

УДК 620.179.16

РАССЕЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ  
ТРЕЩИНОПОДОБНЫМ ДЕФЕКТОМ НОРМАЛЬНЫМ  
К ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОГО ТЕЛА

К. Е. АББАКУМОВ, Р. С. КОНОВАЛОВ  
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»  
Санкт-Петербург, Россия

Одним из известных типов звуковых волн распространяющихся на свободной границе твердого тела являются волны Рэлея [1]. Данный тип волн хорошо изучен и широко применяется в практике ультразвуковой дефектоскопии. При их использовании для обнаружения дефектов, выходящих на поверхность объекта или залегающих на небольшой глубине, весьма полезны количественные оценки коэффициентов отражения и прохождения этих волн в случаях пограничных дефектов различных форм и размеров. По данным металлографических исследований трещиноподобные дефекты, встречающиеся в различных объектах, могут отличаться заметным разнообразием своего строения. В частности, отмечается образование дефектов типа стресс-коррозии или слипания, в которых отдельные участки поверхностей трещин могут взаимодействовать друг с другом. В связи с этим существует необходимость учета распространения акустических волн вдоль трещины, образованной множеством выступов и впадин микрорельефа. Данная задача может быть решена в рамках модели “нежесткого” соединения в приближении «линейного скольжения» [2, 3].

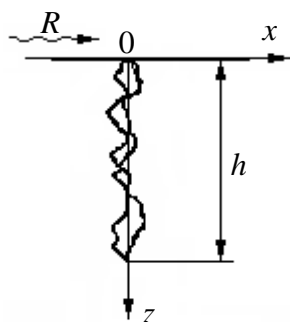


Рис. 1. Модель трещины

В данной работе рассматривалось упругое изотропное полупространство со свободной от напряжений гладкой поверхностью с нормальной трещиной глубиной  $h$ , по которой распространяется волна Рэлея ( $R$  на рис. 1). Аналогично в работе [4] определение компонент рассеянного поля волны Рэлея на трещиноподобном дефекте было построено на основе решения однородных уравнений Гельмгольца путем представления смеще-

ний в виде симметричной (*s*) и антисимметричной (*a*) компонент с последующей их сборкой в четверти  $x \geq 0, z \geq 0$ . Граничные условия для данных составляющих, можно представить в следующем виде для симметричных:

$$\sigma_{xz}^s = KGT [U_z^s(0^+, z) - U_z^I(0^-, z)], \quad 0 \leq z < h \quad (1)$$

$$\sigma_{xx}^s = 0, \quad 0 \leq z < \infty \quad (2)$$

$$U_z^s(0, z) = 0, \quad h \leq z < \infty \quad (3)$$

и антисимметричных компонент:

$$\sigma_{xx}^a = KGN [U_x^a(0^+, z) - U_x^I(0^-, z)], \quad 0 \leq z < h \quad (4)$$

$$\sigma_{xz}^a = 0, \quad 0 \leq z < \infty \quad (5)$$

$$U_x^a(0, z) = 0, \quad h \leq z < \infty, \quad (6)$$

где *I* – индекс, соответствующий падающей волне. Данные граничные условия отражают наличие адгезионной связи между гранями трещины: неполная передача компонент смещений при наличии контактной нормальной *KGN* или тангенциальной *KGT* жесткостей [3] – (1, 4); отсутствие соответствующих симметричных или антисимметричных составляющих напряжений вдоль трещины – (2, 5); отсутствие соответствующих симметричных или антисимметричных компонент смещений вне пределов трещины по оси *z* – (3, 6). Для обоих случаев верно условие об отсутствии компонент напряжений на свободной поверхности полупространства:

$$\sigma_{xx}^{a,s} = 0, \quad z = 0, x \geq 0$$

$$\sigma_{xz}^{a,s} = 0, \quad z = 0, x \geq 0.$$

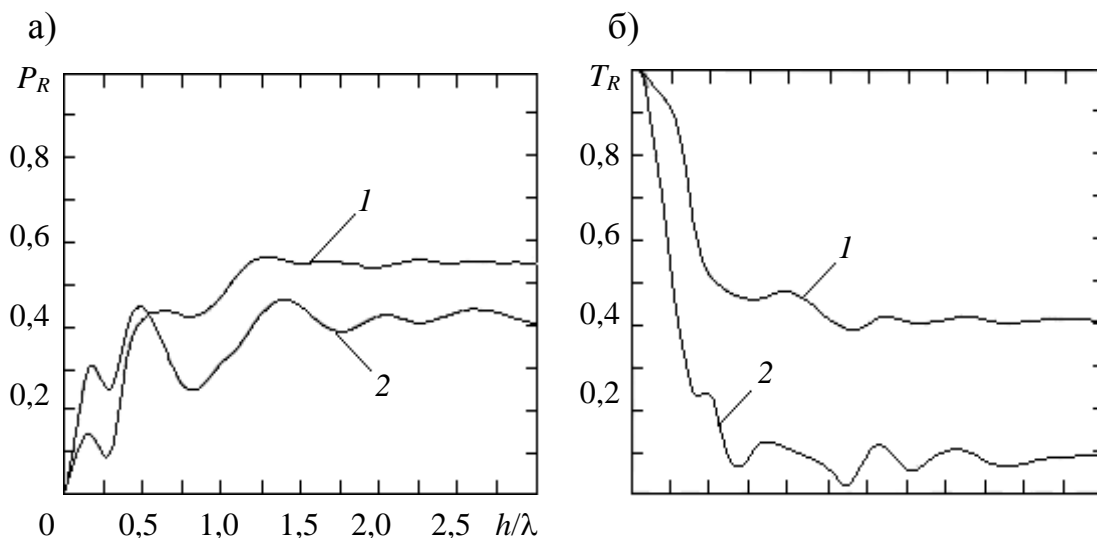


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения (*a*) и трансформации (*б*) поверхностной волны для алюминия

Коэффициенты отражения и трансформации поверхностной волны определялись с использованием принципа взаимности [1]. Их численные

оценки приведены на рис. 2, 3 для алюминия. Так на рис. 2 приведены зависимости коэффициентов отражения ( $a$ ) и прохождения ( $b$ ) волны Рэлея в зависимости от нормированной глубины трещины при  $KGN = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ Н/м}^3$  (кривые 1 на рис. 2,  $a$ ,  $b$ ), а также – для случая открытой трещины (кривые 2 на рис. 2  $a$ ,  $b$ ). Так из рис. 2 видно, что при значениях  $h/\lambda > 0,5$  коэффициент отражения частично закрытой трещины больше, чем – для открытой. Изучение переданных и преобразованных волн показывает, что это связано с энергией процесса. Фактически частично закрытая трещина с данными нормальными жесткостями передает энергию падающего потока лучше, чем открытая трещина для всех значений нормированных глубин. Подобное обстоятельство – частое явление на практике, при определении параметров амплитуды рассеянных волн на дефектах типа “слипание”, приводящее к неоднозначности результатов измерений.

Следует отметить, что сопоставление результатов численного решения для случая открытой трещины в рамках предложенной модели, показало соответствие с данными известных из литературы теоретических и экспериментальных исследований. Так, например, сравнение результатов с данными работы [5] показало наличие качественного и количественного сходства, что подтверждает корректность использования модели.

В заключение отметим, что представленные данные могут найти применение в ультразвуковой дефектоскопии при разработке методик и выборе параметров контроля изделий, содержащих поверхностные дефекты с контактными границами (например, стресс-коррозионные трещины, слипание и др.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М. : Наука, 1981.
2. **Аббакумов, К. Е.** Распространение волны Рэлея вдоль границы твердого тела с трещиной / К. Е. Аббакумов, В. А. Бритвин, Р. С. Коновалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – № 2. – С. 57–64.
3. **Аббакумов, К. Е.** О рассеянии поверхностных волн Рэлея трещиноподобным дефектом, нормальным к поверхности упругого полупространства / К. Е. Аббакумов, Р. С. Коновалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 1. – С. 74–80.
4. **Achenbach, J. D.** Elastodynamic analysis of an edge crack / J. D. Achenbach, L. V. Keer, D. A. Mendelsohn // Journ. of Appl. Mech. – 1980. – V. 42. – P. 551–556.
5. **Данилов, В. Н.** К вопросу о рассеянии поверхностных волн Рэлея на порочных дефектах / В. Н. Данилов, В. С. Ямщиков // Акустический журн. – 1985. – Т. 31. – № 3. – С. 323–327.