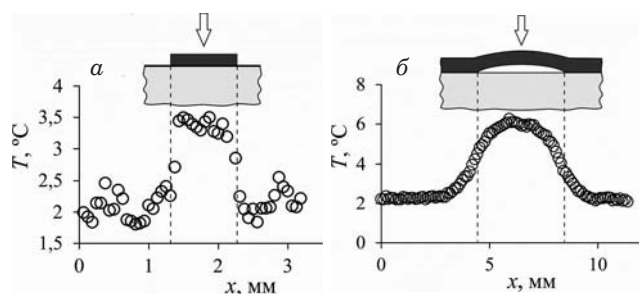


Рис. 4. Температурные профили для наружной металлической поверхности с локальным полимерным покрытием (а) и отслоением защитного покрытия (б) (пунктиром показаны линейные размеры дефекта, на врезках — схемы рассматриваемых случаев, стрелкой — направление потока теплого воздуха)

ясь от члена, пропорционального c_r , принимая $\lambda_r/\delta_r(T - T_r) = \alpha_w T_r$, получаем:

$$T = B \exp\left(-\frac{\alpha_a + \alpha_w}{1 + \text{Bi}_r} \frac{t}{c_m}\right) + \frac{\Delta T_a}{1 + (\alpha_w/\alpha_a)/(1 + \text{Bi}_r)}, \quad (2)$$

где $\text{Bi}_r = \alpha_w \delta_r / \lambda_r$ — число Био для границы с водой; B — константа (при отсутствии теплоизолирующего слоя решение (2), соответствующее $\text{Bi}_r = 0$, остается корректным).

Выделили три характерных интервала времени: τ_1 — соответствует прохождению тепловой волны сквозь металлическую оболочку во внутренний теплоизолирующий слой в нормальном направлении, составляет $\sim 0,1$ с для стальной стенки толщиной $\delta_m = 1$ мм; τ_2 — определяется перераспределением тепла в латеральном направлении в материале стенки на масштабах, сопоставимых с характерным латеральным размером дефекта δ_d , ограничивает сверху интервал времени между началом теплового импульса и оптимальным моментом регистрации распределения температуры в случае, если требуются данные не только о наличии, но и геометрии дефекта; τ_3 — обусловлено размером области подвода тепла от внешнего нагревателя; при времени нагрева $t_h > \tau_3$ существенную роль начинает играть латеральный отток тепла из исследуемой области в окружающие холодные сектора оболочки, что искажает тепловую картину, снижает эффективность нагрева и влечет за собой необходимость использования более мощных источников энергии. Применительно к стальной оболочке τ_3 составляет ~ 100 и ~ 1000 с для областей однородного нагрева радиусами 30 и 100 мм.

При текущем времени t , превышающем τ_1 в несколько раз, пространственное разрешение изображения дефекта на термограмме становится сравнимым с толщиной металлической стенки. В дальнейшем яркость изображения растет, асимптотически приближаясь к некоторому пре-

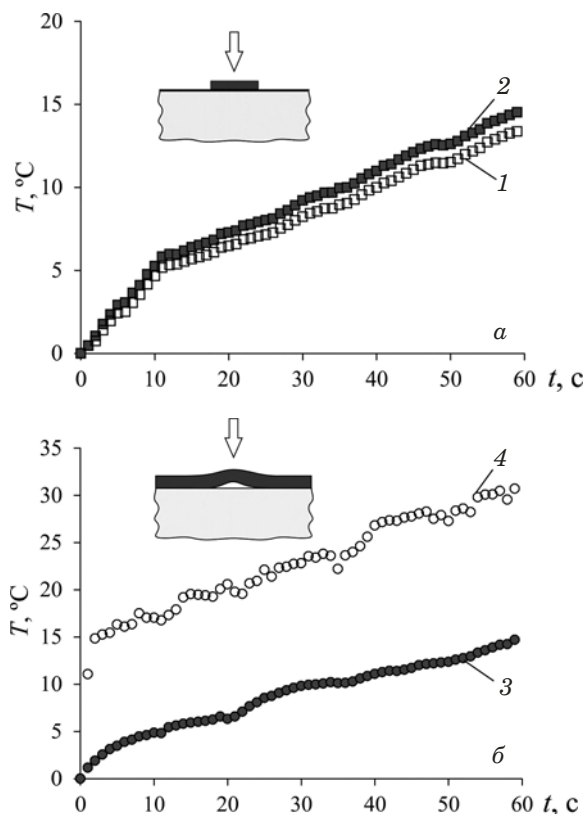


Рис. 5. Временные зависимости температуры нагрева наружной поверхности металлической оболочки: а — без дефектов (1) и с локальным полимерным депозитом (2); б — с однородным полимерным защитным слоем (3) и с отслоением защитного полимерного покрытия (4)

делу, зависящему от размера дефекта (время τ_2), а контрастность падает. При приближении t к τ_3 тепловая картина начинает дополнительно искажаться из-за латерального отвода тепла из обогреваемой области.

Контроль наружной поверхности оболочки. Исследовали стальную пластину (оболочку) толщиной 2 мм, локально ламинированную поливинилхлоридной пленкой толщиной 50 мкм и размером $1 \times 1,5$ мм. Так как тепло- и температуропроводность любого полимерного покрытия (пленка, краска) на 1,5 – 2 порядка меньше, чем металлической стенки, покрытие создает существенное тепловое сопротивление нормальному потоку тепла. Латеральным потоком тепла в пленке в данном случае можно пренебречь. Подвод тепла осуществляли потоком теплого воздуха (температура $T_a = 45^\circ\text{C}$).

На рис. 4, а показан профиль температуры вдоль короткой оси депозита после нагревания в течение 10 с. Видно, что скачкообразный переход от «холодной» к «горячей» области на тепловом изображении занимает 2 – 3 пикселя (около 100 мкм, каждая точка на графике соответствует одному пикселю на ИК-изображении).

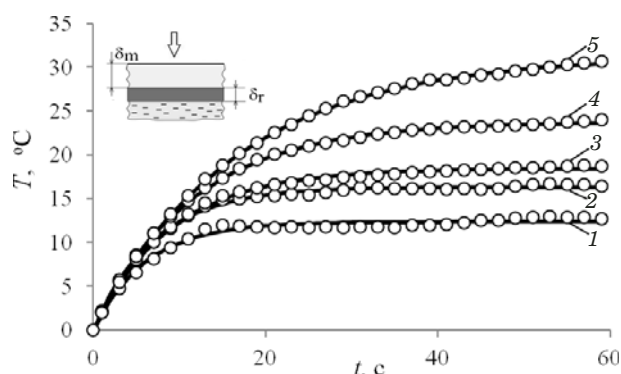


Рис. 6. Временные зависимости температуры нагрева наружной стороны металлической стенки (показаны кружками) и их аппроксимации экспоненциальными функциями (сплошные линии) при толщинах теплоизоляционного слоя δ_r на внутренней стороне 0 (1), 60 (2), 120 (3), 240 (4) и 480 мкм (5) (на врезке показана схема рассматриваемого случая, стрелкой — направление потока теплого воздуха)

Отслоение защитного полимерного покрытия на наружной стороне оболочки (см. рис. 4, б) создает дополнительное тепловое сопротивление потоку тепла вследствие образования тонкой воздушной прослойки, в которой конвективный теплоперенос не эффективен, а теплопроводность воздуха как минимум на порядок меньше, чем у покрытия.

Локальное отслоение (радиус 2 мм) создавали методом индентирования пленки [16 – 19], нанесенной на металлическую подложку. Нагрев осуществляли потоком теплого воздуха температурой $T_a = 65^\circ\text{C}$. Вследствие переменной толщины воздушной прослойки, плавно сходящей к нулю на периферии дефекта, четкие границы объекта отсутствуют, что повлияло на распределение температуры после нагревания в течение 10 с.

Кинетика локального нагрева наружной поверхности оболочки для различных случаев расположения дефекта показана на рис. 5. Видно, что оптимальное время нагрева для выявления дефектов составляет 2 – 3 с (при такой продолжительности тепловой контраст в области дефекта достигает величины, достаточной для количественного анализа). При меньшем времени локальный нагрев поверхности недостаточен для уверенной регистрации тепловизором, а при большем — медленный рост нагрева существенно не влияет на выявляемость дефекта, но снижает производительность контроля.

Контроль внутренней поверхности оболочки. Исследовали ламинированную теплоизоляционным полимерным покрытием внутреннюю поверхность металлической емкости с водой (объем 100 л) из углеродистой конструкционной стали толщиной $\delta_m = 1$ мм. Нагрев осуществляли

квазистационарным однородным воздушным потоком.

На рис. 6 показана кинетика роста температуры внешней стороны емкости, обдуваемой воздухом температурой $T_a = 150^\circ\text{C}$, при разной толщине теплоизоляционного слоя δ_r .

Экспериментальные зависимости аппроксимировали функциями вида $T = A - B \exp(-Dt)$. Из (2) следует

$$A = \frac{\Delta T_a}{1 + (\alpha_w / \alpha_a) / (1 + \text{Bi}_r)},$$

$$D = [\alpha_a + \alpha_w / (1 + \text{Bi}_r)] / c_m.$$

Хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами аппроксимации позволяет при известных параметрах потока воздуха (T_a, α_a) и теплофизических характеристиках материалов из кинетики нагрева наружной поверхности находить значения толщины металлического и неметаллического слоев стенки. Так, минимально определяемая толщина диэлектрического внутреннего слоя (или ее вариации) составила 30 – 50 мкм.

В случае пренебрежимо малой теплопроводности покрытия с дефектом в виде диска радиусом $\delta_d > \delta_m$ и постоянной температуры жидкости, контактирующей со стенкой емкости, температурный контраст изображения можно оценить в приближении одномерной задачи [26]). 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 $T_0 = q\delta_m / \lambda_m$; $\text{Fo} = \chi_m t / \delta_m^2 = t / \tau_1$ — число Фурье; χ_m — температуропроводность металлического слоя; q — плотность подводимого теплового потока.

Для максимальной температуры в центре дефекта имеем:

$$T_c \approx q / \alpha_w [1 - \exp(-\text{Bi}_m \text{Fo})],$$

где $\text{Bi}_m = \alpha_w \delta_m / \lambda_m$ — число Био; α_w — коэффициент теплоотдачи на границе стенка — вода.

Для $\tau_1 \ll t \ll \tau_1 / \text{Bi}_m$ разность температур $T_d = T_\infty - T_c \approx q \alpha_w \delta_m^2 / 2 \lambda_m^2 \text{Fo}^2 = T_0 \text{Bi}_m \text{Fo}^2 / 2$.

При приближении t к τ_2 тепловое изображение начинает размываться. Для оценки кинетики процесса использовали решение задачи о бесконечном цилиндре [26], на образующей которого происходит теплообмен со средой, имеющей температуру, линейно растущую во времени. Для

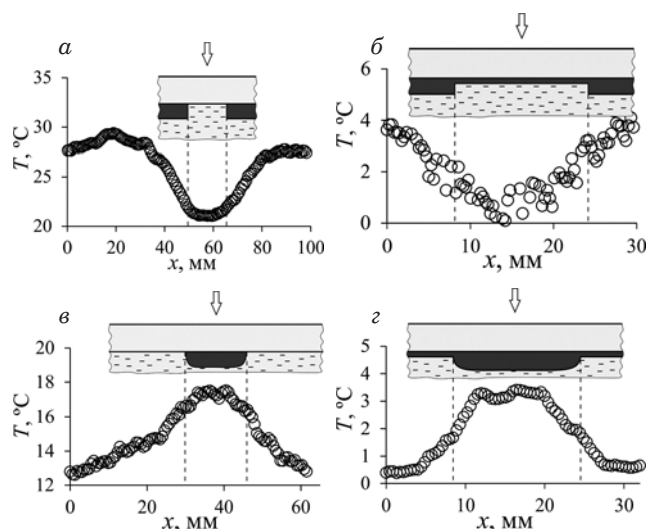


Рис. 7. Температурные профили для внутренней поверхности стальной оболочки со сквозным нарушением защитного полимерного покрытия (а), с неполным нарушением (частичным повреждением) защитного покрытия (б), с нарушением внутренней поверхности в виде наслоения полимерного покрытия толщиной 1 мм (в), с локальным полимерным наслоением толщиной 2 мм на внутренней поверхности защитного покрытия (г) (пунктиром показаны линейные размеры дефекта, на врезках — схемы рассматриваемых случаев, стрелка — направление потока теплого воздуха)

$t > \tau_2/20$ решение на оси цилиндра с точностью лучше 1 % можно упростить до

$$T_d \approx k\delta_d^2 / \chi_m \cdot 0,75[1 - \exp(-1,58\text{Fo}_{lat})], \quad (3)$$

где k — скорость изменения температуры среды, а

$$\text{Fo}_{lat} = \chi_m t / \delta_d^2 = t/\tau_2. \quad (4)$$

Нелинейный рост эффективной разности температур учитывали умножением решения (3), полученного в одномерном приближении, на T_d/kt . Несмотря на то что такая оценка — весьма грубое приближение, для $\text{Fo}_{lat} < 1 - 2$ она дает хорошее совпадение с экспериментальными данными.

На рис. 7 приведены температурные профили для исследуемых типов дефектов защитного полимерного покрытия на внутренней поверхности (радиус $\delta_d = 8$ мм) при нагреве металлической оболочки воздушным потоком ($T_a = 150$ °C).

Наблюдаемую ширину размытия границ изображения дефекта в зависимости от времени оценивали по величине $\text{grad}(T)$, полученного с использованием линейной регрессии экспериментальных данных вблизи проекции границы дефекта на внешнюю сторону.

На рис. 8 представлены временные зависимости разности температур в центре дефекта и

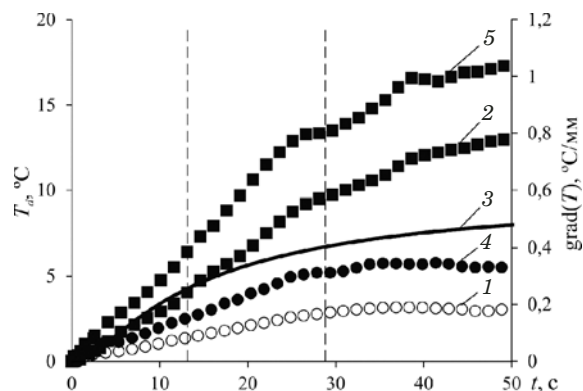


Рис. 8. Временные зависимости T_d (1, 2) и $\text{grad}(T)$ (4, 5) при радиусах дефекта 3 и 8 мм соответственно; 3 — теоретическая кривая в соответствии с математической моделью, учитывающей нелинейный рост T_d (оптимальная длительность нагрева — интервал между пунктирными линиями)

на бесконечности T_d и $\text{grad}(T)$. Видно, что начиная с некоторого времени (порядка τ_2), T_d и $\text{grad}(T)$ растут практически синхронно.

Для оптимизации производительности и чувствительности предлагаемого метода при выборе длительности регистрации следует принимать во внимание следующее. Несмотря на общий рост температуры во всей нагреваемой области скорость изменения T_d уменьшается с течением времени. С некоторого момента ширина границы, выраженная в абсолютных значениях T_d , практически перестает зависеть от времени, а нормированная на максимальную температуру в поле зрения тепловизора — даже начинает падать. Учитывая, что увеличение времени нагрева требует дополнительной энергии и времени, следует выбирать минимально необходимую длительность измерения t_m , которая определяется желаемым уровнем надежности обнаружения дефекта 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. Поскольку при длительности, соответствующей $\text{Fo}_{lat} \gg 1$, T_d сильно зависит от размера дефекта и слабо — от времени, тепловые характеристики системы определяют минимальный размер потенциально выявляемых дефектов. Необходимое для этого время можно оценить из $\text{Bi} \cdot \text{Fo}$ (в нашем случае $\sim 2 - 3$ с).

Применимость метода лимитирует число $\text{Bi}_a = \alpha \delta_r / \lambda_r$ (δ_r и λ_r — толщина и теплопроводность теплоизоляционного слоя), включающее параметры покрытия и границы раздела стенки с воздухом. При $\text{Bi}_a \gg 1$ эффективность метода снижается пропорционально числу Био. В этом

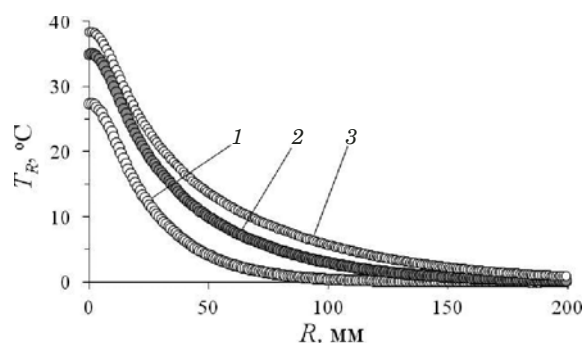


Рис. 9. Радиальное распределение температуры T_R в бездефектной области через 10 (1), 30 (2) и 60 с (3) после начала нагрева

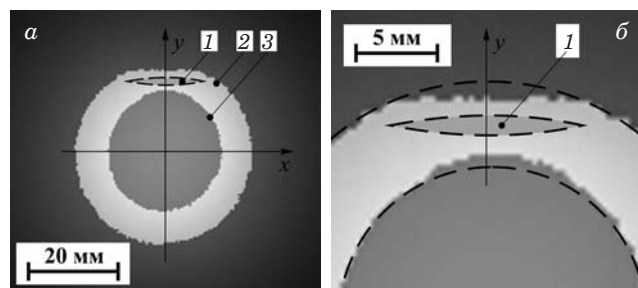


Рис. 10. Картина теплового поля в окрестности локального нагрева стальной оболочки с внутренней несквозной трещиной (а) и в увеличенном масштабе (б) (1 — трещина; 2, 3 — $T = 15$ и 20 °C)

случае можно использовать горячий жидкий теплоноситель и обдув воздухом комнатной температуры.

Контроль изделий с помощью точечного нагрева

Использовали компьютерный анализ нестационарной тепловой картины, создаваемой внешним точечным (диаметр 1 – 3 мм) источником энергии. Средством локального нагрева может быть: сфокусированный лазерный пучок, контакт с предварительно разогретым заостренным металлическим стержнем, «точечный» контактный электрический или вихревой источник джоулева тепла (в электропроводящих изделиях). Такой источник тепла создает в бездефектном контролируемом изделии радиально симметричную тепловую волну, регистрируемую тепловизором.

Положение концентрических круговых изотерм во времени с высокой точностью можно установить путем усреднения информации с большого числа пикселей матрицы тепловизора, лежащих на одном и том же расстоянии от центра изображения пятна нагрева. Наличие дефектов приводит к отклонению формы изотерм от

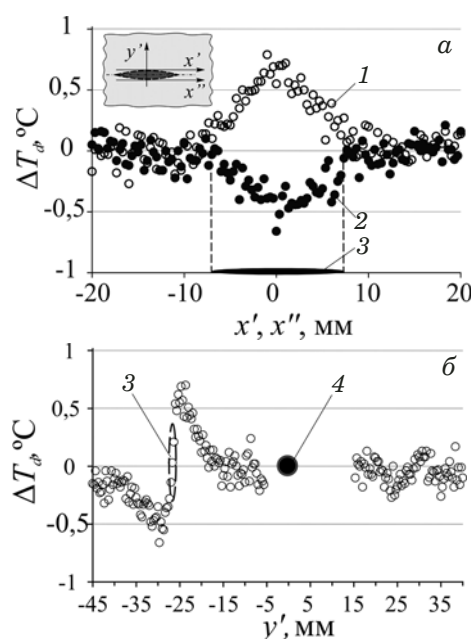


Рис. 11. Температурные профили вдоль осей x' , x'' (а) и y' (б) после разогрева локальным источником тепла металлической оболочки с несквозной трещиной на внутренней стороне (1, 2 — перед и после трещины; 3, 4 — положения трещины и пятна локального нагрева)

окружностей, что и является диагностическим признаком.

Исследовали металлическую емкость (объем 1 м^3) из малоуглеродистой конструкционной стали Ст3 толщиной 3 мм. Нагрев создавали лазером мощностью 10 Вт (длина волны 450 нм) с регулируемой длительностью импульса или посредством контакта с предварительно разогретым (до 150 °C) заостренным медным стержнем. Установили, что в однородном материале или многослойной бездефектной оболочке изотермы действительно могут быть с высокой точностью аппроксимированы концентрическими окружностями.

Радиальное распределение температуры T_R в бездефектной области представлено на рис. 9 (R — расстояние до точки нагрева).

При наличии дефектов в их окрестности наблюдаются искажения концентрических изотерм. На рис. 10 показана мгновенная картина изотерм в области, содержащей несквозную поперечную трещину длиной $L = 15$ мм на тыльной (по отношению к расположению тепловизора) поверхности стенки. Видно, что концентрические изотермы имеют изгиб наружу ($T = 20$ °C) и к центру ($T = 15$ °C), что обусловлено влиянием трещины, которая вносит дополнительное термическое сопротивление распространению тепла (ближний к источнику тепла край трещины приобретает несколько большую температуру относительно без-

дефектной области на том же расстоянии от источника, а дальний — меньшую).

Вычитание усредненной по углу φ температуры T_R , соответствующей бездефектной области, из матрицы дефектного участка T дает возможность обнаруживать вариации температурного поля ΔT_d гораздо меньших дефектов, чем при визуальной инспекции. На рис. 11 показаны распределения локальной дифференциальной температуры нагрева ΔT_d , обусловленной наличием дефекта — несквозной трещины длиной $L = 15$ мм на тыльной поверхности стенки, в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см. врезку, рис. 11, а).

Максимальный перепад температур $\Delta T_{\max}$ между наиболее и наименее нагретыми областями в зоне залегания трещины зависит от ее длины, относительной глубины (по отношению к толщине стенки), а также угла φ между ее длинной осью и направлением на точечный источник тепла и расстояния до него R (рис. 12). В наиболее благоприятных условиях ($\Delta T_{\max}$ в зоне расположения дефекта в три раза превышает шум) используемый метод позволяет обнаруживать и характеризовать трещины длиной порядка 1 мм.

Если нагревательный стержень снабдить острым наконечником (например, алмазным индентором) и механическим приводом [16, 17, 20], то с их помощью можно локально нагружать дефектную область и стимулировать развитие трещины, фиксируя рост ее длины или глубины по увеличению максимального перепада температур в ее окрестности при повторном тепловом контроле. При этом сила P , необходимая для провоцирования роста дефекта, — мера опасности разрушения и остаточного ресурса конструкции.

Помимо контроля дефектности определяли и теплофизические характеристики объекта. Скорость распространения тепловой волны от точки нагрева (в пренебрежении теплообменом с окружающей средой, что оправдано при достаточно динамичном нагреве) зависит только от коэффициента температуропроводности материала стенки χ (или эффективного коэффициента температуропроводности композита).

Зависимость температуры T от времени t и расстояния R при нагреве пластины толщиной δ_m заданным тепловым потоком Q , распространяющимся из пятна радиуса R_0 на бесконечность [26], можно оценить как

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda\delta_m} \ln \frac{4\chi t}{\gamma R^2} + O\left(\frac{R_0^2}{\chi t}\right), \quad (5)$$

где $\gamma \approx 0,5772$ — постоянная Эйлера; $O(R_0^2/\chi t)$ — учитывает конечный размер пятна нагрева (при

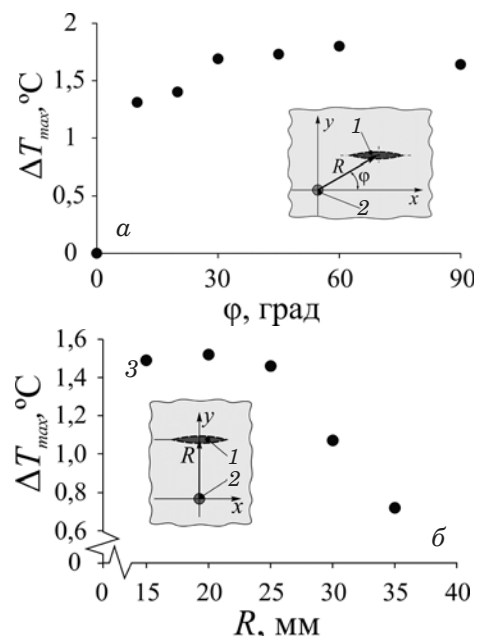


Рис. 12. Зависимость $\Delta T_{\max}$ (наружная сторона металлической стенки) в окрестности трещины от угла φ между направлением длинной оси дефекта и радиус-вектором, проведенным к его центру от пятна локального нагрева (а), и R (б) (1 — трещина; 2 — пятно локального нагрева)

достаточно большом t вторым членом уравнения можно пренебречь).

Фиксируя температуру в некоторой заранее выбранной (референтной) точке $T_1(R_1, t_1)$ и отношение температур в ней и искомой точке $T_2(R_2, t_2)$, подставляя $\beta = T_2(R_2, t_2)/T_1(R_1, t_1)$ в (5) получаем

$$\beta \ln \frac{4\chi t_1}{\gamma R_1^2} = \ln \frac{4\chi t_2}{\gamma R_2^2}.$$

Откуда

$$\chi = \frac{\gamma}{4} \left[\frac{R_2^2}{t_2} \left(\frac{R_1^2}{t_1} \right)^{-\beta} \right]^{\frac{1}{1-\beta}}. \quad (6)$$

Таким образом, алгоритм определения χ следующий: 1) для нескольких t от начала нагрева

Коэффициент температуропроводности χ , мм²/с (референтная точка: $R_1 = 7$ мм, $t_1 = 60$ с, $T_1 = 33,57$ °C)

Температура T_2 , °C	Время от начала нагрева t_2 , с		
	10	20	30
14	13,06	12,84	12,62
16	12,73	12,57	12,22
18	12,59	12,50	12,09
20	12,58	12,65	12,14
22	12,30	12,88	12,29

определяем центр осесимметричного распределения температур, усредняем температуры по углу φ и строим зависимость T_R от расстояния R до центра для каждого выбранного значения t (возможно, с предварительным усреднением нескольких кадров); 2) референтную точку выбираем при максимальном t (например, $t = 60$ с) и расстоянии большем радиуса пятна нагрева; 3) выбираем значение отношения искомой T_2 и референтной T_1 (оптимально $\beta \approx 0,5$); 4) при некотором заданном t_2 находим расстояние R_2 до точки с температурой T_2 ; 5) по формуле (6) вычисляем χ .

В таблице приведены рассчитанные значения коэффициента температуропроводности χ для случая импульсного точечного нагрева. Видно, что χ слабо зависит от заданных t_2 и R_2 . Среднее значение $\chi_m = 12,54 \pm 0,27$ мм²/с совпадает с табличными данными для малоуглеродистых сталей (среднеквадратичное отклонение составляет всего 2 %). Варьирование величины T_1 в некоторых разумных пределах также практически не влияет на результат. Учитывая, что $\lambda = \chi \rho c_m$, а плотность ρ и удельная теплоемкость c_m материала обычно известны, знание χ дает возможность определить λ . Так, для стали Ст3 ($\rho = 7870$ кг/м³, $c_m = 0,486$ кДж/кг · К) при $\chi_m = 12,54$ мм²/с значение $\lambda = 48$ Вт/(м · °С) (совпадает с табличным).

Таким образом, предложенные методы позволяют осуществлять контроль состояния оболочных и листовых изделий (сосудов, трубопроводов, реакторов, элементов фюзеляжа летательных аппаратов и др.) с покрытиями и без, определять теплофизические характеристики материалов. Они дают возможность выявлять дефекты покрытий и основного материала не только на наружной стороне оболочки, но и на внутренней, недоступной для прямого визуального инспектирования. Разработанные методы также позволяют проводить мультимасштабные исследования, регистрировать и характеризовать дефекты размерами от десятков микрометров. Приложение локальной силовой нагрузки с повторной термографией дефектной зоны дает возможность выявлять опасные дефекты и определять степень опасности их последующего развития, а также оценивать остаточный ресурс и возможность дальнейшей эксплуатации изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев В. В., Артемов Б. В., Матвеев В. И. Состояние и развитие методов технической диагностики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 4. С. 73 – 78.
2. Клюев В. В., Артемьев Б. В. О развитии неразрушающего контроля и технической диагностики в России / Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 45 – 60.
3. Труханов В. М., Клюев В. В. Надежность, испытания, прогнозирование ресурса на этапе создания сложной техники. — М.: Спектр, 2014. — 312 с.
4. Махутов Н. А. Базовые характеристики конструкционных материалов при комплексной оценке прочности, ресурса и живучести опасных объектов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. С. 62 – 70.
5. Ibarra-Castaneda C., Maldague X. Infrared Thermography / In Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems. — Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 175 – 220.
6. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. — М.: Спектр, 2009. — 544 с.
7. Oswald-Tranta B. Thermo-inductive crack detection / Non-destructive Testing and Evaluation. 2007. Vol. 22. N 2 – 3. P. 137 – 153.
8. Vavilov V. P., Burleigh D. D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing / NDT & E International. 2015. Vol. 73. P. 28 – 52.
9. Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G. Thermal (IR) and other NDT techniques for improved material inspection / Journal of nondestructive evaluation. 2016. Vol. 35. P. 18.
10. Gao B., Woo W., Tian G. Electromagnetic thermography non-destructive evaluation: Physics-based modeling and pattern mining / Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 25480.
11. Абрамова Е. В. Тепловой контроль в экспертизе промышленной безопасности / Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 93 – 95.
12. Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A. Electric Thermal Inspection of Metal Sheets / Technical Physics Letters. 2017. Vol. 43. N 10. P. 899 – 901.
13. Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A. Non-stationary thermal flaw detection of coatings of the outer and inner surfaces of metal shells / Technical Physics Letters. 2017. Vol. 43. N 12. P. 1128 – 1131.
14. Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A. Characterization of metal shells with backside coating using non-stationary thermography / Russian Physics Journal. Vol. 60. N 12. P. 180 – 181.
15. ISO 20473. Optics and photonics — Spectral bands. 2007. — 10 p.
16. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
17. Головин Ю. И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрорежимах (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 1. С. 45 – 59.
18. Golovin Yu. I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: a review / Physics of the Solid State. 2008. Vol. 50. N 12. P. 2205 – 2236.
19. Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Aslanyan E. G., Pirozhkova T. S., Vasyukov V. M. The physical and mechanical properties and local deformation micromechanisms in materials with different dependence of hardness on the depth of print / Physics of the Solid State. 2017. Vol. 59. N 9. P. 1803 – 1811.
20. Viktorov S. D., Kochanov A. N., Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Shuklinov A. V., Shuvarin I. A., Pirozhkova T. S. Micro- and nano-indentation approach to strength and deformation characteristics of minerals / Journal of Mining Science. 2014. Vol. 50. N 4. P. 652 – 659.
21. Golovin Yu. I., Tyurin A. I. Dynamics and micromechanisms of the deformation of ionic crystals in pulsed microindentation / Physics of the Solid State. 1996. Vol. 38. N 6. P. 1000 – 1003.
22. Шубочкин А. Е. К вопросу о формализации образов дефектов посредством регрессионной фильтрации / Контроль. Диагностика. 2014. N 9. С. 25 – 30.
23. Синев А. И., Морозов А. К., Братчиков Д. Ю. Дефектоскопия магистральных трубопроводов в реальном времени / Территория Нефтегаз. 2010. № 11. С. 34 – 35.
24. Гумеров А. Г., Медведев А. П., Худякова Л. П., Фаритов А. Т., Рождественский Ю. Г. Концепция развития

системы технического диагностирования промышленных трубопроводов / Нефтяное хозяйство. 2005. № 1. С. 78 – 83.

25. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
26. **Carlsaw H. C., Jaeger J. C.** Conduction of Heat in Solids. — Oxford University Press, 1959. — 510 p.

REFERENCES

1. **Klyuev V. V., Artemov B. V., Matveev V. I.** Update status and development of the methods for technical diagnostics / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 4. P. 73 – 78 [in Russian].
2. **Klyuev V. V., Artem'ev B. V.** On the question of non-destructive testing and technical diagnostics in Russia / *Kontrol'. Diagn.* 2014. N 3. P. 45 – 60 [in Russian].
3. **Trukhanov V. M., Klyuev V. V.** Reliability, testing, resource forecasting at the stage of complex technology creation. — Moscow: Spektr, 2014. — 312 p. [in Russian].
4. **Makhutov N. A.** Basic characteristics of structural materials in integrated assessment of strength, resource and survivability of dangerous installations / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 1. P. 62 – 70.
5. **Ibarra-Castanedo C., Maldague X.** Infrared Thermography / In *Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems.* — Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 175 – 220.
6. **Vavilov V. P.** Infrared thermography and thermal control. — Moscow: Spektr, 2009. — 544 p. [in Russian].
7. **Oswald-Tranta B.** Thermo-inductive crack detection / *Non-destructive Testing and Evaluation.* 2007. Vol. 22. N 2 – 3. P. 137 – 153.
8. **Vavilov V. P., Burleigh D. D.** Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing / *NDT & E International.* 2015. Vol. 73. P. 28 – 52.
9. **Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.** Thermal (IR) and other NDT techniques for improved material inspection / *Journal of nondestructive evaluation.* 2016. Vol. 35. P. 18.
10. **Gao B., Woo W., Tian G.** Electromagnetic thermography non-destructive evaluation: Physics-based modeling and pattern mining / *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6. P. 25480.
11. **Abramova E. V.** Thermal control in industry safety expertise / *Kontrol'. Diagn.* 2014. N 3. P. 93 – 95 [in Russian].
12. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A.** Electric Thermal Inspection of Metal Sheets / *Technical Physics Letters.* 2017. Vol. 43. N 10. P. 899 – 901.
13. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A.** Non-stationary thermal flaw detection of coatings of the outer and inner surfaces of metal shells / *Technical Physics Letters.* 2017. Vol. 43. N 12. P. 1128 – 1131.
14. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Golovin D. Yu., Samodurov A. A.** Characterization of metal shells with backside coating using non-stationary thermography / *Russian Physics Journal.* Vol. 60. N 12. P. 180 – 181.
15. **ISO 20473.** Optics and photonics — Spectral bands. 2007. — 10 p.
16. **Golovin Yu. I.** Nanoindentation and its capabilities. — Moscow: Mashinostroenie, 2009. — 312 p. [in Russian].
17. **Golovin Yu. I.** Nanoindentation as an instrument for integrated evaluation of physicomechanical properties of materials in submicrovolumes (a review) / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2009. Vol. 75. N 1. P. 45 – 59.
18. **Golovin Yu. I.** Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: a review / *Physics of the Solid State.* 2008. Vol. 50. N 12. P. 2205 – 2236.
19. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Aslanyan E. G., Pirozhkova T. S., Vasyukov V. M.** The physical and mechanical properties and local deformation micromechanisms in materials with different dependence of hardness on the depth of print / *Physics of the Solid State.* 2017. Vol. 59. N 9. P. 1803 – 1811.
20. **Viktorov S. D., Kochanov A. N., Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Shuklinov A. V., Shuvarin I. A., Pirozhkova T. S.** Micro- and nano-indentation approach to strength and deformation characteristics of minerals / *Journal of Mining Science.* 2014. Vol. 50. N 4. P. 652 – 659.
21. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I.** Dynamics and micromechanisms of the deformation of ionic crystals in pulsed microindentation / *Physics of the Solid State.* 1996. Vol. 38. N 6. P. 1000 – 1003.
22. **Shubochkin A. E.** The question of formalization images of defects through regression filter / *Kontrol'. Diagn.* 2014. N 9. P. 25 – 30 [in Russian].
23. **Sinev A. I., Morozov A. K., Bratchikov D. Yu.** Flaw detection of main pipelines in real time / *Terr. Neftegaz.* 2010. N 11. P. 34 – 35 [in Russian].
24. **Gumerov A. G., Medvedev A. P., Khudyakova L. P., Fari-tov A. T., Rozhdestvenskii Yu. G.** The concept of the development of a system for the technical diagnosis of field pipelines / *Neft. Khoz.* 2005. N 1. P. 78 – 83 [in Russian].
25. **Mikheev M. A., Mikheeva I. M.** Fundamentals of heat transfer. 2nd Edition. — Moscow: Energiya, 1977. — 344 p. [in Russian].
26. **Carlsaw H. C., Jaeger J. C.** Conduction of Heat in Solids. — Oxford University Press, 1959. — 510 p.