

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ КУСОЧНО-НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЫ

Баев А.Р., Майоров А.Л., Захаренко В.В., Асадчая М.В.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

Основными задачами промышленной отрасли является повышение качества и надежности выпускаемой продукции. Одно из направлений решения данных задач заключается в развитии упрочняющих технологий, включая создание защитных слоев на поверхности металлоизделий, имеющих сложную конструкцию и рельеф, путем пайки, напыления, сварки и др. [1]. Необходимо отметить, что контроль качества сцепления материалов таких конструкций неразрушающими методами является необходимым условием повышения их надежности. Наиболее эффективным методом такого контроля является ультразвуковой, который основан на особенностях взаимодействия поля ультразвуковой (УЗ) волны с дефектной областью и обладает высокой чувствительностью ее обнаружения. Использование иных известных методов контроля [2] не позволяет решить ряд задач, связанных с обнаружением дефектов, имеющих слабую способность отражения звука.

Решение этой актуальной задачи было предложено [3] и развито в работе [4]. Используется метод оптимизации апертуры фаз мнимых когерентных источников (МКИ) упругих волн, рассеянных от неоднородной границы, которая представляет собой зону сцепления с дефектной S_D и недефектной S_N областями. В свою очередь подбираются такие условия излучения-приема УЗ волн, при которых сдвиг фаз $\Delta\varphi$ между опорной волной и отраженной от дефекта отличен от нуля и близок к $\Delta\varphi \rightarrow \pi$ [5]. Проведенный анализ технологии изготовления неразъемного соединения установил, что наиболее объективной характеристикой контроля качества сцепления материалов ультразвуковым методом является фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, изменяющийся от нуля до π . Выявление дефектов со слабой отражающей способностью ($\Delta\varphi \ll \pi$) является важной производственной задачей контроля сцепления биметаллических, металлических и полимерных материалов. Необходимо отметить, что при решении подобных задач (контроль поверхностей твердых тел сложного рельефа, контроль элементов, расположенных в труднодоступных местах) поверхностными волнами (ПАВ) требуется использование специальных устройств - отражателей звука (ОЗ), ранее предложенных в [5], которые позволяют контролировать стабильность опорного сигнала создаваемого источником излучения УЗ волн. Решению рассмотренных задач и посвящена настоящая работа.

Проведено теоретическо-экспериментальное моделирование рассеивания УЗ волн неоднородной границей в двумерной постановке задачи и аксиальном приближении. Причем поле от кусочно-неоднородной границы сред может быть представлено в общем виде:

$$A_0^*(M) = \sum_{j=1}^n D_{12} \cdot D_{21} \cdot S_{jA} \cdot R_{iA} \cdot F_{jA} \cdot \exp(-j\vartheta_j),$$

где D_{12} и D_{21} – коэффициенты звукопрозрачности на границе объекта контроля при вводе в него ультразвуковой волны и выходе из него соответственно; $R_{jA} = R_j/R_A$, где R_j и R_A – коэффициенты отражения; $S_D = S/S_A$, $S_j = S' \cos\beta$, $S_A = S'_A \cos\beta = S_D + S_N$, $F_{jA} = F_j/F_A$, F_j и F_A – интегральные функции, характеризующие направленность j -го МКИ с фазовым сдвигом θ_j ; $F_i \sim \iint_{S_i} \chi_i(\varphi) \exp(-j\vec{k}_R \vec{r}_{BM}) \cdot \frac{1}{r_{BM}} dS$, где $\chi_i(\varphi)$ – функция направленности элементарного источника; \vec{k}_R – волновой вектор; \vec{r}_{BM} – радиус-вектор, проведенный от точки i -го участка отражения в точку наблюдения.

Предполагается, что апертура источника излучения $d = a + b$, где a соответствует протяженности дефектной, а b – бездефектной области, на которую одновременно падает акустический пучок (АП). Одновременно проведены экспериментальные исследования отражения УЗ волн от неоднородной границы, характеризуемой сдвигом фаз $\Delta\varphi$, изменяемом в диапазоне $\Delta\varphi = 0 - \pi/2$. Рабочая частота источника 1,8 МГц. Моделирование малых сдвигов фаз $\Delta\varphi$ осуществлялось путем выполнения выступов малой высоты h_i на оппозитной поверхности образцов, обеспечивающих временную задержку $\Delta t \approx h_i/C$, где C – скорость распространения упругой волны в образце.

На рисунке 1 представлена схема отражения УЗ волны от неоднородной границы в виде акустической нагрузки (АН), создаваемой отражателями ультразвука (ПАВ), контактирующими с образцом через тонкий контактный слой. Постоянство прижима моделируемых ОЗ к образцу осуществлялось с помощью укрепленных на них источников магнитного поля.

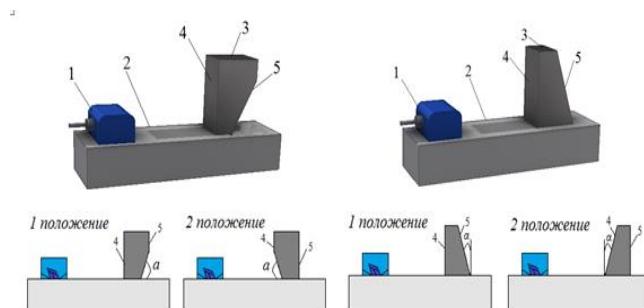


Рисунок 1 – Моделирование схем УЗК с использованием контактных ОЗ различной формы: 1 – пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП); 2 – объект контроля; 3 – ОЗ; 4 – передняя отражающая звук граница; 5 – оппозитная отражающая звук граница; $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

Проведен теоретический анализ акустического тракта прохождения и отражения ПАВ через отражатель с учетом трансформации волны Рэлея в волну Стоунли и обратно. При этом уравнение баланса энергии волны в первом приближении может быть представлено:

$$\frac{W_R}{W_{R0}} \approx \tilde{D}_{R,R^*} + \tilde{R}_1 + \tilde{D}_{R,St}(\tilde{D}_{St,R} + \tilde{D}_{St,R^*} + \tilde{R}_2),$$

где $\tilde{D}_{R,St}$ и $\tilde{D}_{St,R}$ – коэффициенты прохождения по энергии ПАВ через переднюю и оппозитную границу ОЗ соответственно и распространяющуюся вдоль контактной поверхности объекта; \tilde{D}_{R,R^*} и \tilde{D}_{St,R^*} – коэффициенты, характеризующие прохождение энергии ПАВ в виде волны Рэлея по ближайшей и дальней вертикальной стенке ОЗ соответственно; \tilde{R}_1 и \tilde{R}_2 – коэффициенты отражения ПАВ от передней (волна Рэлея) и оппозитной (волна Стоунли) границы отражателя.

Результаты теоретического исследования поясняются на рисунках 2, 3, где приведены зависимости диаграмм направленности рассеянных неоднородной границы волн при разном значении $\Delta\phi$, характеризующих качество сцепления материалов. Как видно из рисунков, наиболее оптимальным способом обнаружения слабоотражающих дефектов является тот, при котором угол приема отраженных УЗ волн соответствует углу минимума первого порядка, который зависит от направления движения ПЭП относительно границы дефектной и бездефектной областей, при этом изменение составляет 20-30 и более дБ. Отметим, что при проведении измерений использование углов приема, превышающих углы первого порядка, не является эффективным, вследствие слабого проявления эффекта интерференции рассеивания волн от бездефектной поверхности. Методически показано, что использование моделирования процессов отражения УЗ волн указанным способом (выполнение выступов на отражающей поверхности) корректно для нормально падающих волн при $h/\lambda \sim 10$. Результаты эксперимента, проведенные с использованием ПАВ и объемных волн в указанном диапазоне $\Delta\phi = 0 - \pi/2$, находятся в хорошем качественном и количественном (оценочном) соответствии.

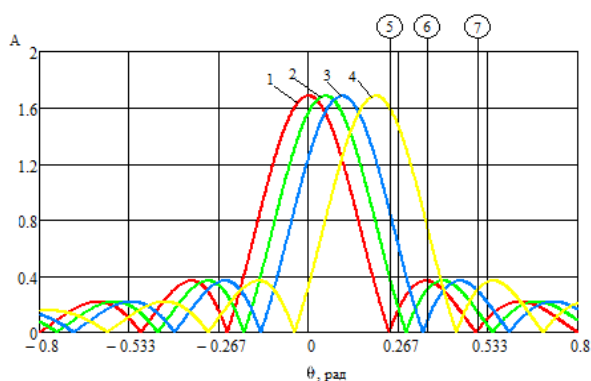


Рисунок 2 – Характерная эволюция диаграммы направленности мнимых источников ультразвуковых волн рассеянных от неоднородной границы при $a=b$ и $d/\lambda=2$ и $f=1,8$: $\Delta\phi$, рад = 0 (1), 0.05 (2), 0.1 (3) (4) 0.2 (4)

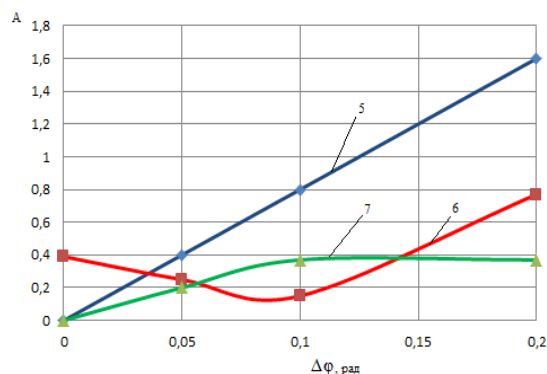


Рисунок 3 – Амплитудная зависимость от фазового сдвига $\Delta\phi$ на линиях 5-7 (рис.2)

Теоретические исследования диаграмм направленности и их амплитудные параметры от геометрии поверхности ОЗ поясняются на рисунке 4.

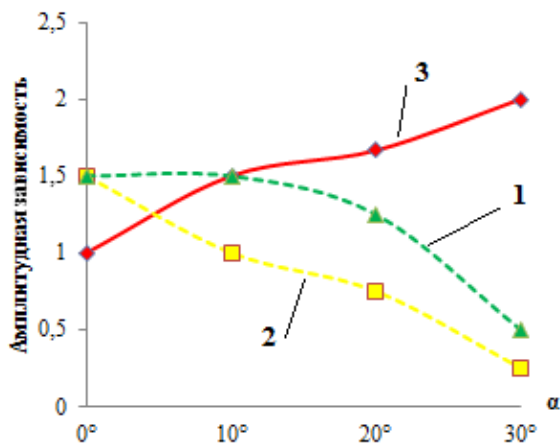


Рисунок 4 – Отражение ПАВ от передней грани ОЗ при разных положениях и геометрии (рис.1): при первом положении (1), при втором положении(2), отношение двух положений(3)

На основе исследований получены важные характеристики отраженных ПАВ от передней грани ОЗ различной конфигурации, благодаря чему выявлена оптимальная его конфигурация, предлагаемая для использования при проведении контроля поверхности изделий.

Список литературы:

1. Контроль качества конструкционных материалов: [справочное издание] / Л. П. Герасимова, Ю. П. Гук. - Москва: Интермет Инжиниринг, 2010. – 848 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
3. Баев, А.Р. Ультразвуковой контроль качества поверхностного упрочнения на основе метода гониометра/ А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.М. Тищенко, М.В. Асадчая / Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Приборостроение-2010»–Минск, БНТУ, 2010. – С. 28-30.
4. Баев, А.Р. Рассеяние УЗК на неоднородной границе при контроле неразъемных соединений / А.Р. Баев, М.В. Асадчая, А.Л. Майоров, О.С. Сергеева // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. - №1. - С. 25-38.
5. Баев, А.Р. Создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, О.С. Сергеева // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013, №1. – С. 42–55.