

Раздел пятый

ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.791.81

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ АКУСТОТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.И. Базалеев, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко
Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,
Харьков, Украина
E-mail: ntsefo@yahoo.com

Предложен и апробирован термографический метод дефектоскопии на основе акустической активации тепловых полей в среде объекта контроля. Метод базируется на особенностях процессов трансформации энергии акустических волн в тепло на неоднородностях в твердых телах и открывает принципиально новые перспективы использования неразрушающих методов теплового контроля. Для практической реализации данного метода необходимо создание определенного акустического воздействия на объект контроля (активационное действие), при котором значения термоаномалий температурных полей на дефектных структурах, проявляющихся на поверхности, являются достаточными для идентификации дефектов современными тепловизионными системами.

ВВЕДЕНИЕ

Современные энергетические комплексы, оснащенные технологическим оборудованием с критическими сроками эксплуатации, требуют разработки новых и совершенствования существующих технологий неразрушающей дефектоскопии, которые обеспечивают высокую производительность, эффективность, качество и достоверность контроля. Пребывание конструкционных материалов в условиях действия критических нагрузок (тепловых, радиационных, механических и пр.) сопровождается образованием большого количества неконтролируемых микродефектов, которые выявляются, как правило, при разрушении конструкций. Детальное рассмотрение проблемы оценки ресурса и возможности удлинения сроков дальнейшей эксплуатации оборудования требует решения сложных задач технической дефектоскопии, в том числе разработки стратегии выявления как имеющихся дефектов, так и прогнозирования возможности их образования при различных условиях эксплуатации оборудования.

К числу наиболее перспективных и эффективных направлений развития методов неразрушающей дефектоскопии относятся тепловые методы неразрушающего контроля на основе тепловизионного мониторинга [1,2]. Тепловизионный контроль хорошо дополняет существующие методы дефектоскопии, а в отдельных случаях является единственным методом выявления и локализации специфических дефектов на ранней стадии их возникновения; позволяет прогнозировать развитие аварийных ситуаций. Эффективность современных неразрушающих методов оперативного контроля деградационных процессов в металлах может быть существенно повышена в результате развития методов активного термографического контроля на основе

акустической активации температурных полей на дефектных структурах конструкционных материалов. Метод базируется на контроле температурных полей с помощью технологий тепловизионной инфракрасной (ИК) радиометрии [3]. Пространственно-временное распределение температуры на поверхности излучения физических тел является носителем информации (информационным полем) о внутренней структуре тела и скрытых дефектах. Идентификация поверхностных температурных аномалий, которые возникают в местах существования внутренних дефектов, осуществляется на основе анализа изменений температурного поля на поверхности излучения тел после акустического воздействия.

Важным направлением для дальнейшего развития термографических методов являются изучение физических процессов, которые способны приводить к образованию диссипативных структур, в том числе тех, которые приводят к перераспределению температурных полей, вызванных дефектной структурой образца, а также использование эффекта локального увеличения температуры в зоне трещины при приложении к деформированному объекту циклической нагрузки. Процессы трансформации энергии акустических волн в тепло на неоднородностях в твердых телах открывают принципиально новые перспективы использования неразрушающих методов теплового контроля. Для практической реализации данного метода необходимо создание определенного акустического воздействия на объект контроля (активационное действие), при котором значения термоаномалий температурных полей на дефектных структурах, проявляющихся на поверхности, являются достаточными для идентификации дефектов современными тепловизионными системами.

АКУСТИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ

Существующие теоретические подходы к моделированию процессов генерации, распространения и рассеивания тепловых (температурных) волн в твердотельных объектах с неоднородностями различной формы и разной физической природы позволяют установить в общем виде связь тепловых процессов (температурных полей) с характеристиками неоднородностей (дефектов) [4,5]. Принимая во внимание данные анализа объективно существующих связей характеристик материала с параметрами внешнего воздействия и реакцией на эти воздействия, а также исследования динамической саморегулирующей модели материала, изменяющего свои параметры в зависимости от амплитудных и частотных характеристик внешнего воздействия, представляется перспективным термографический (тепловой) метод дефектоскопии на основе акустической активации тепловых полей в среде объекта контроля [6]. В основе такого метода нахождения дефектов лежат особенности распространения и поглощения акустических волн в реальных твердых телах, которые сопровождаются переходом части энергии упругих волн в тепловую. При наличии участков повышенного термического и акустического сопротивлений (дефекты нарушения сплошности среды, трещины, расслоения и пр.) на поверхности объекта контроля формируется температурное поле, в котором заложена информация о структурных особенностях твердых тел (рис. 1).

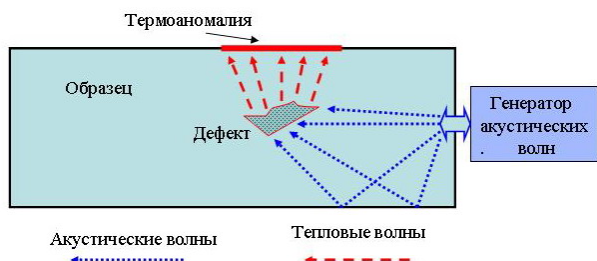


Рис. 1. Формирование термоаномалий на поверхности твердых тел при рассеянии энергии акустических волн на дефектах

Формирование температурного поля происходит как в результате прямого преобразования (диссипации) энергии акустической волны в тепловую энергию на дефектных структурах, так и влияния акустических волн на механизм перераспределения существующих в системе тепловых потоков за счет изменения теплофизического состояния материалов дефектных структур. Реальные среды, в отличие от идеальных, характеризуются наличием различного рода неоднородностей в среде, которые приводят к уменьшению интенсивности акустических волн вследствие рассеяния (поглощения) их энергии. На величину рассеяния акустических волн в среде влияют соотношения размеров неоднородностей и

длины облучаемых волн (области рэлеевского, стохастического и диффузного рассеяний), эффекты превращения на границах зерен продольных волн в поперечные и пр. Для простейших случаев, когда размеры рассеивателя много меньше длины волны (задача Рэлея для сферического рассеивателя), интенсивность рассеянных волн пропорциональна четвертой степени частоты падающей волны. В реальных средах рассеиватели и формируемые ими поля имеют более сложный вид, что способствует росту потерь акустических волн.

Действие акустических волн в твердых телах вызывает изменение давления и плотности, а также необратимые потери энергии, связанные с физическими процессами поглощения сред на микроскопическом уровне, отклонением термодинамических характеристик от равновесных значений. Максимальное значение акустического давления p_{max} может быть рассчитано по формуле:

$$p_{max} = \omega \rho c \xi_{max} = 2\pi \nu \rho c \xi_{max}, \quad (1)$$

где ω - циклическая частота; ξ_{max} - амплитуда смещения частиц среды при прохождении волн; ν - частота изменения периодических величин; ρ - плотность среды; c - скорость распространения волн.

Амплитуда акустической волны по мере распространения в упругой теплопроводящей среде уменьшается по экспоненциальному закону:

$$\dot{v} = v_m e^{-jkz}. \quad (2)$$

Под действием акустического давления (как переменной, так и постоянной составляющей) твердые тела изменяют свои размеры и форму, происходит деформация (последовательное разряжение и сжатие) среды, величина которой зависит от удельного акустического сопротивления среды: $Z = \rho c$. Полная плотность энергии акустической волны представляет собой сумму кинетической $\bar{\omega}_k$ (запасается в движущихся частицах среды) и потенциальной $\bar{\omega}_p$ (энергия упругой деформации - идет на увеличение внутренней энергии среды) составляющих энергии:

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_k + \bar{\omega}_p = \frac{\rho V^2}{2} + \frac{\beta p^2}{2}, \quad (3)$$

где V - скорость частиц среды; β - коэффициент объемной сжимаемости среды; p - акустическое давление (для бегущей акустической волны $p = \pm \rho c V$).

Величина плотности энергии E , переносимой плоской упругой волной, определяется исходя из значения плотности потока мощности \bar{w}_n как

$$\bar{w}_n = pV = \frac{p^2}{\rho c} = \rho c V^2 = cE. \quad (4)$$

Уравнение справедливо для гармонических волн, для сред, у которых отсутствует дисперсия звука, когда энергия в бегущей волне переносится со скоростью звука.

В твердых телах наряду с внутренним трением и релаксационными процессами, связанными с установлением термодинамического равновесия,

существуют потери на упругий гистерезис и пластическую деформацию, происходит затухание волн вследствие частичной затраты энергии на работу против сил трения, механического сопротивления (сил упругости), сил инерции и массы. Часть поглощенной энергии преобразуется в тепло и необратимые структурные изменения. В результате поглощения акустической энергии происходит перенос энергии с более нагретых участков в менее нагретые.

Особенностью распространения упругих волн в металлах является их взаимодействие с дефектами кристаллической структуры, в первую очередь с дислокациями. В общем случае вдоль произвольного направления в кристаллических материалах может распространяться множество квазипродольных и квазипоперечных волн. Процесс затухания упругих колебаний в металлах имеет сложную природу и зависит от частоты и амплитуды колебаний, температуры образца, его строения, величины зерна, текстуры, длины акустической волны и пр. Причинами затухания акустических волн являются как рассеяние, обусловленное поликристаллическим характером структуры металлов (определяется величиной кристаллитов, дислокаций и упругой анизотропией кристаллической решетки), так и присутствие в структуре составляющих, имеющих различные акустические характеристики поглощения, а также действие растягивающих/сжимающих напряжений в металлах. На затухание волн в реальных твердых телах оказывают влияние пористость и колебания дислокаций в кристаллической решетке твердых тел, наличие примесных атомов и количество точек закрепления колеблющихся дислокаций. Количественная оценка на основе теоретических расчетов влияния пористости на величину затухания волн затруднительна из-за сложности моделирования такого вида дефектов. По данным экспериментальных исследований при пористости примерно 1% (по объему) величина затухания возрастает более чем на порядок. Небольшие пластические деформации (0,1...1%) могут приводить к резкому возрастанию коэффициента затухания акустических волн за счет увеличения плотности дислокаций. При приложении механического напряжения в металлах изменяются его поликристаллическая структура, микропористость, микротрещиноватость включений, плотность и количество дислокаций, а также изменяется скорость распространения волны, что является основной причиной значительного увеличения (в несколько раз) затухания волн по сравнению с ненапряженным состоянием. Затухание волн увеличивается с ростом пластической деформации металлов в результате изменения дислокационной структуры. С ростом напряжений, при достижении предела текучести, связь становится нелинейной и достигает максимума при разрушающем напряжении. Явление упругой анизотропии в поликристаллических структурах вызывает значительное рассеяние акустических

волн. Присутствие в структуре материала включений фаз, имеющих различные акустические характеристики (модуль упругости, плотность), приводит к рассеянию упругих волн, величина которого определяется формой, размерами и характером расположения фаз в структуре. Рассеяние упругих волн происходит при наличии в средах неоднородностей и границ раздела с разными удельными акустическими сопротивлениями. При падении упругой волны на границу раздела двух сред она будет частично отражаться в первую среду, а частично проникать во вторую среду.

При рассеянии акустической волны от препятствий результирующее поле является суммой первичных и вторичных (в том числе и многократно рассеянных) волн. На результирующее поле упругих волн в замкнутых объемах большое влияние оказывают физические параметры ограничивающих поверхностей. Эффект частичного или полного отражения акустической волны наблюдается на границе раздела сред с различными свойствами.

ВИБРОАКТИВАЦИЯ СРЕД

При действии вибрации на твердые тела (элементы конструкции оборудования) возникают упругие волны, при этом ускорение и скорости разных точек свободного тела зависят от его деформированного состояния, определяемого точками закрепления (опорами) тела, величины сил инерции и энергии упругих волн вибрации. Формирование температурных аномалий на дефектах элементов конструкции вследствие интенсивной трансформации энергии вибрации в тепло, см. работу [7], можно рассматривать как альтернативу тепловой активации сред акустическими волнами в активном методе теплового контроля.

Энергия вибрации и термоупругих напряжений

Тепловизионная дефектоскопия оборудования, основанная на использовании энергии вибрации технологического оборудования и упругости материалов, позволяет существенно расширить эффективность неразрушающих методов контроля для выявления дефектов на ранней стадии их возникновения. Энергия вибрации естественного происхождения, являющаяся причиной активации температурных полей в области дефектов и узлов сочленения, может быть использована как для тепловизионного контроля конструкционных материалов машин и механизмов, являющихся источником вибрации, так и для контроля оборудования, по которому распространяется энергия упругих волн. Низкочастотная и среднечастотные составляющие вибрации способны распространяться в металлических конструкциях на значительные расстояния от источника вибраций. При распространении упругих волн (проявление волновых свойств вибрации) энергия вибрации может трансформироваться в тепловую на вибропоглощающих неоднородностях (дефектах), создавая «температурный портрет» зоны

поглощения энергии упругих волн, на основе которых выявляются дефекты или структурные изменения материалов.

Тепловизионный контроль термоупругих напряжений и деформаций в конструкционных материалах основан на использовании процессов преобразования механической энергии в тепловую, которые сопровождаются возникновением температурных градиентов при механическом сжатии или растяжении в твердых телах. При пульсациях температуры в отдельных элементах или узлах оборудования возникают температурные градиенты, которые инициируют соответствующие им термоупругие напряжения и возникновение микротрещин. Тепловизионный контроль позволяет решить проблему контроля дефектообразующих зон в местах концентрации напряжений и вибрационных нагрузок, характеризующихся повышенным тепловыделением.

При обследовании конструкционных материалов, работающих в условиях вибрации, необходимо учитывать демпфирующую способность материала - способность поглощать энергию на необратимые процессы при циклическом его деформировании. На рассеяние энергии в циклически деформируемом материале влияют такие факторы, как размеры образца (форма и размеры поперечного сечения), величина амплитуды и частота напряжений, температура, вид напряженного состояния, соотношение частот циклического деформирования, упругий гистерезис и пр. Проявление упругого гистерезиса в конструкционных металлах выражается в том, что при упругом циклическом нагружении и разгрузке одни и те же деформации получаются при разных напряжениях. При циклическом повторении нагрузки и разгрузки во время каждого деформационного цикла на зёрнах кристалла за счет местной пластической деформации и остаточных напряжений выделяется энергия в виде тепла, численно равная площади петли упругого гистерезиса (рис. 2).

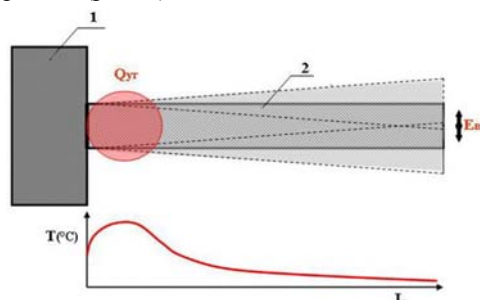


Рис. 2. Выделение энергии упругого гистерезиса при циклическом деформировании конструкционных материалов

Амплитуда температуры стабилизируется, как только подвод энергии извне сравняется с рассеянием её через петлю упругого гистерезиса. Динамическая напряженность материалов при их циклической деформации может контролироваться по тепловой энергии рассеяния, регистрируемой, например, тепловизионными методами контроля.

Выявление изменения демпфирующих характеристик материалов наиболее ответственных узлов технологического оборудования и конструкций в процессе их эксплуатации является чрезвычайно важной частью работ промышленной дефектоскопии, направленной на выявление дефектов типа «усталостное разрушение». Эффект ослабления акустических волн при упругих напряжениях в металлах может быть использован для вибротепловизионной дефектоскопии прочностного состояния конструкционных материалов.

Энергия активации

Активные термографические методы неразрушающего контроля (дефектоскопии) базируются на анализе температурных полей, стимулированных внешним воздействием. Энергия активирующего воздействия должна быть такой, чтобы обеспечить значение температурного контраста термоаномалий, обусловленных дефектами, на уровне, который может быть зафиксирован тепловизионными средствами контроля. Необходимо искать оптимальный баланс соотношения энергии активации $E_{акт}$ и тепловой энергии информационного потока $E_{инф}$, которая является частью энергии активации, выделившейся в виде тепла на дефектной структуре и сформировавшей температурный контраст на поверхностном информационном поле ИК-излучения. Такая задача решается путем более широкого привлечения физических моделей, с помощью которых устанавливается взаимосвязь между процессами поглощения энергии активации в дефектных областях и их тепловым проявлением. Перспективным является использование в качестве энергии активации синхронного действия внешних активирующих полей разной физической природы (например, акустического и теплового) и корреляционных методов анализа информационных полей. При этом необходимо исходить из того, что существует некоторое критическое значение параметров активирующих полей, при котором инициируется процесс структурной перестройки внутренних тепловых потоков, формируется особый термодинамический режим, отражающий специфику строения и динамику связей внутри контролируемого тела (системы тел). Тело переходит в самосогласованный режим, в новое состояние с более высоким уровнем информативности поверхностного температурного поля, термодинамическое равновесие которого определяется величиной энергетических потоков, поступающих в него извне. Для повышения информативности поверхностного температурного поля необходимо установить оптимальное значение внесенной мощности, которая переводит систему в состояние информационного оптимума.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ИК-РАДИОМЕТРИЯ

Возможности тепловизионной дефектоскопии существенно расширяются при использовании энергии вибрации в качестве источника тепловой

активации и принципов корреляционной ИК-радиометрии для идентификации дефектов [6]. Корреляционная ИК-радиометрия как активный метод неразрушающего контроля объединяет возможности теплового и акустического методов активации исследуемых сред, расширяет возможности идентификации дефектов на основе анализа причин происхождения температурных аномалий, их связи с неоднородностями и дефектными структурами среды, учета действия внешних факторов, создающих ложные температурные аномалии. Возможность периодического нагрева дефектных структур акустической волной позволяет, путем сравнения параметров поверхностных температурных аномалий до и после воздействия акустической волны и использования методов корреляционной обработки, идентифицировать дефекты и их местоположение. Корреляционная обработка улучшает соотношение полезный сигнал/шум/помеха (ΔT возрастает). Эффективность выявления дефектов зависит от амплитуды активированной термоаномалии (ограничивается уровнем поверхностных температурных шумов) и особенностей ее проявления на поверхности объекта контроля в зависимости от теплофизических параметров среды, величины энергии акустической волны, глубины расположения дефекта относительно поверхности.

Эксперименты с использованием ультразвуковых источников активации для выявления дефектных структур показали возможность практической реализации тепловизионной дефектоскопии на основе вибротермографии и корреляционной ИК-радиометрии. При действии акустических волн в экспериментальных образцах наблюдалось возникновение температурных аномалий, которые совпадали с внутренними неоднородностями и дефектами. Установлено, что диссипация энергии акустических волн на дефектах коррелирует со временем проявления на поверхности температурных аномалий. Амплитуда аномалий зависит от параметров дефектообразующих структур, энергии активации и времени действия источника акустических волн. При одновременном действии теплового и ультразвукового источников активации эффект проявления термоаномалий на дефектных структурах усиливался.

На основе разработанных моделей (рис. 3) были проведены эксперименты, моделировавшие процессы поглощения энергии акустических волн на различных дефектных структурах и их проявление в поле ИК-излучения. Исследования проводились с использованием тепловизионной системы LIPS 814, ультразвукового генератора УЗДН-22 (частотой 22 и 44 кГц, мощностью 0,1...1,0 кВт). Уровень акустической энергии, подводимой к образцу, регулировался изменением прижимного усилия между образцом и опорой в точке K_2 и выбором типа согласующего устройства (ленточного, спирального) между излучателем акустических волн

и образцом. Металлографические исследования структуры образцов проведены по стандартным методикам количественной металлографии с использованием оптического микроскопа МИМ-10.

Были проведены исследования особенностей проявления в поле ИК-излучения дефектов типа «инородное включение», сформированных электродом АНО-4 электродуговой сваркой на образцах из конструкционной стали, и «нарушение микроструктуры материала», сформированное методом «сгиб-разгиб» с выходом за пределы упругой деформации.

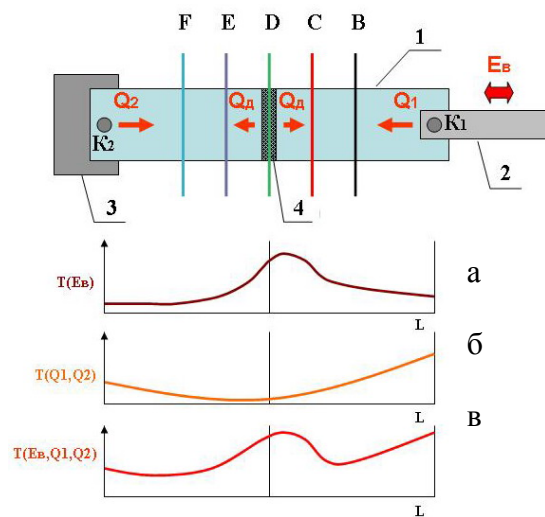


Рис. 3. Схема моделирование процесса поглощения энергии акустических волн на поперечных дефектных структурах образцов из конструкционных материалов:

1 - экспериментальный образец; 2 - источник (излучатель) акустических волн; 3 - опора образца, согласующего устройства излучателя акустических волн; 4 - зона расположения дефектной структуры; K_1 , K_2 - точки закрепления образца; а - $T(E_b)$ - распределение температуры, обусловленное действием поглощенной энергии акустической волны на дефектной структуре образца; б - $T(Q_1, Q_2)$ - распределение температуры, вызванное выделением тепла в точках закрепления образца; в - $T(E_b, T(Q_1, Q_2))$ - результирующее (наблюдаемое) распределение температуры на образце при действии акустической волны

На рис. 4 и 5 показаны термоизображение, термограммы и графики изменения теплового состояния стального образца (сталь 35) с поперечным дефектом типа «инородное включение» и особенности проявления такого вида дефектов в поле ИК-излучения при акустической активации.

Дефект «нарушение микроструктуры материала» был сформирован на образцах промышленного матричного алюминиевого сплава 6111. На рис. 6 приведены характерные виды полученной таким образом дефектной структуры в зоне локализации деформации. Как показали металлографические исследования, протяженность дефектной зоны составляет величину 300...500 мкм. Сами же

микротрещины имеют ширину около 3...7 мкм, а длина их может достигать 200 мкм.

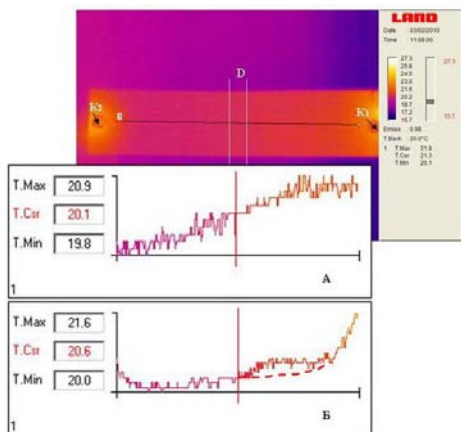


Рис. 4. Термоизображение и термограммы стального образца 130x30 мм, толщиной 2 мм (сталь 35, с поперечным дефектом D типа «инородное включение», сформированным электродом АНО-4 электродуговой сваркой), активированного энергией акустической волны (22 кГц). А - термограмма по сечению 1 до акустического воздействия; Б - термограмма по сечению 1 при акустической активации (пунктирными линиями показан вид термограммы при отсутствии дефекта)

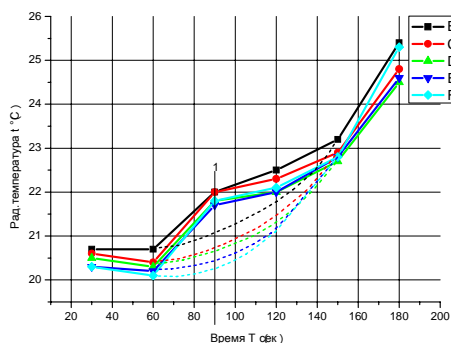


Рис. 5. Графики изменения температуры стального образца с дефектом D (см. рис. 3, сплошные линии) по сечениям В, С, D, Е, F при действии акустической активации (22 кГц). Пунктирными линиями показан ход графиков при отсутствии дефекта

На рис. 7, 8 приведены графики изменения температуры по сечениям В, С, D, Е, F (см. рис. 3) и термограммы продольного сечения образца промышленного алюминиевого сплава 6111 без дефекта и с дефектом (микроструктура дефекта показана на рис. 6) соответственно, при действии акустической активации (22 кГц). Пунктирными линиями показан ход графиков при отсутствии дефекта.

На рис. 9 представлен вид дефекта типа «инородное включение»/«нарушение структуры материала» на образцах из листовой стали (нержавеющая сталь X18H12T, толщина пластины - 1,2 мм). Дефект сформирован электродом АНО-4 электродуговой сваркой.

На рис. 10 приведены термоизображение и термограммы по сечениям 1 и 2, проходящим через дефекты, при акустической активации пластины (22 кГц).

Проведенные исследования подтверждают возможность регистрации тепловизионными средствами структурных неоднородностей и дефектов по изменению их температуры в результате акустической активации. Установлено, что дефекты микроструктуры материала при поглощении энергии акустических волн создавали «сглаженные» термоаномалии, которые превышали фоновое значение температуры на 0,3...1,8 °С.

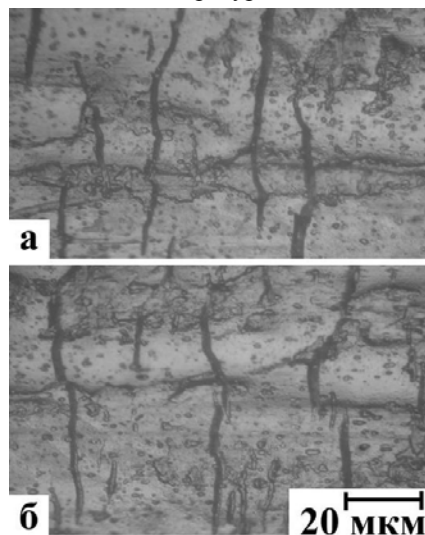


Рис. 6. Вид микроструктуры образца промышленного алюминиевого сплава 6111 в дефектной зоне, сформированной методом «сгиб-разгиб»

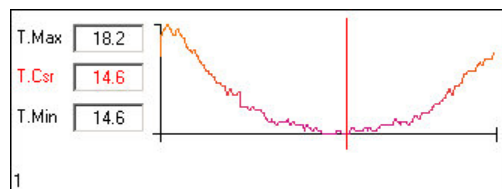
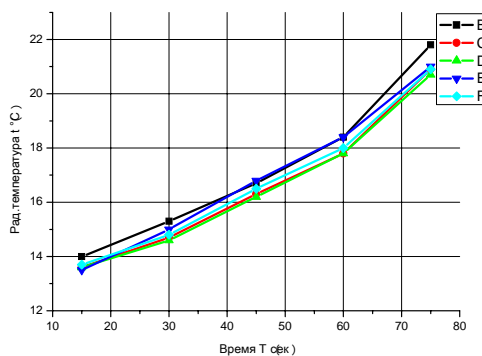


Рис. 7. Графики изменения температуры по сечениям В, С, D, Е, F (см. рис. 3) образца из промышленного алюминиевого сплава 6111 без дефекта при действии акустической активации (22 кГц). 1- термограмма продольного сечения образца

Дефекты типа «инородное включение» (шлак, трещина, свищ) характеризуются более высокими значениями амплитуды термоаномалий,

превышающих фоновую температуру на 4 °С и более. В зависимости от теплофизических характеристик металла (теплоемкость, теплопроводность) время установления максимального значения термоаномалии составляло 10...60 с с момента воздействия акустической волны.

Далее амплитуда термоаномалии в области дефекта уменьшается (а зона, охватывающая термоаномалию, расширяется) за счет действия механизмов теплопроводности и рассеивания тепла. Наблюдаемый на графике (см. рис. 8) подъем температуры в области времен максимального проявления термоаномалий (в зонах, примыкающих к дефекту) является идентификационным признаком наличия в образце дефекта.

На основе проведенных нами исследований показана возможность применения промышленной вибрации в качестве альтернативы действию акустической и тепловой активации дефектных структур в корреляционной ИК-радиометрии. Установлено, что для однозначной интерпретации данных тепловизионной акустотермографической дефектоскопии конструкционных материалов необходимо применение специального программного обеспечения на основе использования методов корреляционного анализа и исходных данных об условиях тепловизионной съемки.

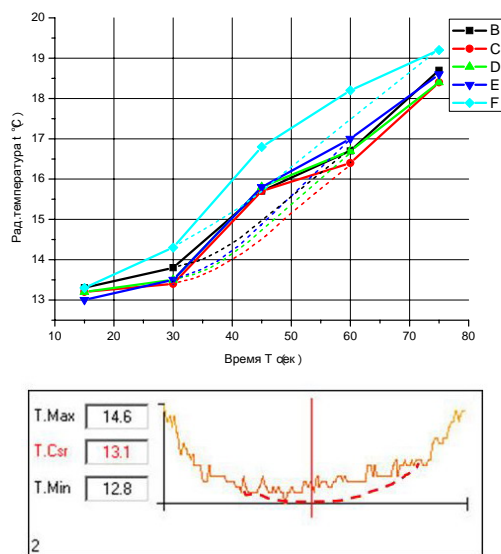


Рис. 8. Графики изменения температуры по сечениям B, C, D, E, F (см. рис. 3) образца из промышленного алюминиевого сплава 6111 с дефектом, изображенным на рис. 6, при действии акустической активации (22 кГц). Пунктирными линиями показан ход графиков при отсутствии дефекта. 2 - термограмма продольного сечения образца

Также необходимы сведения о конструкционных особенностях и внутренних источниках энерговыделения объекта исследования (тепловых, акустических, упругой деформации и пр.), о технологических особенностях его функционирования и т. д.

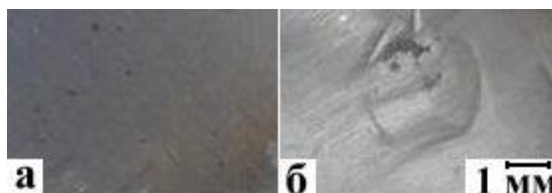


Рис. 9. Дефекты типа «инородное включение»/«нарушение структуры материала»: а - общий вид наружной поверхности образца (со стороны тепловизионной съемки); б - вид дефекта с обратной (внутренней) стороны образца

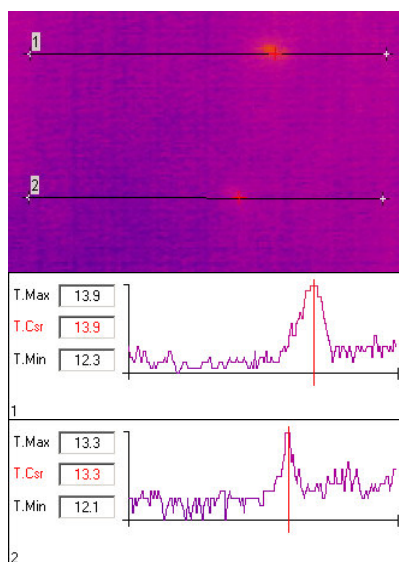


Рис. 10. Термоизображение и термограммы пластины из нержавеющей стали X18H12T с дефектами по сечениям 1 и 2 при акустической активации

Учитывая высокую чувствительность метода к выявлению структурных неоднородностей в металлах, большой интерес вызывает возможность контроля соотношений упругой и пластической составляющих деформационного влияния, основных составляющих структурного состояния, которые изменяются в процессе температурных скачков. Все это может быть использовано для оценки ресурса материала конструкции в тех или иных условиях эксплуатации. Длительная эксплуатация изделий при высокой температуре или кратковременный перегрев выше расчетной температуры при наличии даже небольших нагрузок могут вызвать такие изменения в микроструктуре металла, которые приведут к проявлению эффекта сверхпластичности. Реализоваться такой эффект может даже в изделиях с достаточно крупнозернистой структурой (10 мкм и более) в случае наличия в структуре незначительного количества жидкой фазы на межзеренных или межфазных границах. Следует иметь в виду, что кратковременный переход материала изделий, которые находятся во время эксплуатации под нагрузкой, в сверхпластичное состояние может привести впоследствии к их разрушению даже при незначительных нагрузках. В то же время изменение зеренной микроструктуры,

которое наблюдается, например, при кратковременном перегреве углеродистой стали, может приводить к растрескиванию металла по границам зерен, т. е. к образованию зернограничных трещин. И здесь применение акусто-термографической дефектоскопии может быть эффективным методом для выявления подобных микроструктурных дефектов, тем самым предотвращая катастрофические последствия, которые могут произойти при дальнейшей эксплуатации изделия с подобными дефектами.

Вибротепловизионный метод дефектоскопии обеспечивает возможность перевода технологического оборудования на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию на основе данных оперативного выборочного обследования состояния конструкционных материалов отдельных систем и агрегатов оборудования с доступными для измерения зонами контроля температуры. Наиболее эффективно дефекты обнаруживаются и идентифицируются при тех режимах работы машин и агрегатов, при которых они интенсивно развиваются. Поэтому периодичность контроля зависит от условий и режимов работы, диагностических признаков и вероятности появления и развития тех или иных дефектов для различных видов оборудования.

Дальнейшим направлением развития корреляционной вибродефектоскопии является более глубокое изучение физики процессов трансформации энергии вибрации в тепло на диссипативных структурах, особенностей формирования тепловых полей в зависимости от энергетических параметров упругих волн вибрации

и энергопоглощающих структур (дефектов), способов их идентификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Ф. Клепиков. Тепловизионный контроль и диагностика объектов ядерной энергетики // Доклады Межд. конф. «Ядерная энергетика – наше будущее». Киев, 23 октября 2007.
2. М.І. Базалеев, Б.Б. Бандурян, В.Ф. Клепиков та ін. Моніторинг довілля та технічного стану обладнання АЕС // Труды Ин-та геохимии окружающей среды. 2005, №14.
3. Н.И. Базалеев, Б.Б. Бандурян, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко. Тепловизионный мониторинг технического состояния компрессорного и энергетического оборудования как метод эффективного решения проблемы энергосбережения // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2006, №1(3), с. 60-65.
4. В.П. Вавилов. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2009, 544 с.
5. В.А. Маслова, В.А. Стороженко. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. Харьков: «Компания СМІТ», 2004, 160 с.
6. L.D. Favro, X. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui, and R.L. Thomas. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse // Rev. Sci. Instr. 2000.
7. М.І. Базалеев, Б.Б. Бандурян, В.В. Брюховецький, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко. Концепція розвитку неруйнівних методів контролю енергетичного обладнання АЕС на основі кореляційної ІЧ-радіометрії // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2008, №4/5(34), с. 10-16.

Статья поступила в редакцию 01.09.2010 г.

ТЕПЛОВІЗІЙНА АКУСТОТЕРМОГРАФІЧНА ДЕФЕКТОСКОПІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

М.І. Базалеев, В.В. Брюховецький, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко

Запропоновано та апробовано термографічний метод дефектоскопії на основі акустичної активації теплових полів у середовищі об'єкта контролю. Метод базується на особливостях процесів трансформації енергії акустичних хвиль в тепло на неоднорідностях у твердих тілах і відкриває принципово нові перспективи використання неруйнівних методів теплового контролю. Для практичної реалізації цього методу необхідним є створення визначеного акустичного впливу на об'єкт контролю (активаційна дія), при якому значення термоаномалій температурних полів на дефектних структурах, які проявляються на поверхні, є достатніми для ідентифікації дефектів сучасними тепловізіонними системами.

THERMOVISION ACOUSTIC THERMOGRAPHY CONSTRUCTION MATERIALS DEFECTOSCOPY

N.I. Bazaleev, V.V. Bruhovetskiy, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko

The method of thermographic defectoscopy based on the acoustic activation of the thermal fields in the object under control is proposed and tested. This method is based on the particularities of the processes of transformation of acoustic energy in heat on solid state inhomogenities and have new perspectives for nondestructive heat control. Practical realization of the mentioned method requires the creation of acoustic influence on controlled object under which the values of thermoanomalies of thermal fields on surface defect structures are enough for identification by the modern thermovision systems.