

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН РЭЛЕЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСАХ

В. И. ГОРДЕЛИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований рэлеевских волн, генерируемых ЭМА-преобразователями в твердых телах. При этом установлены их зависимости от расстояний отизлучателя до точки приема, особенности воздействия толщины образца на характер распространения и перотражения волн. На примере ступенчатых моделей и специальных пропилов показаны дифракционные особенности волн Рэля в зависимости от их частоты, а также глубины проникновения их в металлические тела.

The paper gives the results of experimental studies of Raleigh waves generated by EMA-transducers in solids. Their dependencies on distances from the emitter to the reception point, and features of the impact of sample thickness on the nature of wave propagation and double reflection are established. The example of stepped models and special saw cuts is used to demonstrate the diffraction features of Raleigh waves, depending on their frequency, and depth of their penetration into metal bodies.

В последнее время все больший интерес вызывает применение волн Рэля для неразрушающего ультразвукового (УЗ) контроля рельсов. Выяснилось, что с помощью этих волн можно обнаружить не только поверхностные дефекты, но и те, которые располагаются на глубине несколько миллиметров и более. Особенно большие преимущества этих волн в случае, когда указанные сигналы возбуждаются и принимаются бесконтактными ЭМА преобразователями. В этой связи актуальны исследования, в которых изучаются закономерности возбуждения и приема УЗ поверхностных волн с учетом непростой геометрии рельса.

Теоретическое изучение рэлеевских волн в упругом полупространстве было выполнено с участием автора настоящей работы и опубликовано в докладе [1]. В нем описаны особенности возбуждения волн Рэля ЭМА преобразователями, получены аналитические выражения, позволяющие установить основные закономерности их распространения и ослабления, зависимость от параметров ЭМА преобразователей, контролируемого материала и др. Однако экспериментально полученные решения не были подтверждены. В этой связи потребовалось компенсировать указанный пробел.

Зависимость ослабления волн Рэля от расстояния в рельсе и в других образцах. Измерения проводились в рельсе ЭМА преобразователями волн Рэля, один из которых (излучатель) излучал, а другой (приемник) принимал соответствующие сигналы (рис. 1).

Из данных измерений следует, что амплитуды волн Рэля с расстоянием в рельсе на различных частотах убывает немонотонно. Особенно это характерно для частоты 0,25 МГц: наблюдаются устойчивые минимумы на расстояниях 30 и 45 см, но заметны также и на частоте 0,5 МГц при 25 и 40 см. Природа указанных минимумов пока не выяснена, но очевидно, что она связана с формой исследуемого объекта.

Далее измерения продолжили на образцах другой пространственной формы. В частности, они проводились на тех же частотах с помощью прямоугольного образца длиной 80 см, шириной 20 см и толщиной 2 см. Причем, в одних опытах излучатель и приемник располагали на одной стороне образца, а в других — на противоположных. При этом одновременно изучали как прямые, так и отраженные от противоположной грани образца сигналы, которые различались по времени прихода звука к приемнику (рис. 2). На расстоянии 32,5 см прямая и переотраженная волны слились, а затем на расстоянии 40 см опять разошлись. Причем, начиная с расстояния от 20 до 32,5 см амплитуда переотраженной волны оказалась большей, чем прямой, и это привело к соответствующему уменьшению величины последней. По-видимому, именно этим и объясняются замеченные



Рис. 1. Ослабление амплитуд волн Рэля с расстоянием в рельсе на различных частотах, МГц: 1 — 0,5; 2 — 0,25

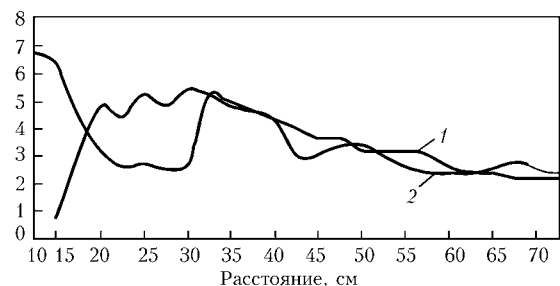


Рис. 2. Измерение прямой (1) и переотраженной (2) от противоположной грани образца сечением (20×2) см волны Рэля на частоте 0,25 МГц

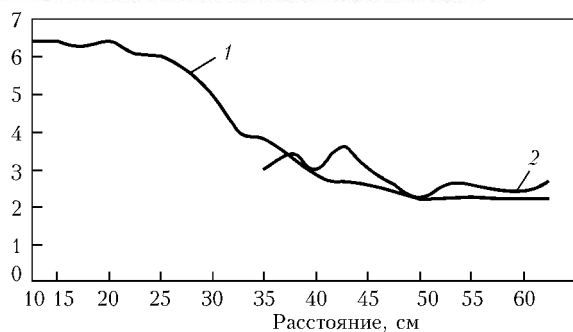


Рис. 3. Измерение прямой (1) и переотраженной (2) волн Рэлея при расположении излучателя и приемника по разные стороны образца на частоте 0,25 МГц

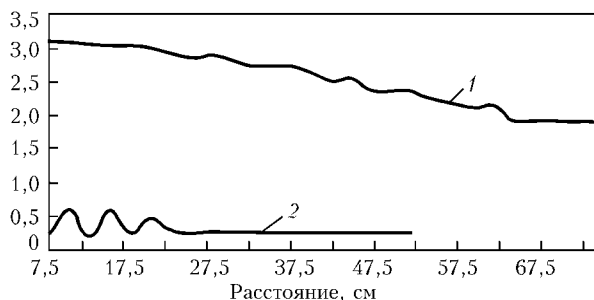


Рис. 4. Зависимость ослабления волны Рэлея от расстояния при расположении приемника и излучателя на одной стороне (1) и по разным сторонам (2) образца на частоте 0,5 МГц

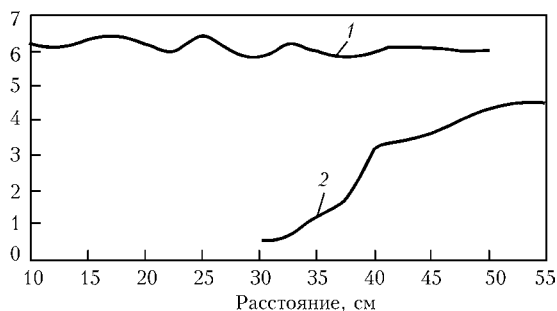


Рис. 5. Исследование рэлеевских волн, излучаемых ЭМА преобразователями на образце ОСО-4РЭ № 001 98 и частоте 0,25 МГц: 1 — излучатель и приемник располагаются на одной грани образца; 2 — по разные грани образца

выше минимумы в амплитуде прямой волны, измеряемой в рельсе.

Аналогичный эксперимент был также проведен в случае, когда излучатель и приемник располагали по разные стороны одного и того же образца (рис. 3).

Оказалось, что в данном образце волны Рэлея наблюдали даже тогда, когда приемник располагался непосредственно над излучателем и амплитуда ее была максимальной. В то же время переотраженная волна появилась только с расстояния 35 см и ее амплитуда была соизмеримой с таковой у прямой волны на данной дистанции. И эти обстоятельства свидетельствуют о сложной природе возбуждения рассматриваемой волны.

Далее рассмотрим поведение волны Рэлея, распространяемой в том же образце, на частоте 0,5 МГц (рис. 4). В данном опыте переотраженные волны не наблюдаются, а при размещении излучателя и приемника по разные стороны образца амплитуды принимаемых сигналов оказываются существенно разными. Причем, и в этом

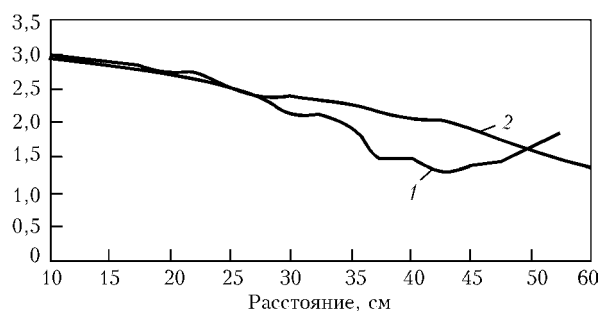


Рис. 6. Зависимость ослабления волны Рэлея от расстояния для различных образцов (и здесь наблюдается близкая зависимость)

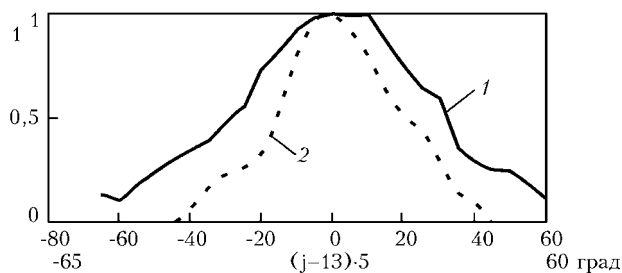


Рис. 7. Нормированная направленность излучения типовых ЭМА преобразователей рэлеевских волн, предназначенных для работы на частоте 0,25 МГц (1) и 0,5 МГц (2)

случае волна Рэлея возникает непосредственно над излучателем.

Вместе с тем образец толщиной 20 мм оказался слишком узким для исследования указанных волн. Поэтому измерения продолжили на образце ОСО-4РЭ № 00198, который представлял собой параллелепипед длиной 70 см и сечением 7×7 см, закругленный со стороны двух граней (рис. 5).

В отличие от предыдущего эксперимента в этом случае из-за сравнительно большой толщины образца одновременного прихода прямых и переотраженных волн к приемнику не наблюдали даже на такой низкой частоте. Поэтому зависимость прямой волны от расстояния носит монотонный характер. В то же время обращает на себя внимание, что волна Рэлея, появившаяся на противоположной грани (кривая 2), возникает не сразу, а лишь с расстояния 30 см от зенитной точки излучателя, т. е. ее природа другая, чем соответствующей волны, наблюдаемой ранее.

Для сравнения рассмотрим характер ослабления прямой волны Рэлея, измеренный на различных образцах на частоте 0,25 МГц (рис. 6).

Исследование диаграмм направленности волн Рэлея, излучаемых типовыми ЭМА преобразователями. Представляет интерес исследование диаграмм направленности типовых ЭМА преобразователей рэлеевских волн (рис. 7). Здесь в качестве излучателя также использовали излучающий, а приемника — приемный преобразователь, направленный на центральную часть излучающего. Датчики располагали на плоской металлической поверхности на расстоянии 25 см один от другого.

Как и следовало ожидать, направленность излучения оказывается более высокой при большей рабочей частоте и ее можно оценить с помощью выражения:

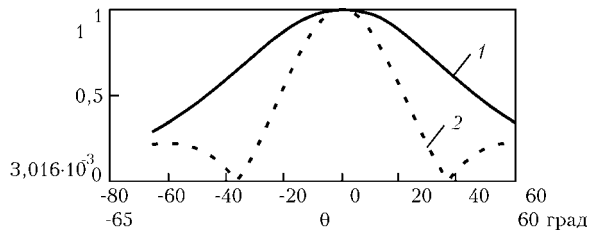


Рис. 8. Расчетная диаграмма направленности излучения волн Рэлея ЭМА преобразователями, работающими на частоте 0,25 МГц (1) и 0,5 МГц (2)

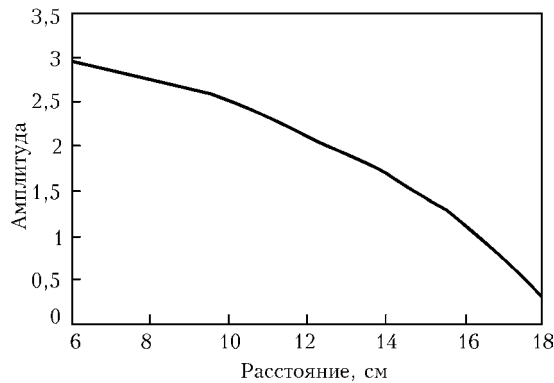


Рис. 9. Зависимость амплитуды локационного отражения волн Рэлея от цилиндрического сверления на частоте 0,5 МГц

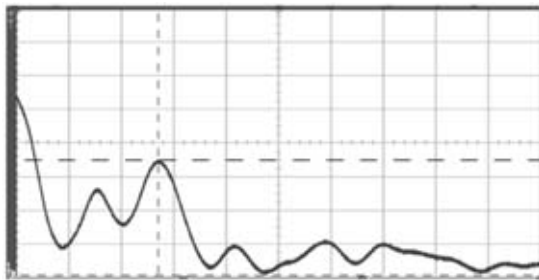


Рис. 10. Сигнал, отраженный от цилиндрического отверстия Ø 3 мм, расположенного на поверхности катания головки рельса

$$R = \frac{\sin(\omega L \sin \theta / 2c_R)}{\omega L \sin \theta / 2c_R},$$

где ω — круговая частота, $\omega = 2\pi f$; f — рабочая частота; L — длина рабочей части токопровода (у рассматриваемого преобразователя она равна примерно 10 мм); c_R — скорость волны Рэлея (в малоуглеродистой стали она соответствует 3 мм/с); θ — угол наблюдения.

На рис. 8 показаны соответствующие расчетные диаграммы направленности.

Нетрудно видеть, что в целом расчетная направленность излучения соответствует измеренной. Некоторые различия экспериментальных и расчетных кривых можно объяснить тем, что в последних принималась гипотеза о равномерном магнитном поле преобразователей, однако в действительности оно таковым не является.

Результаты измерений зависимости отражающей способности дефектов волнами Рэлея. Первые испытания проводили на рельсе, дефект представлял собой цилиндрическое сверление диаметром 3 мм и глубиной 5 мм в головке рельса.

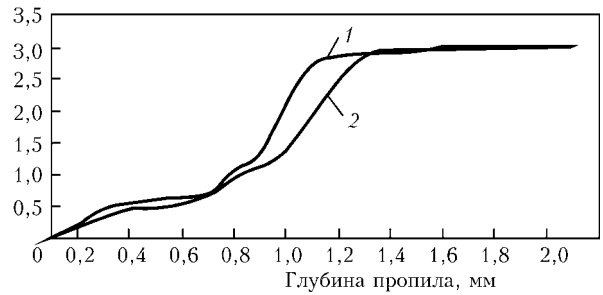


Рис. 11. Отражение рэлеевской волны от пропилов соответствующей глубины (1, 2 — номера экспериментов)

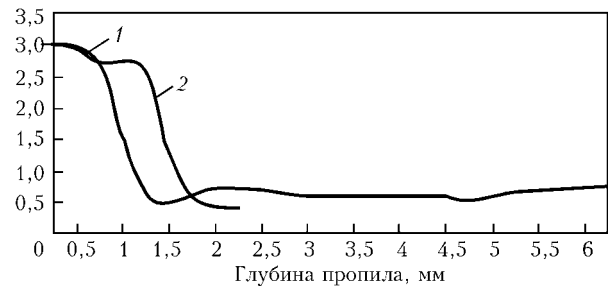


Рис. 12. Зависимость амплитуды волны, прошедшей через пропил, от его глубины (1, 2 — номера экспериментов)

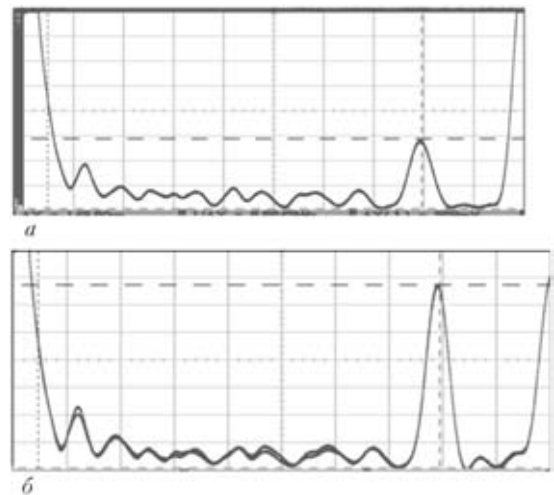


Рис. 13. Отражение рэлеевской волны от пропила глубиной 0,8 мм, расположенного на грани образца толщиной 20 мм и то же при глубине пропила 1,4 мм (б)

Измерения проводили с помощью типового ЭМА преобразователя, работающего в совмещенном режиме и нагруженного на частоту 0,5 МГц, при которой возбуждаются волны Рэлея. Результаты измерений приведены на рис. 9, 10.

Очевидно, что уменьшение амплитуды с расстоянием объясняется в основном характером рас-

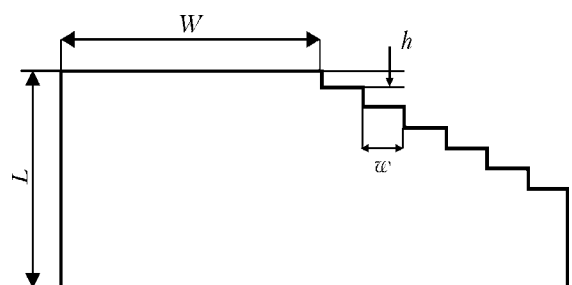


Рис. 14. Эскиз экспериментального образца

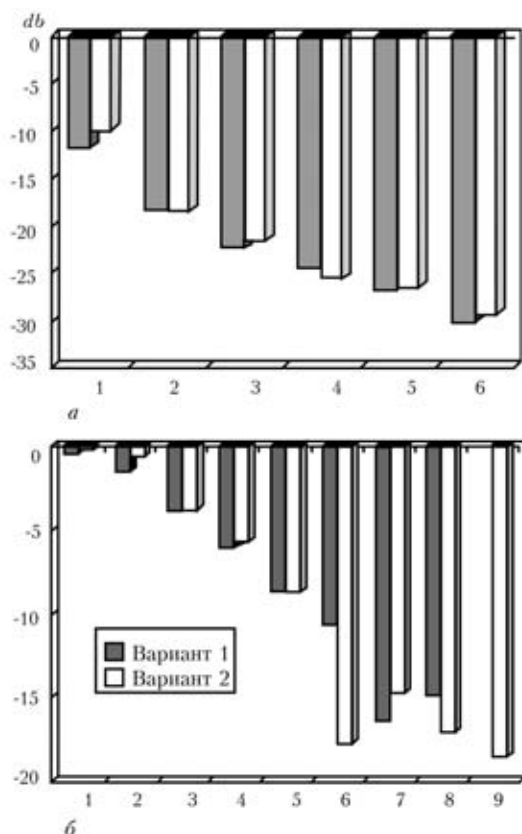


Рис. 15. Изменение сигналов, излучаемых одним преобразователем и принимаемых другим на образце № 1: на частотах 0,5 МГц (а) и 0,25 МГц (б)

сеяния от цилиндрического дефекта, чем ослаблением рэлеевской волны. Поэтому форма дефекта оказывает существенное воздействие на характер ослабления принимаемых от него сигналов, что является вполне естественным.

Далее приведены результаты измерения амплитуды отраженных и прошедших волн Рэля частотой 0,5 МГц через пропилы различной глубины, выполненные на образце шириной 20 мм и глубиной 200 мм (рис. 11).

Здесь приведены результаты двух независимых испытаний. Из эксперимента следует, что при глубине пропила, большей 1,2 мм, отражение практически перестает зависеть от его глубины.

На рис. 12 показана амплитуда сигналов, прошедших за пропилы, в зависимости от их глубин.

Различия экспериментальных данных объясняются, в первую очередь, сложностью измерения глубины пропила, особенно в области, где искомая зависимость оказывается наиболее динамичной. В целом из экспериментов видно, что увеличение пропила до глубины, большей 1,5 мм, не сказывается на амплитуде прошедшей волны. А ее проявление при значительной глубине пропила в большей степени зависит от явления огибания волны, чем от ее экранировки (рис. 13).

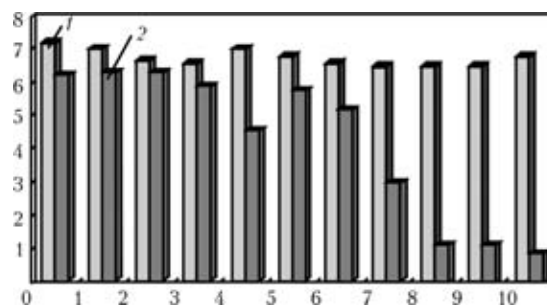


Рис. 16. Зависимость прохождения рэлеевской волны от номера ступеньки глубиной 1 мм в образце № 2: 1 – 0,25 МГц; 2 – 0,5 МГц

Из рисунков легко видеть сам характер наблюдаемых сигналов.

Исследование отражающих качеств рэлеевских волн прямоугольными дефектами. В качестве объекта исследования применяли специально изготовленные образцы, показанные на рис. 14.

Расстояние W в обоих образцах равнялось 300 мм, $w = 40$ мм, $h_1 = 3$ мм и $h_2 = 1$ мм, $L_1 = 160$ мм, $L_2 = 200$ мм, число площадок в обоих случаях было равным 10. Излучатель помещался на площадке W , а приемник последовательно на каждой из ступенчатых площадок на расстоянии 200 миллиметров между ними. Затем излучатель и приемник меняли местами. Результаты соответствующих измерений на различных частотах приведены ниже. Причем, в связи с очень большим ослаблением сигналов при работе на частоте 0,5 МГц применяется отсчет данных в децибелах относительно случая, когда приемник располагался на той же площадке, что и излучатель. Вариант 1 соответствует случаю, когда излучатель располагается на площадке W , а приемник последовательно на площадках с соответствующим номером. Вариант 2 – излучатель и приемник поменяли местами (рис. 15, 16).

Выводы

При перемене места расположения излучателей и приемников отражение рэлеевской волны существенно не изменяется, т. е. для указанной волны несущественно, отражается ли она площадкой, понижающейся или повышающейся нормально с глубиной. В обоих случаях это отражение оказывается примерно одним и тем же.

На частоте 0,25 МГц ослабление прошедшей волны при пересечении каждой из площадок убывает значительно меньше, чем на частоте 0,5 МГц. И это ослабление нельзя объяснить только понижением частоты в два раза. Очевидно, что оно носит резонансный характер.

1. Чабанов В. Е., Горделий В. И. Исследование волн Рэля, излучаемых электромагнитно-акустическими преобразователями // Неразрушающий контроль и диагностика материалов, конструкций и окружающей среды // Сб. докл. V Всероссийск. науч.-практ. сем. – С.-Петербург, Питер, 2004. – С. 111–123.