



НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чл.-кор. РАН **Н. П. АЛЕШИН** (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ)

Описаны новые приборы, обеспечивающие получение информации о внутренней структуре изделия и его дефектах. Акустоэмиссионные системы позволяют идентифицировать такие опасные источники, как потеря пластической деформации, зарождение и развитие трещин, коррозионные повреждения. Ультразвуковой томограф регистрирует информацию о конфигурации, размерах, ориентации дефектов. Для измерения объемных двухосных напряжений предлагается использовать спектрально-акустические системы контроля. Описано новое решение практической задачи по созданию технологии аппаратуры для неразрушающего контроля аустенитных сварных швов в соединениях толщиной от 5 до 100 мм.

Ключевые слова: сварные конструкции, ресурс конструкций, неразрушающий контроль, диагностика, акустоэмиссионные системы, спектрально-акустические системы, приборы

Диагностика является неотъемлемой частью технологического процесса при производстве материалов и изделий. Наличие высококачественных материалов и технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует их безаварийной эксплуатации.

Значение неразрушающих методов контроля и диагностики сейчас особенно велико, поскольку изношенность парка технологического оборудования в отдельных случаях превышает 65 %. В ближайшее время для предотвращения аварий наиболее опасных эксплуатируемых объектов необходимо создать технологии и оборудование для оценки их остаточного ресурса.

В России получены хорошие результаты при создании высокоинформативного дефектоскопического оборудования и разработке методик расчета остаточного ресурса отдельных объектов. Созданные приборы и инструменты основаны на последних достижениях в области ультразвуковой дефектоскопии, информатики, радиоэлектроники. По своим эксплуатационным характеристикам они не уступают лучшим мировым образцам.

Для оценки остаточного ресурса и эксплуатационной надежности наиболее приемлема модель дефекта в виде эллипсоида с известными полуосями. При этом эллипсоид должен достаточно точно интерполировать реальное нарушение однородности материала объекта. Определение полусей такого эллипсоида по данным ультразвуковой дефектоскопии невозможно без точного решения задачи рассеяния ультразвука на подобных отражателях. В самом общем виде эта задача может быть сформулирована следующим образом. На ограниченной поверхностью S эллипсоид с полуосями a , b и c , механические свойства поверхности которого описываются тензором импедансов Z , падает волна, характеризуемая вектором смещения U_0 . В результате взаимодействия волны с эллипсоидом возникает новое поле, характеризующееся

вектором смещений $U_0 + U$, причем его составляющая U называется рассеянной волной. Требуется построить поле U , которое удовлетворяло бы уравнению установившихся колебаний линейно-упругой среды

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } U - \mu \text{rot rot } U + \rho \omega^2 U = 0,$$

условиям излучения и совместно с полем падающей волны одному из граничных условий

$$D_n[U_0(M) + U(M)] = 0, \quad M \in S, \quad (1)$$

$$U_0(M) + U(M) = 0, \quad M \in S, \quad (2)$$

$$D_n[U_0(M) + U(M)] + Z(M) [U_0(M) + U(M)] = 0, \quad M \in S, \quad (3)$$

где λ , μ — константы Ламе; ρ — плотность материала пространства; M — точка пространства; D_n — дифференциальный оператор вида

$$D_n = (\dots) = 2\mu \text{grad}(\dots) \mathbf{n} + \lambda n \text{div}(\dots) + \mu \mathbf{n} \times \text{rot}(\dots);$$

\mathbf{n} — вектор внешней нормали к поверхности S рассеивающего тела, а граничные условия (1)–(3) соответствуют рассеянию на соответственно акустически мягкой, акустически жесткой и импедансной (включение из другого материала) границах.

Для существенного упрощения вычислений предлагается вынести источники рассеянного поля из области определения краевой задачи. Получающийся таким образом новый метод расчета можно назвать методом вынесения источников. Интенсивность каждого из источников остается конечной, как и количество источников, а поле, создаваемое вдоль рассеивающей поверхности каждым из них, является гладкой функцией.

Расчет методом вынесения источников заключается в следующем. Предполагается, как и при использовании любых численных методов, что получаемое решение точно удовлетворяет поставленным условиям в конечном количестве точек рассеивающей поверхности. При увеличении их количества получаемые приближения сходятся к точному решению. Поскольку оно заранее неизвестно, то в качестве критерия сходимости берут точность удовлетворения данных приближенных условий на

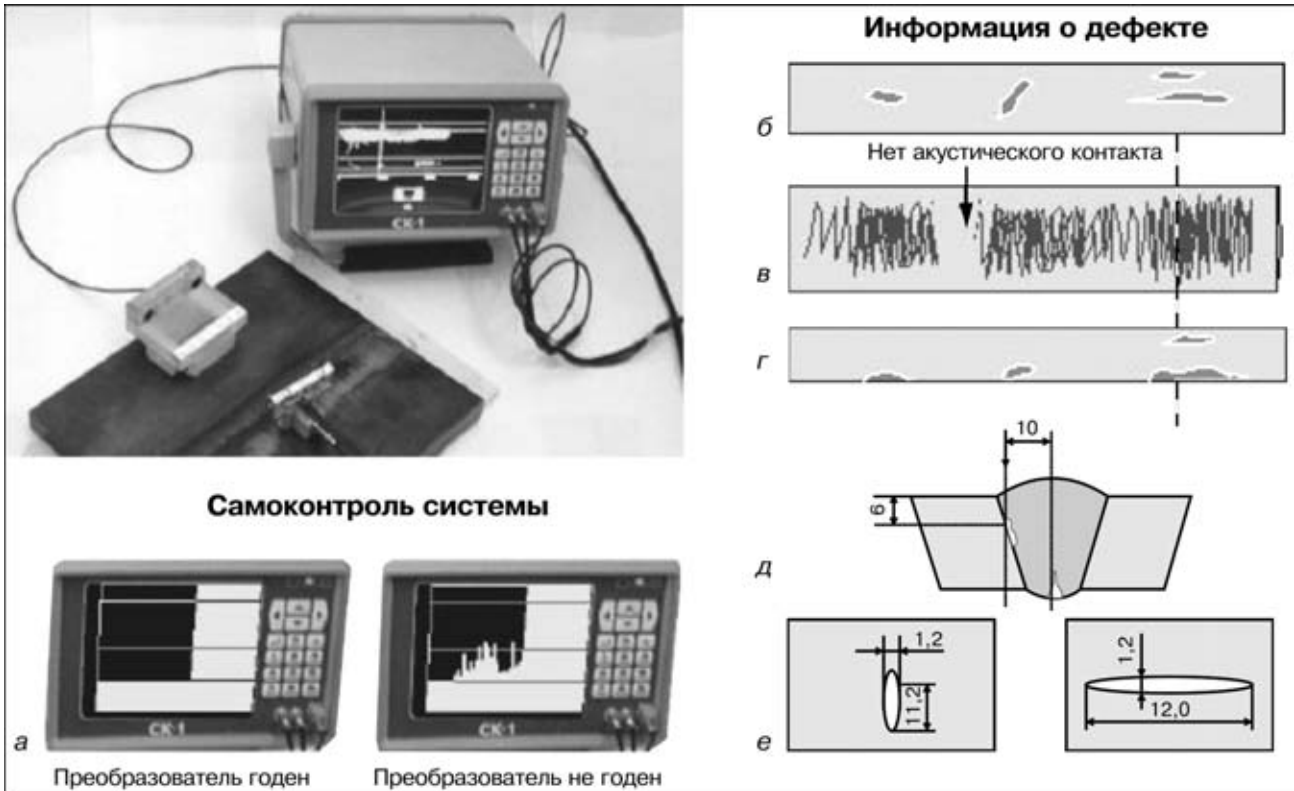


Рис. 1. Мультипрограммный портативный ультразвуковой дефектоскоп-томограф СК-1 (а) и примеры получения информации о дефектах с его помощью: б — вид сверху; в — след сканирования; г, д — соответственно продольное и поперечное сечение шва; е — томографическое изображение дефекта

рассеивающей поверхности, которая является точностью интерполяции на поверхности S решения по его значениям в системе выбранных точек.

Сравнение предлагаемого метода расчета с другими методами и экспериментальными данными позволяет сделать вывод о его эффективности применительно к задачам рассеяния продольных и поперечных волн в упругой среде на различных отражателях.

Решение этой задачи позволило разработать такой алгоритм обработки информации, который восстанавливал бы объемное изображение только при сканировании в одной плоскости. Полученные теоретические результаты реализованы в ультразвуковом дефектоскопе-томографе СК-1 (рис. 1), оригинальная часть которого, кроме алгоритмов обработки получаемой информации, заключается в возможности использования трехмерной системы координат.

С помощью дефектоскопа-томографа получают полную информацию о дефектах. На его экране сварной шов отображается сверху (эквивалентно рентгенограмме, рис. 1, б), сбоку (сечение вдоль шва, рис. 1, г) и с торца (сечение поперек шва, рис. 1, д) с указанием эквивалентных размеров и координат дефектов. Прибор производит также автоматическое измерение полуосей интерполирующего эллипсоида (рис. 1, е). Дополнительно на экране отображается след сканирования (рис. 1, в), свидетельствующий о качестве акустического контакта, траектории и скорости перемещения преобразователя оператором. Кроме того, СК-1 предназначен для выполнения следующих функций:

- автоматической настройки чувствительности;
- измерения параметров и паспортизации преобразователей, применяемых совместно с дефектоскопом;
- накопления и сохранения результатов контроля в процессе его проведения с целью последующего внесения в базу данных или представления в виде документа.

Процедура контроля с помощью СК-1 состоит в перемещении преобразователя по поверхности объекта вдоль шва, с противоположной стороны которого расположены два приемных микрофона, и измерении функции $F(x, t)$ электрического напряжения на выходе преобразователя в каждом положении x из интервала $x_0 \leq x \leq x_1$ и в каждый момент времени t из интервала $t_0 \leq t \leq t_1$, где x_0, x_1 — соответственно начальные и конечные показания датчика положения преобразователя; t_0, t_1 — интервал времени возможного появления эхосигналов в зоне контроля. Полученные результаты обрабатываются по формуле

$$\varphi(x, z) = \int_{x_0}^{x_1} F(x - x'_1) \frac{2}{c} \sqrt{(x - x'_1)^2 + z^2} \times \\ \times d_0 \left(\frac{x - x'_3}{\sqrt{(x - x'_1)^2 + z^2}} \right) dx'_1,$$

где d_0 — согласующий коэффициент пучка.

Затем происходит построение и вывод изображения на экран по алгоритму

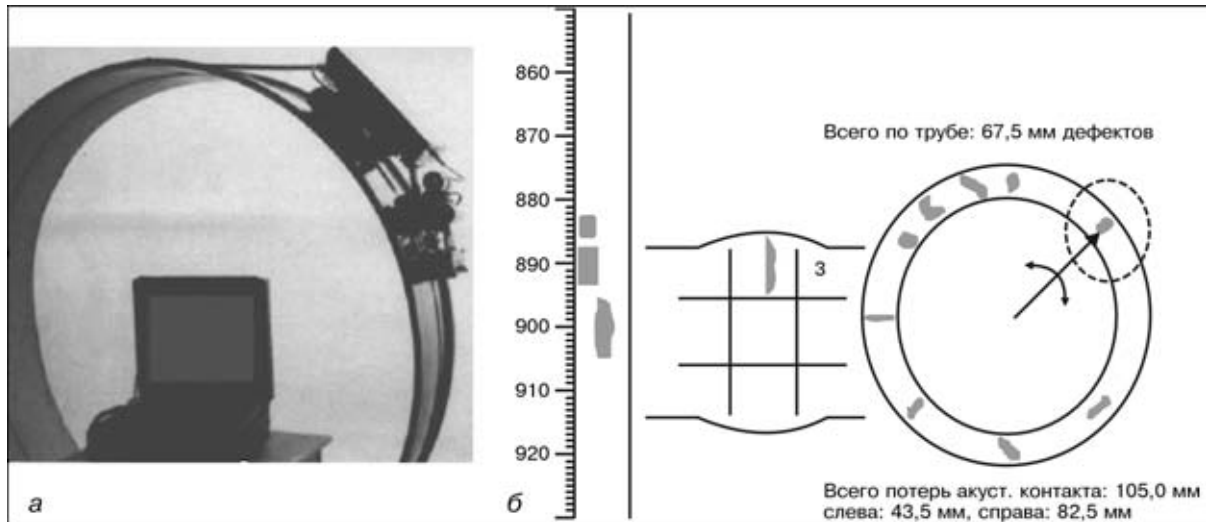


Рис. 2. Общий вид автоматизированной установки ультразвукового контроля «Автокон-МГТУ» (а) и отображение результатов контроля на экране монитора (б)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{засветит точку, если } \frac{|\varphi(x, z)|}{\max|\varphi(x, z)|} \geq \frac{1}{2}; \\ \text{погасить точку, если } \frac{|\varphi(x, z)|}{\max|\varphi(x, z)|} < \frac{1}{2}. \end{array} \right.$$

Прибор работает в диапазоне частот от 1 до 5 МГц. При этом разрешающая способность по изображению составляет примерно $(1,0 \dots 1,2)\lambda$.

В энергонезависимой памяти прибора может быть размещено до 180 настроек на контроль различных объектов. Прибор может быть применен для контроля объектов из металлов и пластмасс в широком диапазоне толщин.

Для изделий большой протяженности целесообразно использовать установку автоматизированного ультразвукового контроля «Автокон-МГТУ», производительностью более 1 м/мин (рис. 2, а). Она состоит из трех основных частей: роботизированного сканера на магнитных колесах, электронного блока и соединительного кабеля длиной 20 м. На сканере закреплен акустический блок из восьми пьезопреобразователей, которые обеспечивают прозвучивание сечения шва толщиной от 4 до 20 мм без поперечного сканирования с равномерной чувствительностью (± 2 дБ). Эти же преобразователи используются для слежения за качеством акустического контакта. Благодаря наличию магнитных колес не требуется проведение



Рис. 3. Мультипрограммный восьмиканальный ультразвуковой дефектоскоп СК-2

крайне трудоемкой операции — установки дополнительных гибких направляющих для движения сканера.

Отличительной особенностью установки является наличие датчиков слежения за швом, которые обеспечивают погрешность ± 1 мм от оси шва при смещении кромок и перегибов. На экране электронного блока отображается информация о сварном шве — сверху и поперек (рис. 2, б).

Алгоритм обработки поступающих сигналов с высокой достоверностью позволяет идентифицировать дефекты как плоскостные и объемные. На ультразвукограмме, помимо типа дефекта, указывается также его протяженность и высота. «Автокон-МГТУ» предназначен для контроля труб или емкостей диаметром 500 мм и выше при толщине стенки 4...20 мм. Рабочий температурный интервал составляет $-40 \dots +40$ °С. Масса сканера 8 кг, а общая масса установки 18 кг.

В настоящее время в МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана новая модификация универсальной установки СК-2 (рис. 3). В отличие от известных многоканальных установок она позволяет производить с высокой степенью точности измерения колебаний амплитуды акустического контакта отдельно по каждому каналу без применения дополнительных акустических преобразователей. Это в значительной мере повышает достоверность автоматизированного контроля, поскольку удается компенсировать потери акустического контакта по каждому каналу отдельно. Установка работает при температуре от -40 до $+60$ °С. Масса электронного блока составляет 5 кг.

Для оценки уровня работоспособности объекта не всегда достаточно знать форму и размеры имеющихся в нем локальных дефектов. Немалое влияние на остаточный ресурс объекта оказывает наличие остаточных напряжений в различных элементах его конструкции. Существует множество приборов для оценки остаточных напряжений, основанных на измерении различных характеристик магнитных, электромагнитных или ультразвуковых полей. Их общим недостатком являются низ-

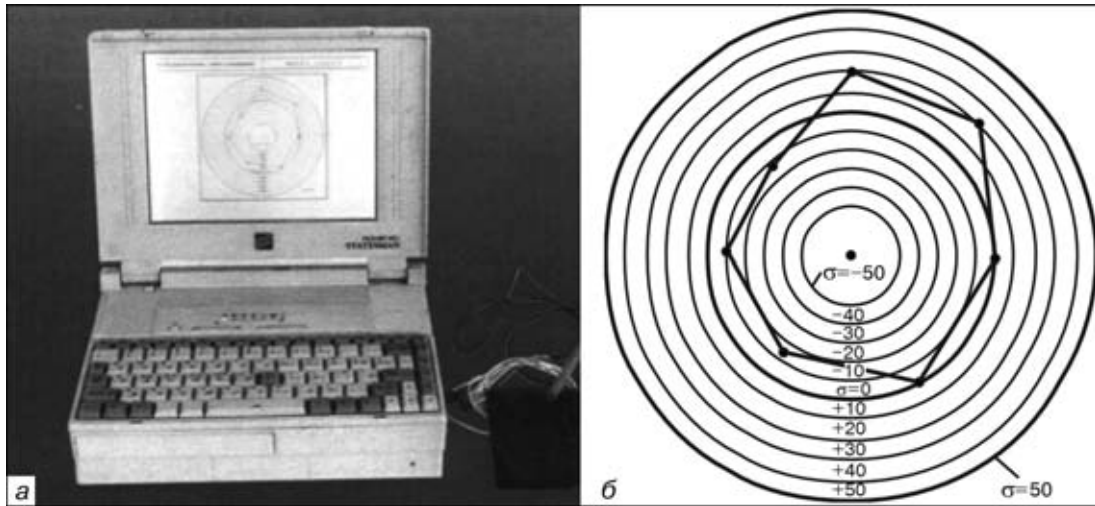


Рис. 4. Спектрально-акустическая система контроля механических напряжений «Астрон»: а — общий вид системы; б — определение напряжений по диаметру трубы

кая точность измерения (20...25 %). В центре «Сварка и контроль» МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан образец автоматизированной акустической системы, предназначенной для оценки структурных и прочностных характеристик материалов (рис. 4). Работа системы основана на анализе связи между параметрами спектров импульсов упругих волн, распространяющихся в исследуемом материале, и его физико-механическими и структурными характеристиками.

В материал исследуемой детали или элемента конструкции излучаются упругие широкополосные акустические импульсы. Центральная частота спектра выбирается в диапазоне 1...15 МГц в зависимости от типа материала. В соответствии с толщиной исследуемого материала для анализа используют либо объемные, либо поверхностные волны.

Акустический импульс при распространении взаимодействует с основными компонентами структуры материала — зернами, микротрещинами, микropорами, внутренними напряжениями, влияющими на спектр сигнала. В процессе проведения комплекса обучающих экспериментов устанавливаются корреляционные или функциональные связи между спектрально-акустическими параметрами и структурно-механическими характеристиками материала предполагаемого объекта обследования. В основу измерительного алгоритма положен способ определения временных задержек, фигурирующих в уравнениях, связывающих скорости распространения упругих волн с действующими упругими напряжениями. Выбираются два импульса, прошедшие различные акустические пути. Задержка, используемая в алгоритме акустоупругости, рассчитывается по формуле

$$\tau = \tau_0 - \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} \{ \arctg[B_2(f_i)/A_2(f_i)] - \arctg[B_1(f_i)/A_1(f_i)] \},$$

где τ_0 — задержка переднего фронта второго анализируемого импульса; A , B — соответственно синусный и косинусный члены Фурье-преобразования;

f_i — i -я спектральная частота из выбранного информативного частотного диапазона; K — общее количество спектральных частот.

Для определения напряжения в исследуемом объекте измеряют необходимые задержки, извлекают из базы данных напряжения в соответствии с установленными ранее акустоупругими зависимостями. Погрешность определения изменения напряжений составляет 5...10 МПа. Разработанная система выполняет следующие функции:

- измерение напряжений, возникающих при монтаже или сборке плоских элементов конструкций способом клепки, сварки, склейки и т. д.;

- измерение перераспределения напряжений в элементах сложных статически неопределимых систем, при их ремонте, например, путем замены элементов;

- мониторинг напряженного состояния ответственных силовых элементов машин и конструкций в процессе их испытаний или эксплуатации;

- оценку пространственной неоднородности напряжений в материале плоских элементов конструкций путем сканирования поверхности;

- контроль и регистрацию на внешних носителях временных диаграмм динамических напряжений, возникающих в ответственных элементах конструкций под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Из известных в мировой практике методов диагностики сварных соединений доминирующее положение занимает метод акустической эмиссии (АЭ). Методология АЭ диагностики, разработанная в МГТУ им. Н. Э. Баумана, базируется на применении новых комплексных энергетических параметров АЭ, спектрального и регрессивного анализов, а также использовании отдельных волновых компонент для идентификации типа дефекта, оценки степени его развития и стадии предразрушения конструкции от развивающейся трещины. Возможна АЭ диагностика механизма пластической деформации, микро- и макротрещинообразования, различных видов коррозии и коррозионного растрескивания.

Векторно-энергетический анализ и экспериментальные исследования распределения плотности



потока энергии, мощности сигналов АЭ и их энергетических спектров для продольной и поперечной волн, а также суммарного поля вокруг трещины показали перспективность АЭ дефектоскопии, основанной на регистрации отдельных волновых компонент. Для исследованных объектов установлена идентичность энергетического спектра продольной и поперечной волн, а также суммарного поля АЭ от единого источника возмущения (деформирования путем скольжения, развития трещин). Выявлена линейная зависимость между механической энергией деформирования и акустической энергией суммарного поля, а также продольной и поперечной волн. Показано, что распределение энергии суммарного поля АЭ и его отдельных компонент вокруг вершины трещины подобно конфигурации зоны пластической деформации. Оказалось эффективным использование для идентификации источников АЭ вероятностных областей признаков диагностируемых процессов (источников АЭ), построенных путем статистической обработки параметров потока сигналов АЭ.

Так, например, при использовании эллипсов рассеяния (средняя энергия сигналов B и медианная частота) как информативных признаков идентификация пластической деформации и развивающейся микротрещины по этой методике осуществляется с высокой достоверностью. Погрешность

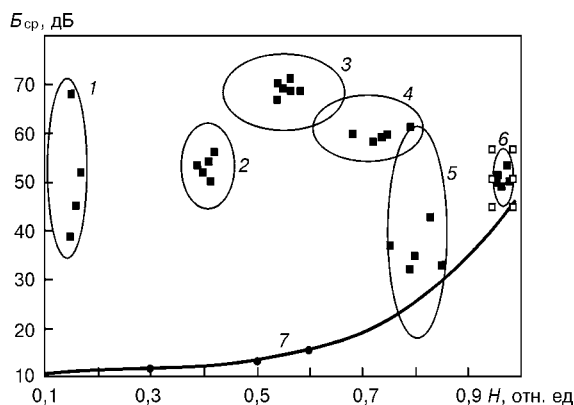


Рис. 5. Результаты АЭ испытаний крупногабаритных образцов на диагностической диаграмме: 1 — нестабильная трещина, несправ; 2 — подрастающая трещина; 3 — развивающееся расслоение; 4 — множественные объемные дефекты; 5 — пластическая деформация, стабильная трещина; 6 — коррозионное растрескивание; 7 — уровень бездефектности

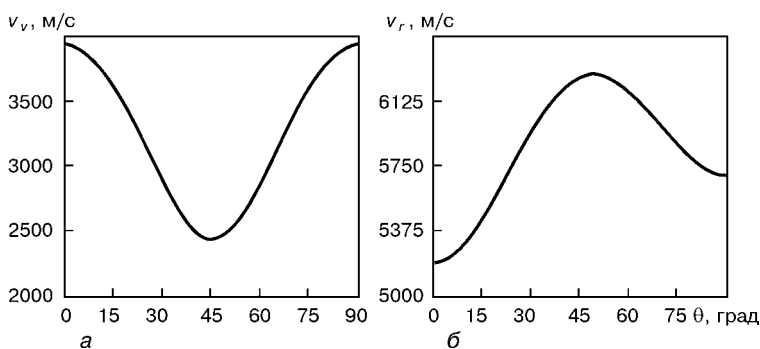


Рис. 6. Зависимости скорости вертикально поляризованной поперечной (а) и продольной (б) волны в трансверсально-изотропной среде от угла падения θ на кристаллиты

классификации микротрещины на фоне пластической деформации составила 3 % (рис. 5).

Созданы высокочувствительные полосовые и широкополосные преобразователи АЭ в диапазоне частот 20...5000 кГц чувствительностью $2 \cdot 10^8$ В/м.

Научные и методические разработки были положены в основу создания 16-канальной АЭ измерительной системы, обеспечивающей в реальном масштабе времени локализацию, идентификацию и диагностику степени опасности развивающегося дефекта.

Достаточно актуальной проблемой является создание надежных средств неразрушающего контроля сварных соединений нержавеющей аустенитных сталей. В МГТУ им. Н. Э. Баумана проведены работы, позволяющие представить новый подход к технологии ультразвукового контроля крупнозернистых материалов. На основе анализа процесса кристаллизации металла рассчитывают макроструктуру сварного шва или отливки и строят модель кристаллизации. Затем изучают прохождение ультразвуковых волн через неоднородную анизотропную поликристаллическую среду и строят акустическую модель, позволяющую учесть основные факторы ослабления: затухание; преломление на границе сплавления и прозрачность границы сплавления; отклонение распространения луча от волновой нормали и деформацию звукового пучка.

Расчет рассеянных полей V_j^s в крупнозернистых средах, смоделированных как совокупность разориентированных между собой зерен, выполнен при использовании объемного интегрального уравнения типа Липпмана-Швингера (его борновского приближения) с помощью функции Грина $G_{ij}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'')$:

$$V_j^s(\mathbf{r}'', V_i^0) = \int_v G_{ij}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}'') f_i(\mathbf{r}', V_i^0) d\mathbf{r}'$$

где $f_i(\mathbf{r}', V_i^0)$ — функция, зависящая от амплитуды падающей волны и описывающая влияние неоднородностей; \mathbf{r}' — радиус-вектор точки наблюдения; \mathbf{r}'' — радиус-вектор источника; V — объем рассеивателя (индекс s обозначает рассеянное поле). В результате решения получены аналитические выражения и рассчитаны коэффициенты рассеяния для крупнокристаллитной структуры, являющейся при используемых в ультразвуковой дефектоскопии частотах трансверсально-изотропной средой, а для крупнозернистой структуры — изотропной средой.

Существенное значение при ультразвуковом контроле аустенитных сварных соединений имеет задача о прохождении границы сплавления, поскольку установление направлений и определение интенсивностей трансформированных на границе волн необходимо для правильной интерпретации результатов контроля. Для упрощения вычислений предложено использовать координатную систему, привязанную к волновому вектору. Это позволило получить достаточно простые выражения для определения

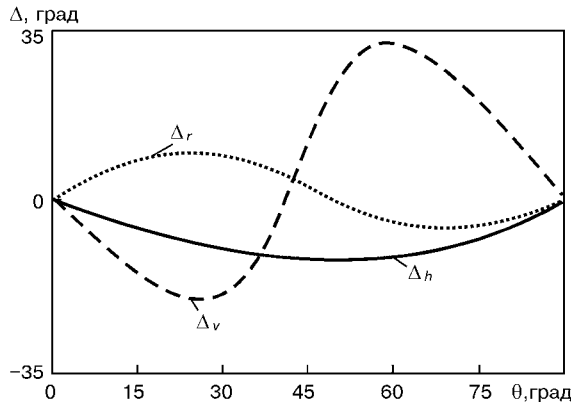


Рис. 7. Отклонение акустической оси от волновой нормали в металле аустенитного сварного шва в зависимости от направления падения на кристаллит

скоростей продольной $v_r(\theta)$ и вертикально поляризованной поперечной $v_v(\theta)$ волн в трансверсально-изотропной среде (рис. 6)

$$v_r(\theta) = \sqrt{C_{11} - 0,25A[\sin^4\theta + 2\sin^2(2\theta)]} \frac{1}{\sqrt{\rho}};$$

$$v_v(\theta) = \sqrt{C_{44} - 0,44A\sin^2(2\theta)} \frac{1}{\sqrt{\rho}};$$

где θ — угол падения на кристаллиты; $A = C_{11} + C_{12} - 2C_{44}$; C_{11} , C_{12} и C_{44} — упругие постоянные кристалла кубической системы, а также рассчитать коэффициенты прохождения волнами различных поляризаций границы изотропной (зона термического влияния) и трансверсально-изотропной (металл шва) сред.

В анизотропных материалах направление распространения энергии не совпадает с направлением ультразвуковой волны. Это приводит к отклонению ультразвукового луча от волновой нормали. В направлении вектора Умова обнаружены максимальные амплитуды смещений частиц в волне, которые

регистрируются преобразователями. На основе анализа направлений переноса энергии волн нами получены соотношения, устанавливающие зависимость отклонения лучей Δ от направления волнового вектора и упругих постоянных монокристалла (рис. 7):

$$\Delta_r(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta(\cos^2\theta - 0,75\sin^2\theta)}{2C_{11} - A(\cos^4\theta + 2\sin^2\theta)/2}\right\},$$

$$\Delta_v(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta(\sin^2\theta - 0,75\cos^2\theta)}{2C_{44} + 7A\sin^2 2\theta/8}\right\},$$

$$\Delta_h(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta}{8C_{44} + 2A\sin^2\theta}\right\},$$

где θ — угол между волновым вектором и осью кристаллита; индексы r , v и h относятся к соответственно продольной, вертикально поляризованной и горизонтально поляризованной поперечным волнам.

Анализ изменения скорости ультразвуковых волн и отклонения акустического луча от волновой нормали показал, что в кристаллитной структуре зафиксирована рефракция ультразвука, что приводит к деформации звукового пучка и искажению волновых фронтов.

Разработанная акустикристаллизационная модель реализована в виде пакета прикладных программ на ПЭВМ, предназначенного для определения оптимальных параметров и интерпретации результатов контроля крупнозернистых материалов с различной кристаллитной структурой. Общность и точность созданной модели допускает ее включение в состав современных ультразвуковых дефектоскопов.

New devices providing information on internal structure of a part and its defects are described. Acoustic-emission systems allow identification of such dangerous sources as plastic deformation, initiation and propagation of cracks and corrosion damages. Ultrasonic tomograph registers information on configuration, size and orientation of defects. Spectral-acoustic monitoring systems are suggested for measuring volumetric two-axial stresses. New solution to a practical problem of development of technology and equipment for non-destructive testing of austenitic welds in joints from 5 to 100 mm thick is described.

Поступила в редакцию 31.01.2003