

ОЦЕНКА РАССЕЯННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2019 г. Р.И. Романишин^{1,*}, И.М. Романишин^{1,**}

¹Физико-механический институт имени Г.В. Карпенко НАН Украины,
Украина 79053 Львов, ул. Науковая, 5
E-mail: *rostyk.romanyshyn@gmail.com; **romanyshyn@ipm.lviv.ua

Поступила в редакцию 01.06.2018; после доработки 31.08.2018;
принята к публикации 07.09.2018

Рассмотрены методы оценки рассеянной поврежденности материалов. Одними из наиболее технологических методов оценки рассеянной поврежденности материалов на мезоуровне (размера длины зондирующей волны) являются ультразвуковые на основе регистрации обратнорассеянного ультразвукового сигнала. Приведено описание методов определения рассеянной поврежденности в объеме материала на основе сканирования поверхности объекта прямым раздельно совмещенным пьезопреобразователем, регистрации и статистической обработки обратнорассеянного сигнала в виде А-скана, построения пространственного распределения сечения обратного рассеяния в виде В-скана или томографического изображения, оценки поврежденности в объеме материала на основе относительного изменения сечения обратного рассеяния или «неупорядоченности» его пространственного изображения.

Ключевые слова: рассеянная поврежденность, ультразвуковой обратнорассеянный сигнал, статистическая обработка.

DOI:10.1134/S0130308219020039

Актуальной задачей диагностики является оценка рассеянной поврежденности (деградации) материала в преддефектном состоянии [1]. Обычно поврежденность материала связывают с возникновением микродефектов (микропор, микротрещин), их объединением вплоть до возникновения макродефекта [2—9].

ПАРАМЕТР РАССЕЯННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ РАБОТНОВА — КАЧАНОВА

Для количественной оценки рассеянной поврежденности материала Ю.Н. Работновым предложен параметр D (в оригинале ω), представляющий собой площадь трещин (пор) на единицу площади поперечного сечения в данный момент времени [10, 11]

$$D = (S_0 - S) / S_0, \quad (1)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения неповрежденного материала; S — «эффективная площадь» этого сечения (за исключением суммарной площади повреждений); $S_0 - S$ — площадь повреждений. Параметр поврежденности является чисто геометрической характеристикой текущего состояния и его изменение определяется свойствами материала и историей внешнего нагружения.

Для неповрежденного материала $D = 0$, с возрастанием поврежденности D стремится к 1. В момент разрушения $t = T$, $D = 1$.

Для оценки поврежденности Л.М. Качановым [12] предложен структурный параметр сплошности ψ , который характеризует микродефектность структуры. При отсутствии поврежденности $\psi = 1$, с возрастанием поврежденности ψ стремится к нулю. Можно считать, что $D = 1 - \psi$.

Имеются различные интерпретации поврежденности, которые связаны с определением поврежденности (1), хотя иногда их используют в качестве определения поврежденности или ее признака [13].

Одна из интерпретаций поврежденности касается уменьшения сопротивляемости образца растяжению. При оценке поврежденности на основе отношения «поврежденной» (площади микропор, микротрещин, микродефектов) к общей (начальной) площади поперечного сечения (1) увеличение поврежденности происходит за счет увеличения относительной «поврежденной» площади. При этом происходит относительное уменьшение эффективной площади поперечного сечения, которая реально несет растягивающую нагрузку и определяет сопротивляемость образца растяжению, что приводит к уменьшению сопротивляемости образца растяжению.

Другая интерпретация касается сокращения упругого отклика тела с ростом поврежденности. Это тоже связано с тем, что при увеличении поврежденности D уменьшается эффективная площадь, которая передает внешние усилия от одной части тела к другой, что, в свою очередь,

приводит к повышению среднего напряжения в сечении при внешнем нормальном напряжении σ_0 в соответствии с выражением [10]

$$\sigma = \sigma_0 / (1 - D) \quad (2)$$

($0 < D < 1$) и сокращению упругого отклика тела с ростом поврежденности.

ЭВОЛЮЦИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Для прогноза ресурса безаварийной работоспособности изделия на основе рассеянной поврежденности необходимо эволюционное уравнение поврежденности вида [14]

$$\frac{dD}{dt} = f(P, D), \quad (3)$$

где D — параметр поврежденности материала; P — величина нагрузки.

Как правило, для неповрежденного материала

$$D_{t=0} = 0, \quad (4)$$

критерий разрушения находят из условия

$$D_{t=T} = 1. \quad (5)$$

Правую часть (3) в основном определяют на основе экспериментальных данных.

Известны общие подходы для получения (3), один из таких базируется на законе сохранения массы [14].

При этом эволюционное уравнение поврежденности получают в виде логистического уравнения

$$\frac{dD_*}{dt} = CD_*(1 - D_*). \quad (6)$$

Решением этого уравнения является логистическая кривая

$$D_*(t) = \frac{D_0 e^{Ct}}{1 + D_0 (e^{Ct} - 1)}. \quad (7)$$

Расчет остаточного ресурса производится на основе определения времени достижения заданной поврежденности из уравнения (7).

Отметим два момента при рассмотрении оценки поврежденности на основе закона сохранения массы: во-первых, поврежденность D_* рассматривается как объем микроповреждений (микропор, микротрещин и т.д.) на единицу объема (по Работнову — Качанову поврежденность — площадь пор на единицу площади); во-вторых, представление локальной текущей плотности через параметр поврежденности D_* (7) приводит к следующему соотношению:

$$\delta\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho_0(1 - D_*) - \rho_0}{\rho_0} = -D_*. \quad (8)$$

Отметим, что выражение

$$\delta\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (9)$$

является относительным изменением плотности материала, которое в технической диагностике называется «дефектом плотности» и используется при диагностике поврежденности материала [5, 6].

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Для оценки поврежденности материала, кроме относительного изменения плотности, используют относительные изменения других параметров, которые чувствительны к накоплению повреж-

дений, в [5] введен обобщенный параметр в виде относительного изменения некоторого параметра, чувствительного к повреждаемости

$$\Delta W = 1 - \Pi_d / \Pi_0, \quad (10)$$

где Π_d — параметр для материала с накопленным повреждением; Π_0 — параметр для материала без повреждений.

К параметрам, чувствительным к накоплению повреждений, относят плотность, модули упругости, акустоэмиссионные параметры [6].

При этом словосочетания «дефект плотности», «дефект модуля упругости» подразумевают относительное изменение рассматриваемого параметра из-за поврежденности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОР

Для оценки структурной поврежденности одним из наиболее информативных является метод определения объемной плотности металла [7]. Сущность его заключается в сопоставлении плотности металла в исходном состоянии, когда практически поры в нем отсутствуют, после различных сроков эксплуатации и в момент разрушения. Критерием поврежденности металла считают отношение объема пор в момент времени V_t к объему пор в момент разрушения V_p

$$D_p = \frac{V_t}{V_p}.$$

Принято, что в исходном состоянии поврежденность материала $D_p = 0$, в момент разрушения $D_p = 1$.

Объемная доля пор в металле в момент времени t рассчитана по формуле

$$V_t = \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_0},$$

где ρ_0 — плотность металла в исходном состоянии; ρ_t — в момент времени t .

Накопление дефектов в металле (пористость) приводит к естественному снижению его плотности, поэтому одним из простых и физически обоснованных методов исследования поврежденности является прецизионное взвешивание. Практика показывает, что в этом случае для определения плотности металла методом гидростатического взвешивания необходима точность до $\pm 0,0001$ г на образцах-вырезках от 5 до 20 г.

Плотность исследуемого металла определяется по формуле

$$\rho_t = \frac{P_1 \rho_2 - P_2 \rho_1}{P_1 - P_2},$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность воздуха и воды при данной температуре и давлении (справочные данные); P_1, P_2 — масса образца в воздухе и в воде.

Полученную величину плотности исследуемого металла нужно сопоставить с плотностью его в исходном состоянии и в момент разрушения. Так, плотность стали 12Х1МФ в исходном состоянии составляет $7,835$ г/см³, а в момент разрушения — $7,778$ г/см³, то есть дефект плотности при разрушении стали составляет всего 1-1,25 %, что требует обеспечения указанной высокой точности при проведении эксперимента.

Для расчета остаточного ресурса металла используют эмпирическую зависимость относительного времени до разрушения t/t_p от величины поврежденности $D_p = 0$

$$t/t_p = f(D_p).$$

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИМИ (УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ) МЕТОДАМИ

Среди неразрушающих методов оценки рассеянной поврежденности наиболее перспективными являются ультразвуковые (УЗ). Традиционно они базируются на измерении затухания и скорости распространения УЗ волны.

Основным информативным параметром при ультразвуковой диагностике металлов является скорость распространения разных типов УЗ волн [15]. При малых деформациях плотность считают постоянной [16] $\rho = \text{const}$. В пределах упругой деформации $\sigma = E\varepsilon$ ($|\varepsilon| \leq \varepsilon_0$, модуль Юнга $E = \text{const}$, ε_0 соответствует границе упругости) скорость продольной волны является постоянной $c = \sqrt{E/\rho} = \text{const}$. При пластической деформации ($\sigma = \sigma(\varepsilon)$ — зависимость между напряжением и деформацией, для которой в соответствии с экспериментальными данными $0 < d\sigma/d\varepsilon < E$ при $|\varepsilon| > \varepsilon_0$) скорость продольной волны $c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}}$ уменьшается.

Зависимость скорости от напряжений описывается в рамках нелинейной с физической точки зрения теории упругости (степенная нелинейность закона Гука) [17]. Относительные изменения скорости при диагностике напряжений составляют сотые доли процента, а при диагностике структурных изменений — десятые доли [15].

Изменения скорости распространения и затухания УЗ волн применяют для экспериментальной оценки поврежденности [18—20].

В [21—24] исследуется влияние поврежденности на распространение упругих волн на основе уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - [S(z-b_2) - S(z-b_1)] \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0,$$

где u — перемещение материала стержня в направлении оси z ; c_1 — скорость распространения волны в неповрежденном материале; $[S(z-b_2) - S(z-b_1)]$ описывает локально распределенную поврежденную область структуры в стержне; $[b_1, b_2]$ — координаты поврежденного участка; β — коэффициент сопротивления поврежденной области.

Полученные исследования влияния поврежденности на распространение акустической волны можно использовать для решения обратной задачи — оценки поврежденности на основе измерения параметров акустической волны.

Рассмотрена самосогласованная задача оценки поврежденности материала в процессе деформации на основе уравнений поврежденности и теории упругости [13].

Как правило, в механике деформируемого твердого тела задачи динамики рассматривают отдельно от задач накопления. При этом принято заранее постулировать, что скорость упругой волны является заданной функцией поврежденности, и определять коэффициенты пропорциональности.

Поврежденность материала привносит частотно-зависимое затухание и дисперсию фазовой скорости УЗ волны, что позволяет оценивать поврежденность акустическим методом.

За меру повреждаемости в процессе развития деформации принимается скалярный параметр $D(x, t)$, который характеризует относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. Этот параметр равен нулю, когда повреждений нет, и близок к единице в момент разрушения.

Фазовая скорость v_{ph} и затухание считаются степенными функциями частоты ω и линейными функциями повреждаемости D :

$$v_{ph}(\omega) = c_0 (1 - h_1 D - h_2 D \omega^2);$$

$$\alpha(\omega) = (h_3 + h_4 D) \omega^4,$$

где $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ — скорость продольной волны в материале стержня без повреждений; h_{1-4} — коэффициенты, которые необходимо экспериментально определять.

Эволюция поврежденности описывается кинетическим уравнением

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\sigma, \psi),$$

где σ — внешнее действующее напряжение.

Функция $f(\sigma, \psi)$ чаще всего аппроксимируется линейной зависимостью, иногда — полиномиальной.

Уравнение распространения продольной волны в стержне с учетом поврежденности [13]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (11)$$

дополняется уравнением развития поврежденности в виде

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \alpha \psi = \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (12)$$

где $u(x, t)$ — перемещение частиц срединной линии стержня; α , β_1 , β_2 — константы, характеризующие поврежденность материала и связь циклических процессов и процессов накопления повреждений.

Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом состоит в отыскании решения систем (11) и (12). В результате получают зависимости скорости распространения и затухания от частоты и параметров поврежденности [13].

Наличие поврежденности приводит к дисперсии, то есть зависимости фазовой скорости продольной волны от частоты, и частотно-зависимому затуханию. Экспериментальные исследования подтверждают, что такие частотные зависимости характерны для многих конструкционных материалов. В низкочастотном диапазоне волна распространяется практически без затухания. С возрастанием частоты затухание возрастает и становится величиной одного порядка с постоянной распространения.

В [25—28] рассмотрена одномерная обратная акустическая задача по восстановлению распределения отражателей (дефектов, рассеивателей) по дальности на основе регистрации эхосигналов в виде А-скана и применения обращения свертки с учетом дисперсии скорости и затухания.

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА ОСНОВЕ «НЕКЛАССИЧЕСКОГО» ПРОЯВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРНО-ОБУСЛОВЛЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

В 70-х годах XX в. получены первые экспериментальные свидетельства того, что в процессе накопления усталостных повреждений изменение микроструктуры металла может проявляться в многократном росте акустической нелинейности [29]. При этом может иметь место качественная модификация нелинейных эффектов. Такие данные накоплены для широкого класса сред: металлы с усталостными или термическими повреждениями структуры, горные породы, искусственные материалы (в том числе композиты) с трещиноподобными дефектами и расслоениями или межзеренными контактами, нанокристаллические металлы, зернистые среды. Высокая «структурная чувствительность» акустической нелинейности часто наблюдается уже на самой начальной стадии повреждения материала при еще почти неизменных величинах линейных упругих модулей. На этой стадии традиционные линейные методы на основе изменения скоростей упругих волн еще не позволяют выявить и оценить поврежденность металла.

Причиной сильного возрастания акустической нелинейности микронеоднородных сред в большинстве случаев является наличие в структуре среды компонент с резко контрастирующими линейными упругими свойствами. Причем размер мягких включений-дефектов мал по сравнению с длиной упругой волны, а также мала концентрация этих включений.

Характерным примером таких контрастно-мягких дефектов являются, например, трещины. Трещина за различными известными моделями может быть полностью закрыта сжимающим напряжением, создающим в окружающем материале среднюю деформацию, примерно равную отношению величины раскрытия трещины d к ее диаметру L . Это означает, что трещина приблизительно в L/d раз мягче окружающего материала-матрицы. Типичные значения d/L весьма малы и составляют 10^{-3} - 10^{-5} .

Другим примером являются межзеренные контакты, которые вследствие своей малой площади касания во много раз более сжимаемы, чем материал в объеме зерен.

Скопления дислокаций по границам зерен поликристаллов значительно более податливы по отношению к тангенциальным нагрузкам, чем окружающие области с более однородного материала.

Отметим, что описанные контрастно-мягкие включения (трещины, межзеренные контакты, скопления дислокаций) являются рассеивателями ультразвука.

Для выяснения связи между направлением рассеивания и структурой рассеивателя используем приближение Борна. Для распространения гармонических волн $p(\mathbf{x}, t) = p(\mathbf{x})e^{j\omega t}$ справедливо уравнение Гельмгольца [30]

$$\nabla^2 p(\mathbf{x}) + k^2 p(\mathbf{x}) = S(\mathbf{x}), \quad (13)$$

где p — давление; k — волновое число; $S(\mathbf{x})$ — источник (функция объекта).

Решением (13) в борновском приближении будет рассеянное поле от источника рассеивания в объеме V_0

$$p_{sc}(\mathbf{r}) \approx \frac{P_0 k^2 e^{jkr}}{4\pi r^2} \int_{V_0} S(\mathbf{x}_0) e^{-j\mathbf{K}\mathbf{x}_0} d\mathbf{x}_0, \quad (14)$$

где r — расстояние между рассеивающим объемом и точкой наблюдения; P_0 — амплитуда падающей волны; \mathbf{K} — вектор рассеивания, равный разнице между волновыми векторами падающего и рассеянного поля, то есть определяется направлением наблюдения рассеянного поля

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_{sc} - \mathbf{k}_{inc}. \quad (15)$$

Выражение (14) можно рассматривать как пространственное преобразование Фурье функции объекта $S(\mathbf{x})$. При наблюдении рассеянного поля под разными углами видны разные характеристики объекта в K -пространстве. Например, рассеивание вперед соответствует направлению рассеивания, которое совпадает с направлением падающей волны. Тогда

$$\mathbf{K} \approx 0. \quad (16)$$

Таким образом, рассеянное поле в направлении распространения соответствует низким (около нуля) значениям в K -пространстве объекта. Это означает, что оно в направлении распространения несет информацию о характеристиках объекта, больших за длину волны, поскольку волновой вектор является обратно пропорциональным длине волны.

В направлении обратного рассеивания имеем

$$\mathbf{K} \approx -2k\hat{k}_{inc}. \quad (17)$$

Это означает, что обратное рассеивание несет информацию о высших пространственных частотах объекта рассеивания, что соответствует меньшим структурным элементам.

Таким образом, обратнорассеянный сигнал является более чувствительным к малым дефектам и включениям, чем прямое рассеивание.

Длина ультразвуковой волны частотой 5 МГц и выше в металле (скорость распространения продольной волны — приблизительно 5000 м/с) составляет 1 мм и менее. Это означает, что этим зондирующим полем можем исследовать концентрацию пор линейным размером 1 мкм, равную 10^9 мм⁻³ и более, что соответствует поврежденности металла, превышающей 10 %.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Одним из наиболее информативных сигналов о рассеянной поврежденности материалов является рассеянный ультразвуковой сигнал, который рассматривался ранее как «структурный» шум [31, 32].

Одной из первых работ, в которой приведены экспериментально зарегистрированные осциллограммы обратнорассеянного сигнала на образцах с водородной поврежденностью, является [18]. Ее авторы утверждают, что во всех предыдущих работах по оценке влияния водородной поврежденности ультразвуковыми методами они ограничивались измерением скорости и затухания, обратное рассеивание не использовалось. Его применяли для определения размера зерна в неразрушающем контроле. Как следует из [18], амплитуда обратнорассеянного сигнала на частоте 10 МГц в результате водородной поврежденности возрастает в 7—12 раз.

Теоретическим вопросам, ультразвуковым и информационным технологиям применения обратнорассеянного сигнала в технической диагностике материалов посвящены работы Центра неразрушающего контроля Университета Iowa [33—35], определению размера зерна на основе регистрации обратнорассеянного сигнала — [36—40], выявлению особенностей распространения акустических волн в металлах с микродефектами различного типа на основе экспериментальных методов доплеровской лазерной интерферометрии — работы Ю.В. Житлухиной (Корх) [41], определению высших статистик размера зерна на основе статистик обратнорассеянного сигнала — [42], разработке ультразвуковых технологий выявления и различения пор, сульфидов, оксидов на основе обработки обратнорассеянного сигнала — [43], ультразвуковому исследованию поврежденности сталей (на примере водородной поврежденности) — [19]. Обзор методов выявления и оценивания наводороженности в сталях приведен в [20], В-сканы поврежденного наводороживанием материала на основе сканирования объектов при помощи ультразвуковой решетки — в [44].

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОБРАТНОРАСSEЯННОГО СИГНАЛА

Экспериментальные исследования эксплуатируемых объектов свидетельствуют о перспективности использования обратнорассеянного сигнала для оценки поврежденности сталей и сплавов, который возрастает в разы (на примере водородной поврежденности). В то же время в литературе приведены только качественные результаты. Обратнорассеянный сигнал, как правило, слабый, шумоподобный (и зашумленный). Кроме того, его уровень зависит от уровня зондирующего сигнала, акустического контакта, усиления приемного тракта, аппаратурных помех, затухания в процессе распространения и др. Поэтому актуальной является разработка информационной технологии обработки обратнорассеянного сигнала, которая бы учитывала все эти факторы.

Авторами разработан метод оценки поврежденности на основе регистрации обратнорассеянного сигнала [45—47].

Предварительная обработка зарегистрированного прямым раздельно совмещенным пьезопреобразователем ультразвукового сигнала в виде А-скана обеспечивает учет технических характеристик передаточно-приемного тракта, в частности частоты зондирования и дискретизации, разрядности АЦП, постоянной составляющей (или низкочастотного тренда). На этом этапе проводится выделение информативной части зарегистрированного сигнала, которая соответствует рассеянию по пути первого распространения зондирующего сигнала от ультразвукового преобразователя к отражающей донной поверхности, а во временной области — от конца импульса, отраженного от границы призма — металл, к началу первого донного отраженного сигнала.

При распространении высокочастотного (10 МГц) зондирующего ультразвукового сигнала в материале происходит амплитудная модуляция сигнала неоднородностями материала и, в первую очередь, поврежденностью. Поэтому для определения ее уровня необходимо провести демодуляцию сигнала.

Пусть имеем зарегистрированную реализацию А-скана $s_i^{reg} = s_i + n_i, i = 1, \dots, N$, где N — общее количество отсчетов; s_i — обратнорассеянный сигнал; n_i — аддитивная шумовая составляющая (аппаратурные шумы), от которой избавляются путем многократной регистрации и усреднения реализаций; K — количество зарегистрированных реализаций в одной «точке» (для усреднения и устранения аппаратурных шумов)

$$\bar{s}_i^{reg} = \bar{s}_i + \bar{n}_i \Big|_{\bar{n}_i \rightarrow 0, K \rightarrow \infty}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (18)$$

На первом этапе проводим демодуляцию зарегистрированного сигнала

$$S_i = \frac{1}{\Delta_t} \sum_{n=i-\frac{\Delta_t}{2}}^{n=i+\frac{\Delta_t}{2}} \left(\frac{s_n - s^0}{A} \right)^2, \quad (19)$$

где $i = \text{Int}\left(\frac{\Delta_t}{2}\right), \dots, N - \text{Int}\left(\frac{\Delta_t}{2}\right)$, $\Delta_t = \text{Int}\left(\frac{\Omega}{f}\right)$ — длительность зондирующего импульса (в отсчетах); f — частота зондирования (10 МГц); Ω — частота дискретизации ($\Omega = 68$ МГц); N — длительность реализации в отсчетах ($N = 2^{11}$); s_n — n -й отсчет зарегистрированного сигнала; s^0 — постоянная составляющая ($s^0 = 512$); A — размах сигнала для заданной разрядности АЦП ($A = 2^{10} = 1024$).

Следует заметить, что приведенное детектирование является вычислением автокорреляционной функции шумоподобного модулированного сигнала при нулевой задержке и является энергетической характеристикой (дисперсией) сигнала.

Усреднение интенсивности на периоде несущей обеспечивает практически отсутствие погрешности автокорреляции из-за «урезания» данных [48].

Для приведения каждой «точки» пути распространения сигнала в одинаковые условия («единичного зондирующего сигнала») необходимо провести нормирование отсчетов [45]

$$S_i^{pr*} = \frac{S_i}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n \left(1 - \frac{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n} \right)}. \quad (20)$$

В результате получим оценку сечения обратного рассеяния вдоль пути распространения зондирующего сигнала [49].

Интегральным информативным параметром поврежденности материала в «точке» регистрации обратнорассеянного сигнала может служить дисперсия обратнорассеянного сигнала (усредненное на промежутке $[N_1, N_2]$ значение интенсивности)

$$Disp = \sum_{i=N_1}^{N_2} \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} S_i^{pr}, \quad (21)$$

а также ее размах. Здесь промежуток $[N_1, N_2]$ соответствует обратнорассеянному сигналу, то есть N_1 — конец импульса, отраженного от границы призма — металл; N_2 — начало донного отраженного сигнала.

Известно, что традиционные параметры случайной величины — среднее значение и дисперсия — являются неустойчивыми оценками положения и масштаба [50, 51], т.к. сильно зависят от выбросов. В этом случае значительно более устойчивой оценкой положения является медиана [51, 52]. Адекватным аппаратом для оценки интенсивности обратнорассеянного сигнала и его размаха являются диаграммы box-plot [53].

Разработана технология подбора минимального значения усиления для корректной регистрации обратнорассеянного сигнала [45]. Итак, вначале выставляем максимальное усиление, при котором зарегистрированный сигнал не зашкаливает (определяется в основном разрядностью АЦП), строим диаграмму box-plot и определяем медианное значение для нормированной интенсивности (20), уменьшаем усиление и повторяем регистрацию сигнала, построение диаграмм box-plot, определение медианного значения нормированной интенсивности до тех пор, пока ее медианное значение не начнет изменяться (возрастать), что означает доминирование в зарегистрированном сигнале шумов другой природы над обратнорассеянным сигналом. Таким образом, определяем минимальное значение усиления для «корректной» регистрации обратнорассеянного сигнала на основе критерия незначительного изменения медианного значения нормированной интенсивности при поочередном уменьшении усиления.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ «НЕУПОРЯДОЧЕННОСТИ» ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В [54] рассмотрены статистические подходы к оценке поврежденности материала, определению ее пространственных и временных параметров.

Методы на основе статистической обработки результатов многократного измерения твердости материала [4, 55] дают интегральную оценку степени деградации материала в определенный момент. Акустоэмиссионный подход [5, 6] позволяет оценить динамику развития структурных изменений, однако, как правило, не дает возможности получить оценку степени деградации в объеме материала (например, по толщине трубопровода). Метод на основе статистического анализа томографических изображений пространственного распределения рассеивающей способности в объеме материала при зондировании ультразвуковыми волнами и регистрации обратнорассеянного сигнала позволяет оценить степень деградации в объеме материала [56—59].

Разработан ультразвуковой метод оценки поврежденности материала на основе регистрации обратнорассеянного сигнала, формирования сферических проекций сечения обратного рассеяния, томографической реконструкции пространственного распределения рассеивающей способности и оценки степени деградации на основе «неупорядоченности» томографических изображений.

Метод базируется на следующих закономерностях, экспериментально проверенных фактах и гипотезах:

деградация материала в процессе эксплуатации сопровождается структурными изменениями, которые приводят к формированию и развитию рассеянной поврежденности в объеме материала и проявляются в увеличении разброса физико-механических характеристик материала [2, 4, 8, 9];

места с повышенной рассеянной поврежденностью являются наиболее вероятными для возникновения дефектов;

одним из наиболее чувствительных к структурным изменениям и рассеянной поврежденности в объеме материала на мезоуровне (порядка длины зондирующей волны) является рассеянный ультразвуковой сигнал;

при увеличении рассеянной поврежденности материала интенсивность обратного рассеяния ультразвука возрастает;

томографические методы – одни из наиболее информативных и помехоустойчивых диагностических подходов на мезоуровне;

оценка степени деградации в объеме материала сводится к оценке неупорядоченности томографических изображений рассеивающей способности;

количественную оценку неупорядоченности изображений предложено проводить на основе расчета параметра

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_i \sum_j a_{ij}^2}{\sum_i \sum_j (a_{ij} - \bar{a})^2}, \quad (22)$$

где a_{ij} ($i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$) — элементы изображения, по которым проводится суммирование и которые выбираются исходя из условий эксплуатации объекта (например, горизонтальный или вертикальный трубопроводы) и требований контроля; $\bar{a} = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j a_{ij}$ — среднее значение.

Для однородного изображения $a_{ij} = \bar{a}$ ($i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, M$) $SNR \rightarrow \infty$.

Деградация сопровождается зарождением и развитием микродефектов (пор, микротрещин), что приводит к усилению неупорядоченности изображения рассеивающей способности, увеличению «шума» в знаменателе (19) и уменьшению параметра SNR .

ВЫВОДЫ

Рассмотрены методы оценки рассеянной поврежденности материалов. Одними из наиболее технологических являются ультразвуковые на основе регистрации обратнорассеянного ультразвукового сигнала.

Описаны разработанные авторами методы определения рассеянной поврежденности в объеме материала на основе регистрации обратнорассеянного ультразвукового сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родюшкин В.М. От поиска дефектов к поиску предефектного состояния // Вестник научно-технического развития. 2009. № 4. С. 51—56.
2. Козинкина А.И., Рыбакова Л.М., Березин А.В. Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 4. С. 39—42.
3. Бобырь Н.И., Бабенко А.Е., Халимон А.П. Континуальная механика поврежденности и ее использование в задачах сложного малоциклового нагружения // ТДНК. 2008. № 4. С. 25—34.
4. Лебедев А.А. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // ТДНК. 2008. № 4. С. 35—44.
5. Недосека С.А., Недосека А.Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // ТДНК. 2010. № 1. С. 9—16.
6. Недосека С.А. Диагностика і прогнозування ресурсу зварних конструкцій методом акустичної емісії / АР доктора технічних наук по спец. 05.02.10 «Діагностика матеріалів і конструкцій». К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 2010. 26с.
7. Векслер Е.Я., Замекула И.В., Толстов В.Ю., Семешко Е.В. Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности метала // ТДНК. 2010. № 1. С. 23—31.
8. Мишакин В.В., Ключников В.А., Гончар А.В. Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 5. С. 32—36.
9. Петров А.И., Разуваева М.В. Оценка критерия взаимодействия пор в деформированных материалах // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С.130—133.
10. Степанова Л.В., Игонин С.А. Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю.Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2014. № 3 (114). С. 97—114.
11. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5—7.
12. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. С. 26—31.
13. Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 4. С. 554—557.
14. Каштанов А.В., Петров Ю.В. Энергетический подход к определению мгновенной поврежденности // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 71—75.

15. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура стали и сплавов. М.: Наука, 1996. 184 с.
16. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1956. 324 с.
17. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И.* Введение в акустоупругость. Киев: «Наукова думка», 1977. 152 с.
18. *Birring A.S., Bartlett M. L., Kawano K.* Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels // Corrosion (National Association of Corrosion Engineers). 1989. V. 45. № 3.
19. *Hirsehorn S., Van Andel P.W., Netzelmann U.* Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel // NDT & E. 1998. 15:6. P. 373—393.
20. *Kot R.* Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation / 10th APCNDT, 2001.
21. *Недосека А.Я., Недосека С.А.* Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // ТДНК. 2013. № 2. С. 3—8.
22. *Недосека А.Я., Недосека С.А., Бойчук О.И.* Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // ТДНК. 2013. № 2. С. 9—14.
23. *Недосека А.Я., Недосека С.А.* Влияние локального скопления дефектов на распространение акустических волн в пластинах. Сообщение 1 // ТДНК. 2013. № 4. С. 30—36.
24. *Недосека А.Я., Недосека С.А., Бойчук О.И.* Влияние локального скопления дефектов на распространение акустических волн в пластинах. Сообщение 2 // ТДНК. 2014. № 1. С. 12—15.
25. *Бархатов В.А.* Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки // Дефектоскопия. 2003. № 6. С. 10—17.
26. *Бархатов В.А.* Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений // Дефектоскопия. 2005. № 1. С. 10—19.
27. *Бархатов В.А.* Решение одномерной обратной акустической задачи с учетом дисперсии скорости звука и частотно-зависимого затухания волн // Дефектоскопия. 2009. № 1. С. 40—53.
28. *Бархатов В.А.* Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи // Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 55—64.
29. *Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И.* «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН. 2006. № 1. С. 97—102.
30. *Ham S., Song H., Oelze M.L., Popovics J.S.* A contactless ultrasonic surface wave approach to characterize distributed cracking damage in concrete // Ultrasonics. 2016.
31. *Ермолов И.Н.* Структура // Дефектоскопия. 2000. № 6. С. 97—98.
32. *Ермолов И.Н.* Влияние акустического контакта на эхо-сигнал и структурные помехи // Дефектоскопия. 1999. № 5. С. 96—97.
33. <https://www.cnde.iastate.edu/ultrasonics/ut-publications>
34. *Thompson R., Margetan F.J.* Use of elastodynamic theories in the stochastic description of the effects of microstructure on ultrasonic flaw and noise signals // Wave Motion. 2002. V. 36. P. 347—365.
35. *Linxiao Yu., Thompson R.B., Margetan F.J.* The Spatial Correlation of Backscattered Ultrasonic Grain Noise: Theory and Experimental Validation // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2010. V. 57. № 2. P. 363—378.
36. *Rudi C., Mlade M.* Testing method for quick determination of fresh concrete sample quality by measurements at elastic properties of hydrating cement past (http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_ult03018.pdf).
37. *Wang T., Saniie J.* Analysis of Low-Order Autoregressive Models for Ultrasonic Grain Signal Characterization // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1991. V. 38. № 2.
38. *Курков А.В.* О возможности экспресс-контроля среднего размера зерна металлопроката // Дефектоскопия. 2008. № 1. С. 51—56.
39. *Курков А.В.* Разработка методов и средств повышения информативности ультразвуковых измерений с помощью дефектоскопов общего назначения / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ). 2010. 18 с.
40. *Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б.* Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 27—36.
41. *Житлухина Ю.В. (Корх Ю.В.)* Акустические методы обнаружения и визуализации микродефектов в металлах / Дис. канд. техн. наук по спец. 05.02.11 — методы контроля и диагностика в машиностроении. Екатеринбург, 2009. 158 с.
42. *Miralles R., Vergara L., Gosalbez J.* Material grain noise analysis by using higher-order statistics // Signal Processing. 2004. V. 84. P. 197—205.
43. *Kananen V.E., Eskelinen J.J., Hægstrom E.O.* Discriminating pores from inclusions in rolled steel by ultrasonic echo analysis // Meas. Sci. Technol. 2011. V. 22. P. 105704 (7 p.).
44. *Molika Nardo R., Cerniglia D., Lombardo P., Pecoraro S., Infantino A.* Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing / 21st European Conference on Fracture, ECF21, 20—24 June 2016, Catania, Italy // Procedia Structured Integrity. 2016. № 2. P. 581—588.

45. Романишин Р.И., Романишин И.М. Обработка обратнорассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 11—16.
46. Романишин Р.И., Іваницький Я.Л., Кошовий В.В., Штаюра С.Т., Романишин І.М., Мокрий О.М., Семак П.М. Ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі зворотно-розсіяного сигналу // ТДНК. 2017. № 2. С. 42—49.
47. Романишин Р.І. Розвиток ультразвукового методу діагностування пошкодженості металу на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу / АР канд. дис. по спец. 05.02.10 — діагностика матеріалів та конструкцій. Львів: ФМІ НАНУ, 2017. 22с.
48. Корреляция и свертка (электронный ресурс: <http://www.williamspublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>).
49. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 280 с.
50. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / Справочное изд. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
51. Croux С., Dehon С. Robust estimation of location and scale / Encyclopedia of Environmetrics /A.-H. El-Shaarawi and W. Piegorsch (eds). John Wiley & Sons Ltd: Chichester, UK, 2013. / Эл. ресурс: https://feb.kuleuven.be/public/u0017833/PDF-FILES/Croux_Dehton5.pdf
52. Колмогоров А.Н. Метод медианы в теории ошибок // Матем. сб. 1931. Т. 38. № 3—4. С. 47—50.
53. <http://energyfirefox.blogspot.com/2012/02/boxplot.html>
54. Романишин И.М. Применение статистических подходов к оцениванию степени деградации материала // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 36—44.
55. Лебедев А.О., Музыка М.Р., Волчек Н.Л. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. «Метод ЛМ-твердості» / Патент України № 52107А. Опубл. 15.01.03. Бюл. № 1.
56. Кошовий В.В., Шама М.А., Романишин І.М., Романишин Р.І., Шараміга Р.В. Розробка технологій ультразвукової томографії на основі реєстрації розсіяного сигналу для контролю циліндричних виробів. // Металлофизика и новейшие технологии. 2008. Т. 30 (спец.выпуск: грудень). С. 677—687.
57. Кошовий В.В., Романишин І.М., Романишин Р.І., Шама М.А., Шараміга Р.В. Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень / Патент на корисну модель № 44165. Бюл. № 18 (25.09.2009).
58. Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамига Р.В. Оценка деградации материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 33—49.
59. Koshovy V.V., Romanyshyn I.M., Romanyshyn R.I. and all. Development of Ultrasonic Tomography Techniques for Diagnostics of Nuclear Power Plant Piping // Strength of Materials. 2013. V. 45. № 4. P. 512—516.