

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ МАТЕРИАЛА С УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНОЙ

К.Ю. БЕЗЫМЯННАЯ, К.А. КОМАРОВ, О.В. ТАЛКО

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

Изучены закономерности формирования акустического поля малых интенсивностей вблизи усталостной трещины и возможности использования этих закономерностей для диагностики состояния материала.

ВВЕДЕНИЕ

Усталостная трещина – широко распространённый вид дефекта реальных конструкций, влияющий на их живучесть [1]. Особенно критично появление трещин усталости в деталях летательных аппаратов. Поэтому решение задач выявления и оценки опасности таких трещин имеет важное значение. Перспективным с этой точки зрения является изучение свойств материалов, позволяющее оценить степень повреждённости материала конкретного конструктивного элемента независимо от истории нагружения и использовать эту оценку для прогнозирования остаточной долговечности изделия. С другой стороны, усталостная трещина представляет собой двумерный дефект, являющийся характерным элементом несовершенных контактов порошковых материалов. Поэтому так же представляет интерес изучение усталостной трещины как модели двумерных дефектов порошковых материалов. Для решения такой задачи могут быть использованы акустические неразрушающие методы [2]. Малоизученным направлением решения этой задачи является использование нелинейных эффектов в акустических полях материалов с усталостной трещиной [3]. Традиционные методы измерения нелинейных эффектов в акустических полях [4] далеко не всегда пригодны для этих целей в виду применения в них высокого уровня механических напряжений, которые могут привести к развитию этой трещины [5]. В последнее время появились работы [6-8], в которых показана перспективность использования нетрадиционных методов нелинейной акустодиагностики для решения задач материаловедения. Перспективность такого подхода обусловлена тем фактом, что нелинейность в результате структурной неоднородности материала может проявляться даже в акустических полях малой интенсивности [9]. Поэтому целью настоящего исследования было изучить закономерности формирования акустического поля малых интенсивностей вблизи усталостной трещины и возможности использования этих закономерностей для диагностики состояния материала.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на образцах из алюминиевого сплава Д16чАТ с усталостными трещинами. Сплав Д16чАТ выбран в связи с его широким использованием в летательных аппаратах. Образцы (рис. 1, а) представляли собой полосы, вырезанные из листового металла, имеющие прямоугольное сечение и концентратор в виде круглого сквозного отверстия в центральной части образца. Такая форма образцов удобна для

проведения и усталостных испытаний, и исследований акустического поля. Усталостные трещины в образцах создавались в результате их циклического нагружения на установке «Амслер». Для изучения влияния масштабного фактора при формировании акустического поля вблизи трещины из образцов были вырезаны элементы (рис. 1, б – г).

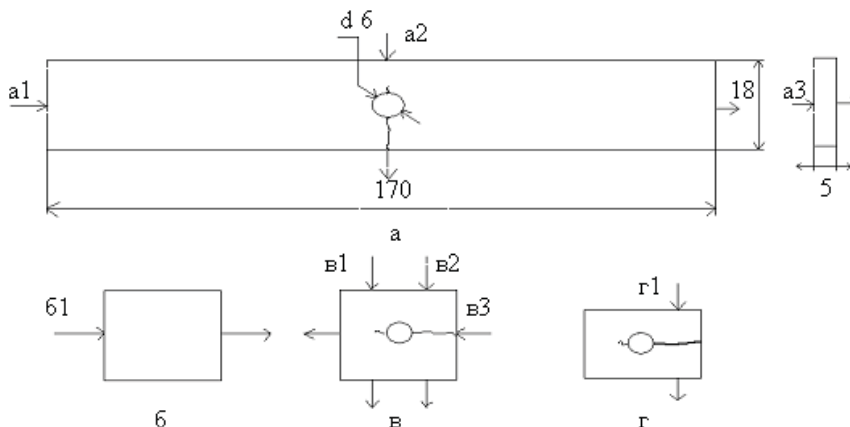


Рис. 1. Образцы для исследований:

а – исходный образец после усталостных испытаний (в дальнейшем образец 1); б – г – его фрагменты (образцы 2, 3, 4; номер 5 – соответствует образцу 3 с прозвучиванием вдоль трещины).

Априорно предполагалось, что взаимодействие упругой волны с трещиной (рис.2) можно представить в виде следующего соотношения

$$\psi_{\text{прош.}}(A_1, f_1, \varphi_1, \dots) = \psi_{\text{пад.}}(A_2, f_2, \varphi_2, \dots) \cdot F(l, \delta, \dots), \quad (1)$$

где $\psi_{\text{пад.}}$ и $\psi_{\text{прош.}}$ – падающая и прошедшая упругие волны соответственно; A_i, f_i, φ_i – амплитуда, частота и фаза соответствующей волны; F – функция, отражающая влияние трещины на падающую волну, отличается для продольной и поперечной волн; l, δ – длина и раскрыв трещины соответственно.

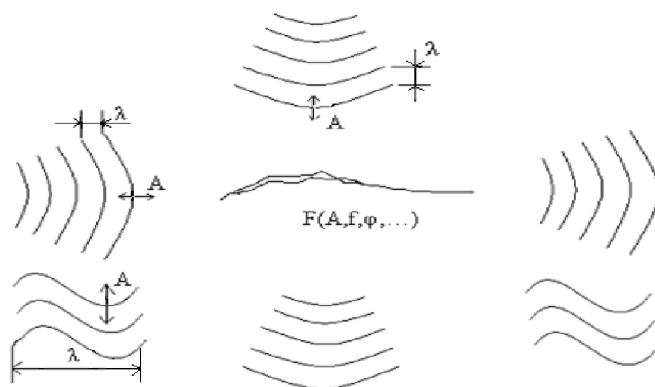


Рис. 2. Схема взаимодействия упругих волн с трещиной.

Исследования проводились на установке для прецизионных измерений параметров упругой волны, разработанной в ИПМ НАНУ (рис. 3) по двум методикам. Первая реализовала традиционный импульсный метод [4] измерения высших гармоник (рис. 4), а

вторая – оригинальный метод при непрерывном синусоидальном излучении (рис. 5). Обе методики преследовали цель при небольших уровнях возбуждения установить влияние трещины на параметры акустического поля в соответствии с выражением (1). Для этого методом сквозного прозвучивания на частоте 2 МГц возбуждали продольные упругие колебания в разных направлениях фрагментов указанных образцов (рис. 1) и измеряли уровень и частоту второй гармоники (рис. 4) и амплитудную характеристику материала (рис. 5).



а



б

Рис. 3. Установка для измерений параметров упругой волны:
а – аналоговый и б – цифровой варианты.

Результаты измерений по первой методике представлены на рис. 6 и 7, по второй – рис. 8-12. Здесь номера образцов и направлений прозвучивания соответствуют рис. 1.

При измерениях в образцах с развитой трещиной, начиная с некоторого уровня сигнала излучения, акустическое поле было нестабильно во времени (рис. 9). Использование специальной методики измерений позволили добиться стабилизации результатов (рис. 10).

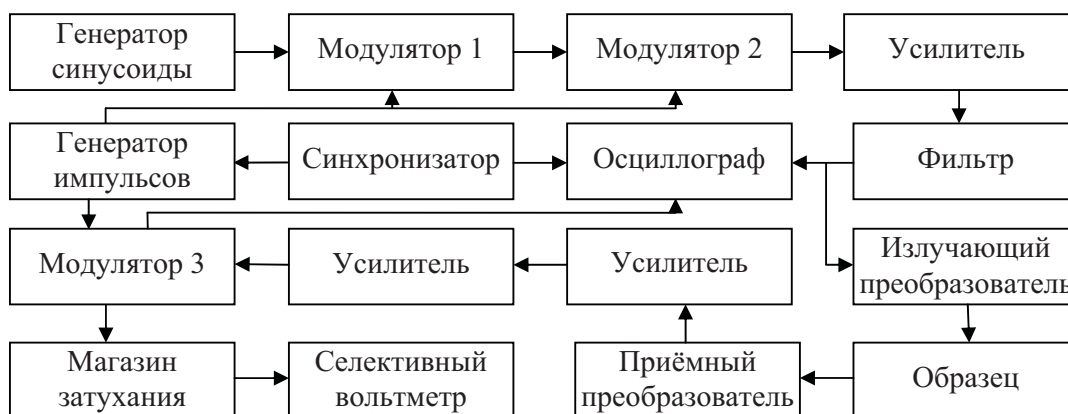


Рис.4. Структурная схема измерений импульсным методом.

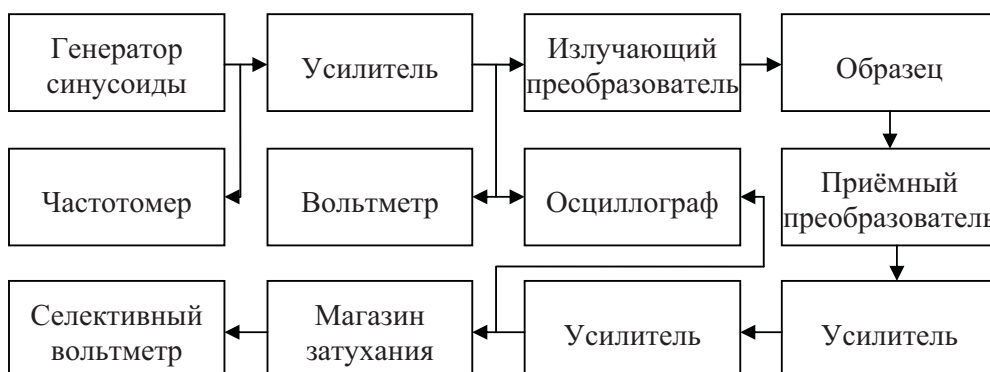


Рис. 5. Структурная схема измерений методом непрерывного синусоидального излучения.

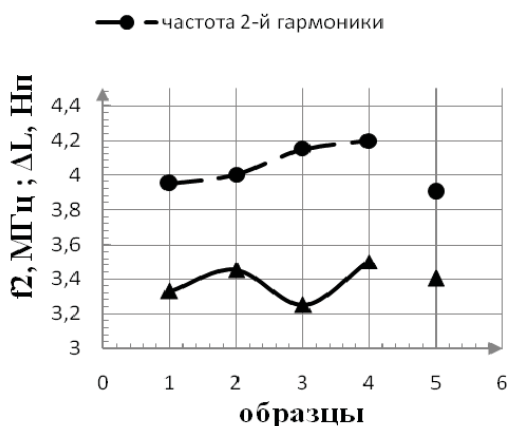


Рис. 6. Частоты и относительный уровень второй гармоники для различных образцов.

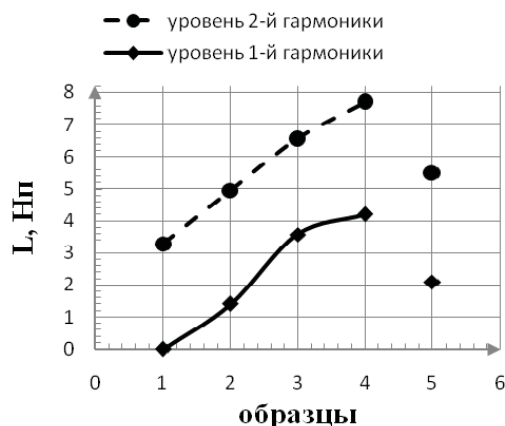


Рис. 7. Уровни первой и второй гармоник для различных образцов.

2. ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерения в исходном образце (рис.1) показали, что акустическое поле в нём нечувствительно к наличию трещины. Уменьшение масштаба озвучивания до соизмеримого с размером трещины позволило выявить влияние трещины на параметры упругой волны. Этот факт говорит о том, что искажение акустического поля трещиной сосредоточено вблизи самой трещины.

Результаты, полученные по первой методике, показали, что при малых амплитудах нагружения относительный уровень второй гармоники не коррелирует с параметрами трещины и не может служить информативным параметром. Такими параметрами могут быть абсолютное значение уровня первой гармоники, а также абсолютное значение уровня и частота второй гармоники.

Результаты, полученные по второй методике, показали, что при малых амплитудах нагружения амплитудная характеристика первой гармоники не чувствительна к трещине и не может служить информативным параметром. Таким параметром может быть амплитудная характеристика второй гармоники. Дополнительным индикатором наличия

трещины может служить нестабильность акустического поля при амплитудах нагружения превышающих для данного эксперимента 0,5 В на входе пьезопреобразователя.

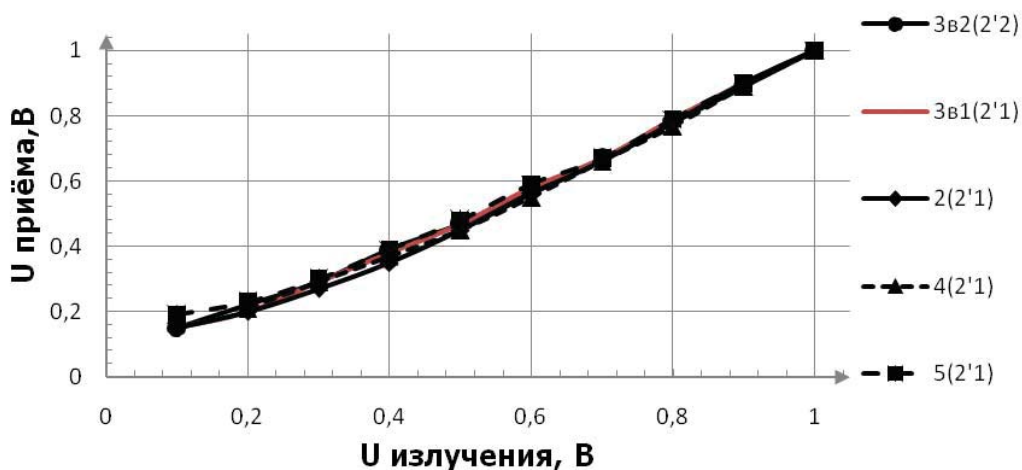


Рис.8. Амплитудная зависимость первой гармоники для всех образцов.

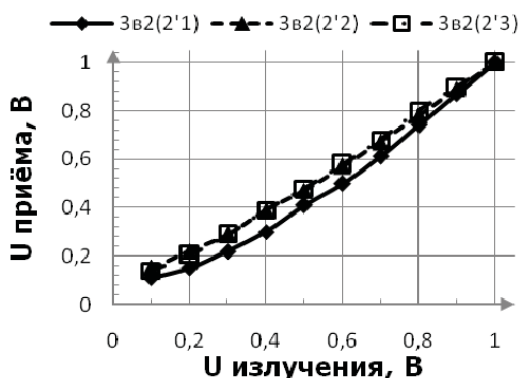


Рис. 9. Варианты амплитудной зависимости первой гармоники для образца с трещиной.

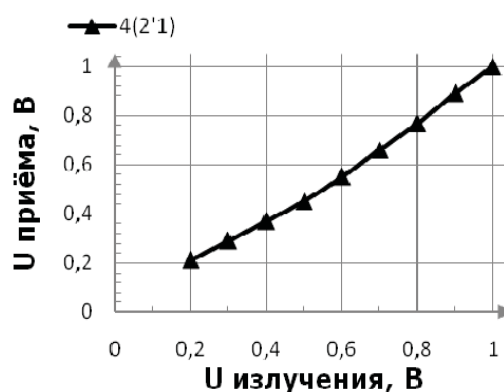


Рис. 10. Стабилизированная амплитудная зависимость первой гармоники для образца с трещиной.

Для обеих методик характерно влияние на величину информативного параметра направления облучения трещины.

ВЫВОДЫ

В результате работы показано, что при взаимодействии акустического поля с усталостной трещиной возникают нелинейные эффекты, величина которых существенно зависит от масштаба и уровня озвучивания, а так же направления упругих колебаний.

Полученные результаты носят качественный характер и могут быть положены в основу количественных методов выявления, локализации и оценки степени опасности усталостной трещины.

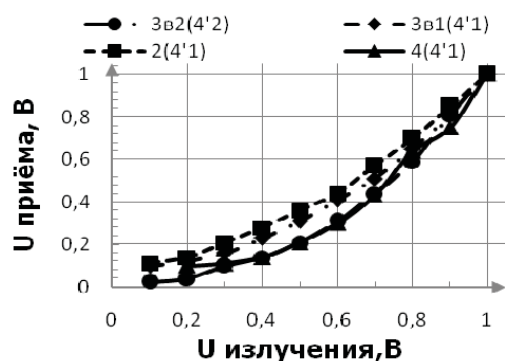


Рис. 11. Амплитудные зависимости второй гармоники для образцов с трещинами различного размера.

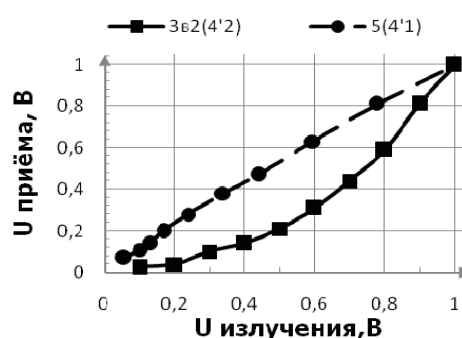


Рис.12. Амплитудные зависимости второй гармоники для образца с трещиной при различных направлениях её облучения.

Направлениями развития настоящей работы могут быть использование поперечных упругих волн для решения рассмотренной задачи и переход к относительным величинам при анализе корреляции нелинейных характеристик принимаемой упругой волны и параметров трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
2. Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Минск: Выш. шк., 1989. – 182 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П.Голяминой. - М.: Советская энциклопедия, 1979, - 400 с.
5. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А.Кузьменко. – К.: Наук. думка, 1979. 336 с.
6. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И., «Неклассические» проявления микроструктурно – обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН, 2006, т. 176, №1.
7. Nazarov V.E., Ostrovsky L.A., Soustova I.A., Sutin A.M. Nonlinear acoustics of microinhomogeneous media // Phys.Earth & Planet. Interiors, 1988, vol. 50, № 1, pp. 65-73.
8. V. Tournat, V. Zaitsev, V. Gusev, V. Nazarov, P. Bequin, B. Castagnede. Probing granular media by acoustic parametric emitting antenna: clapping contacts, nonlinear dilatancy and polarization anisotropy // Phys. Rev. Lett, 2004, vol. 92, № 8, p. 085502.
9. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Мадипура В.Т. Основы акустики. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.