

ИММЕРСИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ КРИВОЛИНЕЙНОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

© 2022 г. Г.Я. Дымкин^{1,2,*}, А.В. Кириков^{3,**}, К.А. Бондарчук^{2,***}

¹АО «НИИ мостов», Россия 190013 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 22

²ФГБОУ ВО ПГУПС, Россия 190068 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9

³«Nordinkraft AG», 75196 Remchingen, Schauinslandstr, 16

E-mail: *gdymkin@gmail.com; **andrej.kirikov@nordinkraft.de; ***bondarchukksenya1801@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; после доработки 02.07.2022

Принята к публикации 08.07.2022

Предложен способ контроля изделий с плоской и криволинейной поверхностью с применением поверхностных ультразвуковых волн в иммерсионном варианте. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что при протяженности зоны контроля от 20λ до 50λ комплексное применение эхо-импульсного совместно с амплитудным и временным вариантами теневого метода обеспечивает возможность выявления на плоских и криволинейных поверхностях как трещин, так и дефектов с гладким профилем глубиной от долей длины волны. Результаты исследований использованы при разработке установки автоматического контроля рельсов в потоке производства, испытания которой подтвердили высокую чувствительность и помехозащищенность иммерсионного контроля поверхностными волнами.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, поверхностные волны, криволинейный профиль, иммерсионный вариант, дефекты с гладким профилем, трещины.

DOI: 10.31857/S0130308222080036, **EDN:** BQСJMU

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач, связанных с высокопроизводительным контролем поверхности длинномерных изделий, например рельсов, в условиях их промышленного производства, применяют вихретоковый метод и реализующие его средства неразрушающего контроля. Присущие им недостатки и ограничения — низкая чувствительность по отношению к некоторым типам дефектов, сравнительно невысокая помехозащищенность по отношению к электромагнитному фону металлургического предприятия и остаточной намагниченности объекта контроля, трудности применения на криволинейных участках профиля, необходимость размещать вихретоковые датчики почти вплотную к движущемуся объекту контроля, а также малая глубина проникновения вихревых токов в ферромагнитные металлы и сплавы, инициируют интенсивные поиски альтернативных методов и средств обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов длинномерных изделий.

Одной из таких альтернатив, потенциально снимающих большую часть ограничений, присущих вихретоковому контролю, является применение поверхностных ультразвуковых волн.

Поверхностные ультразвуковые волны рэлеевского типа находят широкое применение в задачах дефектоскопии [1]. С практической точки зрения преимущества волн Рэлея, распространяющихся вдоль свободной поверхности твердого тела, связаны, прежде всего, с их локализацией в поверхностном слое и, вследствие этого, высокой чувствительностью к поверхностным дефектам и более медленным, чем для объемных волн, спадом амплитуды с расстоянием. Поверхностные несовершенства, возникающие как при изготовлении, так и при эксплуатации металлоизделий (трещины, волосовины, плены, отпечатки и др.), имеют разнообразную форму и не только приводят к изменению амплитудных и временных параметров прошедшего сигнала, но и создают рассеянные рэлеевскую и объемные продольную и поперечную волны, что обуславливает возможность применения как эхо-импульсного, так и теневого методов ультразвукового контроля. Важно также, что волны рэлеевского типа могут распространяться вдоль криволинейных (выпуклой и вогнутой) поверхностей, что позволяет выявлять неоднородности на поверхностях сложной формы [2].

В то же время волны Рэлея характеризуются высокой чувствительностью к контакту поверхности с другой средой [3], в частности к наличию на поверхности слоя жидкости или локальных капель и загрязнений, следствием чего является рассеяние на зоне контакта (что вызывает появление помех), а также трансформация рэлеевской волны в зоне контакта в неоднородную волну, уносящую энергию в среду, контактирующую с поверхностью, что приводит к уменьшению длины прозвучиваемого участка поверхности.

Указанный недостаток обуславливает интерес к возможности выполнения контроля в иммерсионном варианте, т.е. при погружении объекта контроля в жидкую среду, что, безусловно, уменьшит длину контролируемого участка, но в то же время исключит условия для рассеяния поверхностных волн на локальных загрязнениях поверхности.

Поверхностные волны на плоской границе твердого полупространства с жидким слоем конечной и бесконечной толщины теоретически и экспериментально исследованы в работах И.А. Викторова [5, 6], где получены аналитические выражения и даны оценки дисперсии фазовой скорости волн и затухания. Закономерности и эффективность преобразования поверхностных волн в объемные продольные, излучаемые в контактирующую с твердым телом жидкость, изучены в [7], где авторы ограничились решением двумерной задачи. Конечность размеров излучателя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, обуславливает направленность поля возбужденной рэлеевской волны, изученную И.А. Викторовым [8] применительно к импульсному режиму.

Исследования закономерностей взаимодействия волн Рэлея с щелями прямоугольной формы и полуцилиндрическими канавками, а также распространения их по поверхности сложной геометрии (например, пилообразной или шероховатой) представлены, в частности, в экспериментальных работах [9, 10]. В [11] показано, что для прямоугольной канавки малой глубины коэффициенты отражения (R_d) и прохождения (D_d) в стали и дюралюминии отличаются незначительно; это позволяет сравнивать экспериментальные данные, полученные для границы воздух—сталь в лабораторных условиях, и данные, полученные в [9] для границы воздух—дюралюминий.

Наличие указанных фундаментальных теоретических и экспериментальных результатов создает необходимую базу для изучения эхо-импульсного и теневого методов иммерсионного контроля изделий с неплоской поверхностью поверхностными квазирэлеевскими волнами.

С целью исследования закономерностей распространения, отражения и прохождения поверхностных волн при расположении изделия в иммерсионной среде рассмотрим расположенное в жидкости твердое тело, поверхность которого имеет плоские и цилиндрический (выпуклый или вогнутый) участки. Поверхностная волна, возбужденная на плоском участке твердого тела методом клина с помощью пьезопреобразователя, расположенного в иммерсионной жидкости под рэлеевским углом, распространяется в направлении перпендикулярном образующей цилиндра, встречая на своем пути поверхностный дефект в виде узкой прямоугольной (модель трещины) или полуцилиндрической (модель неровности) канавки, расположенной на криволинейном или плоском участке поверхности, ориентированной перпендикулярно направлению распространения волны и перекрывающей всю ширину пучка поверхностных волн.

Рассмотрим далее акустические тракты для поставленной задачи. При выводе аналитических выражений для амплитуд теневого и эхосигнала положим, что: однородное, изотропное и идеально упругое твердое тело расположено в идеальной жидкости; радиус кривизны поверхности твердого тела много больше длины волны; путь от излучающего и приемного преобразователей до поверхности твердого тела, проходимый волной в жидкости, не превышает величину ближней зоны преобразователя; модели дефектов, расположенные в слое локализации поверхностных волн (порядка полутора длин волн), удалены от точек возбуждения и приема поверхностных волн на расстояние, значительно превышающее длину волны. Возможная протяженность акустического тракта при иммерсионном контроле поверхностными волнами (величина зоны контроля) определяется затуханием поверхностных волн за счет излучения в жидкость [5]. Теоретическая и экспериментальная оценка спада амплитуды поверхностной волны с расстоянием (рис. 1) показывает, что при иммерсионном варианте контроля наличие толстого слоя жидкости на поверхности изделия весьма значительно (с 0,01 до 0,5—0,6 дБ на длину волны) увеличивает ослабление амплитуды распространяющейся поверхностной волны. В то же время, физические свойства иммерсионной жидкости незначительно влияют на затухание поверхностной волны и на возможности ультразвукового контроля соответственно.

Таким образом, протяженность эффективной зоны иммерсионного контроля поверхностными волнами для применяемых методов контроля составляет от 20λ до 50λ и при практически реализуемых параметрах ультразвукового преобразователя (размерах активной зоны, частоте, расстоянии в иммерсионной жидкости до объекта контроля) находится преимущественно в ближней зоне поля. Для решения поставленных в настоящей работе инженерных задач ограничимся при анализе акустического тракта энергетическим приближением, дающим достаточную точность.

Экспериментальные исследования методов иммерсионного контроля поверхностными волнами, выполненные в настоящей работе для верификации и дополнения теоретических оценок, проведены с использованием специализированной дефектоскопической аппаратуры и серийных приборов, пьезоэлектрических преобразователей для контактного и иммерсионного контроля с рабо-

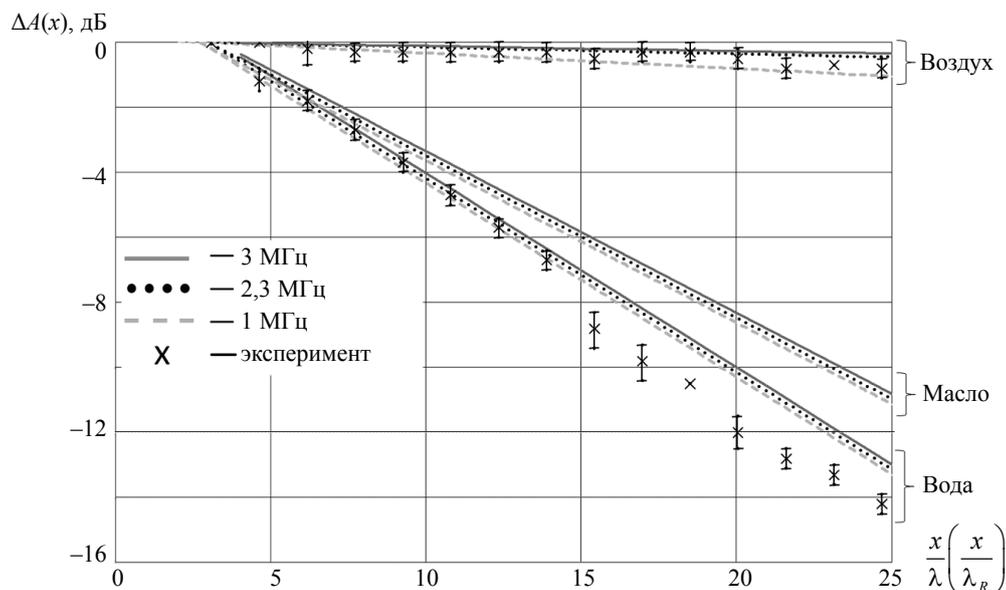


Рис. 1. Ослабление амплитуды поверхностной волны с расстоянием.

чими частотами 1—3 МГц, иммерсионной ванны с механизмами позиционирования. В стальных образцах для исследований фрезерованием выполнены канавки прямоугольной и цилиндрической формы и переменной глубины. Все измерения выполняли многократно с исключением резко отклоняющихся значений. По данным измерений рассчитывали средние значения и 95 % доверительные интервалы, показанные на рисунках с экспериментальными данными.

ТЕНЕВОЙ МЕТОД

Наличие повреждений поверхности обуславливает изменение как амплитудных, так и временных параметров импульсов поверхностных ультразвуковых волн, распространяющихся по участку изделия. Регистрация этих изменений, являющихся признаком наличия дефекта, лежит в основе амплитудного и временного теневого методов.

На рис. 2 представлены общая схема, модели дефектов и модель акустического тракта теневого метода, на которой отмечен криволинейный участок твердого тела.

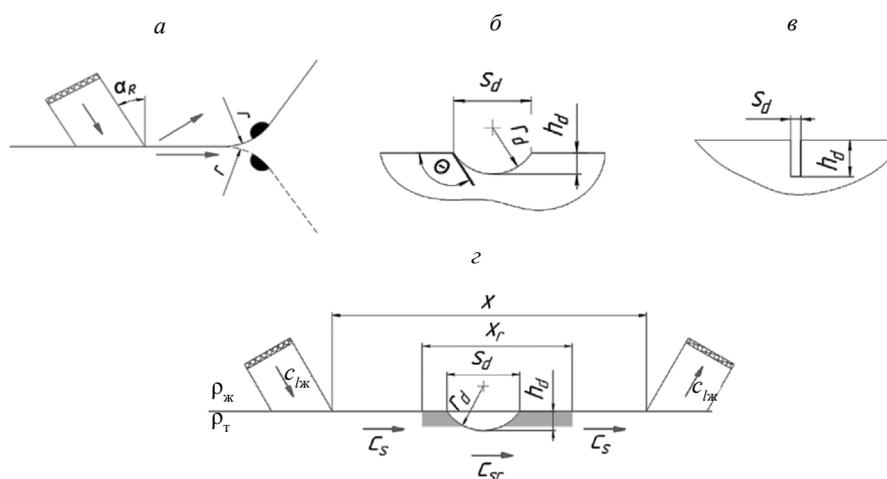


Рис. 2. Общая схема акустического тракта теневого метода контроля поверхностными волнами (а); модели дефектов: полцилиндрическая канавка (б), прямоугольная канавка (в); модель акустического тракта (г).

На рисунке приняты следующие обозначения: $\rho_{ж}$, $\rho_{т}$ — плотности жидкости и твердого тела соответственно; $c_{лж}$ — скорость продольной волны в жидкости; c_{s} , c_{sr} — скорости поверхностных волн в твердом теле, граничащем с жидкостью, на его плоской и криволинейной поверхностях соответственно; x — длина пути поверхностной волны в акустическом тракте (от излучателя до приемника); x_r — длина криволинейного (выпуклого или выгнутого) цилиндрического участка поверхности радиусом r .

Акустический тракт амплитудного теневого метода будем характеризовать отношением амплитуды сигнала, прошедшего тракт с дефектом (A_d^T), к амплитуде сигнала на бездефектном участке (A_0^T) — коэффициентом выявляемости дефекта:

$$K^T = \frac{A_d^T}{A_0^T}. \quad (1)$$

В энергетическом приближении запишем интенсивность I_d^T сигнала поверхностной волны, прошедшей акустический тракт, представленный на рис. 2з, в виде:

$$I_d^T = I_n \tilde{Q}(b, x) \tilde{D}_d(h_d, s_d) \tilde{K}_a(b) \tilde{\Psi}(x, r, x_r), \quad (2)$$

где I_n — интенсивность излученной волны в твердое тело; $\tilde{Q}(b, x)$ — коэффициент, характеризующий уменьшение интенсивности за счет расхождения пучка поверхностных волн при распространении. Для ближней зоны, в которой фронт волны можно считать плоским, $\tilde{Q}(b, x) = 1$, а для

дальней зоны (цилиндрический фронт) — $\tilde{Q}(b, x) = \frac{b^2}{\lambda x}$; $\tilde{D}_d(h_d, s_d)$ — коэффициент прохождения через дефект по интенсивности; $\tilde{K}_a(b)$ — коэффициент осевой концентрации поля поверхностных волн, излучаемых преобразователем шириной b , который для ближней зоны принимает значе-

ние $\tilde{K}_a = 1$, для дальней зоны — $\tilde{K}_a = \frac{0,5 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 b}{\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \right) + \frac{2\pi}{\lambda} b \cdot Si \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \right) - 1}$; $\tilde{\Psi}(x, r, x_r)$ — коэффициент,

характеризующий уменьшение интенсивности за счет затухания поверхностной волны при ее распространении вдоль границы с жидкостью (см. рис. 1) и переизлучения объемных волн на участке вогнутой криволинейной поверхности [4].

Потери энергии и соответственно значения коэффициентов прохождения при огибании поверхностной волной трещиноподобных и пологих дефектов обуславливаются: отражением поверхностной волны от встречающихся на ее пути перегибов (углов) поверхности, дополнительным затуханием за счет излучения объемных волн при распространении волны вдоль вогнутого участка поверхности, а также рассеянием в виде объемных волн, возникающих вследствие дифракции на острых углах и участках с радиусом меньше длины волны [12].

С учетом принятых допущений и выражений для потерь на границе с жидкостью и на вогнутой криволинейной поверхности из [4, 7] формулы для амплитуд теневого сигнала и коэффициентов выявляемости протяженных прямоугольной ($K_{дн}^T$) и полуцилиндрической ($K_{дц}^T$) канавок, ориентированных перпендикулярно пучку могут быть записаны в виде:

$$K_{дн}^T = D_{дн}, \quad (3)$$

где $D_{дн}$ — коэффициент прохождения по амплитуде для узкой прямоугольной канавки малой глубины, выражение для которого получено в [10]:

$$K_{дц}^T = \exp \left[-(\alpha_R + \alpha_S)(s_{dr_d} - s_d) + \alpha_{Sr} s_d - \alpha_{Sr_d} s_{dr_d} \right], \quad (4)$$

где α_R , α_S — коэффициенты затухания поверхностной волны при распространении вдоль границы раздела твердая среда—воздух и твердая среда—жидкость соответственно; α_{Sr} , α_{Sr_d} — коэффициенты дополнительного затухания поверхностной волны на вогнутых цилиндрических участках поверхности радиусами r и r_d соответственно, обеспечивающие, как следует из [4, 9], приемлемую точность как при больших, так и при малых волновых радиусах кривизны; s_{dr_d} — длина пути по поверхности канавки.

Необходимо отметить, что приведенные формулы не учитывают дифракционных эффектов, приводящих к преобразованию поверхностных волн в объемные, рассеиваемые дефектом.

Результаты выполненных в работе экспериментальных исследований ослабления амплитуды теневого сигнала от глубины прямоугольной и полуцилиндрической канавок, а также данные, рассчитанные по (3), (4) и представленные в [9], показаны на рис. 3.

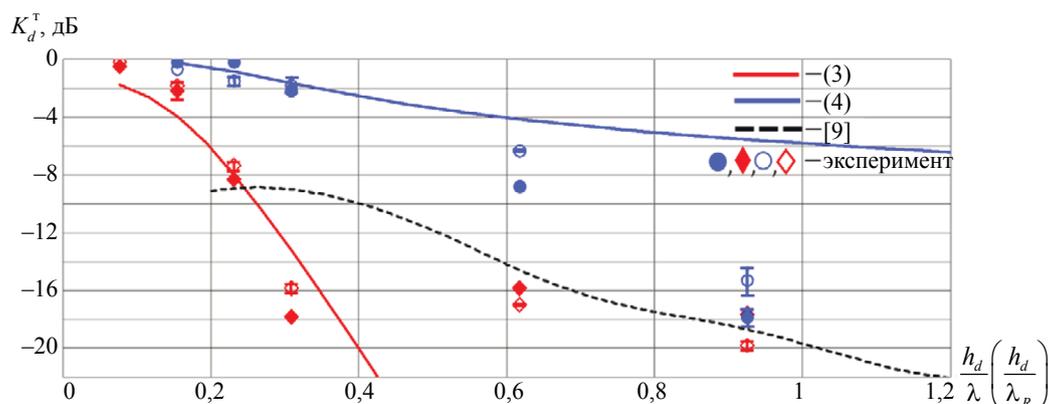


Рис. 3. Коэффициенты выявляемости узкой ($s_d \lambda \rightarrow 0$) прямоугольной (\blacklozenge, \circ) и полуцилиндрической ($s_d \lambda \approx 5$) (\bullet, \circ) канавок глубиной h_d при теновом методе контроля поверхностными волнами: \circ, \bullet — сталь—воздух; \blacklozenge, \bullet — сталь—вода.

Как видно, экспериментальные данные для коэффициентов выявляемости прямоугольной канавки на свободной поверхности стального образца и при иммерсионном контроле (см. рис. 3) удовлетворительно согласуются с расчетами по формуле (3) для малых глубин дефекта и с результатами, полученными в [9] для алюминиевых образцов. Отличие теоретических результатов от данных эксперимента при глубинах канавки больших половины длины волны обусловлено, по-видимому, использованием приближения, не учитывающего влияние волн, огибающих трещину (прямоугольную канавку), распространяясь вдоль ее граней. С увеличением отношения h_d/s_d коэффициенты выявляемости для прямоугольной (трещиноподобной) и гладкой канавки с полуцилиндрическим дном сближаются.

В процессе экспериментальных исследований теневого метода установлено также, что снижение эффективности возбуждения поверхностной волны в случае, когда дефект оказывается в зоне падающего пучка, оказывает более значительное влияние на амплитуду теневого сигнала, чем рассеяние распространяющейся поверхностной волны дефектом. Этот эффект, проявляющийся в снижении коэффициента преобразования продольной волны в жидкости в поверхностную волну, — «параметрический» эффект, определяюще зависит от формы поверхностного дефекта и отношения размеров дефекта и зоны возбуждения, не поддается аналитической оценке, однако может быть эффективно использован при практическом контроле.

Результаты проведенных исследований акустического тракта амплитудного теневого метода иммерсионного контроля поверхностными волнами показывают:

1) коэффициенты выявляемости трещиноподобных (прямоугольная канавка) и гладких (полуцилиндрическая канавка) поверхностных дефектов слабо зависят от акустических характеристик металла и среды, с которой контактирует контролируемая поверхность;

2) при расположении металлического изделия как в воздухе, так и в воде приемлемый для практических задач дефектоскопии коэффициент выявляемости обеспечивается для перпендикулярных направлению распространения волны дефектов глубиной более $(0,3—0,5)\lambda$.

Для оценки влияния геометрии и размера канавки на временной сдвиг Δt прошедшего импульса поверхностной волны, являющийся признаком дефекта при временном теновом методе, выполним расчеты времени распространения, полагая вслед за [4], что траектория распространения импульса повторяет форму дефекта.

В таком случае, в предположении, что поверхностная волна последовательно распространяется вдоль передней и задней граней прямоугольной канавки с пренебрежимо малым раскрытием ($s_d \rightarrow 0$), разница между временами распространения сигнала на дефектном и бездефектном участках может быть определена по простой формуле:

$$\Delta t_{\text{н}} = \frac{2h_d}{c_s} - \frac{s_d}{c_s} \approx \frac{2h_d}{c_s}. \quad (5)$$

Для полуцилиндрической канавки необходимо учитывать также, что скорость поверхностной волны на криволинейной поверхности канавки зависит от радиуса кривизны, а скоростная поправка, согласно [4, 9], справедлива как для малых, так и больших радиусов. При этом в важном для практики диапазоне радиусов канавки изменение скорости поверхностной волны пренебрежимо мало (менее 0,04).

Рассчитав длину s_{dr_d} пути импульса по поверхности полуцилиндрической канавки шириной s_d и глубиной h_d и используя результаты [4], получим аналитические выражения для времени распространения поверхностных волн по участку, включающему канавку, позволяющие проанализировать закономерности влияния размеров канавки на временной сдвиг (Δt_{r_d}) прошедшего сигнала, регистрируемого при теневом методе:

$$\Delta t_{r_d} = \frac{\pi \left(\frac{s_d^2 + 4h_d^2}{8h_d} \right) \cdot \arcsin \left(\frac{4h_d s_d}{s_d^2 + 4h_d^2} \right)}{90} \cdot \frac{1}{c_R} \times \left[1 - \frac{\left[1 + \frac{s}{q} + \frac{k_s e_q}{2s e_s} \left(1 - \frac{s^2}{q^2} \right) \right] + \left[1 + \frac{s}{q} - \frac{k_R e_s}{2s e_q} \left(1 - \frac{s^2}{q^2} \right) \right] - \frac{2s^2}{k_i^2} \left(\frac{k_i^2}{k_l^2} - 1 \right)}{k_R r_d \left[\left(1 - \frac{s}{q} \right) \left(\frac{e_q}{e_s} - \frac{e_s}{e_q} \right) + \frac{4k_R s}{k_i^2} \left(\frac{k_i^2}{k_l^2} - 1 \right) \right]} \right]^{-1} \cdot \frac{s_d}{c_R}, \quad (6)$$

где $s = \sqrt{k_R^2 - k_i^2}$; $q = \sqrt{k_R^2 - k_l^2}$; $e_q = \exp[2\text{arcth}(q/k_R)]$; $e_s = \exp[2\text{arcth}(s/k_R)]$; k_p , k_p , k_s — волновые числа поперечной, продольной, поверхностной волн соответственно.

Результат расчета по выражению (6) представлен на рис. 4.

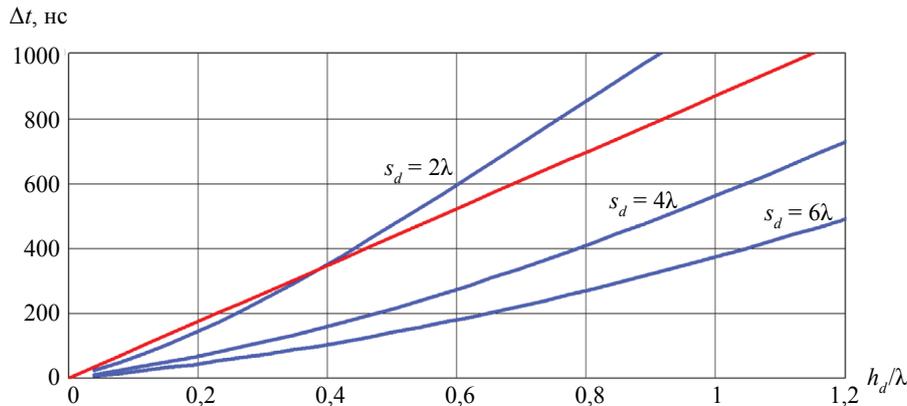


Рис. 4. Зависимость временного сдвига прошедшего сигнала поверхностной волны от волновой глубины h_d/λ прямоугольной (—) и полуцилиндрической (—) канавок.

Выполненный анализ временного варианта теневого метода позволяет заключить, что: зависимость временного сдвига (задержки) импульса поверхностной волны при прохождении им как прямоугольной, так и полуцилиндрической канавок практически линейно зависит от волновой глубины канавки h_d/λ ; с ростом ширины полуцилиндрической канавки временной сдвиг значительно снижается.

На рис. 5 представлены полученные при контроле динамические огибающие амплитуды и временного сдвига сигнала, прошедшего по поверхности изделия, на которой имеются два дефекта.

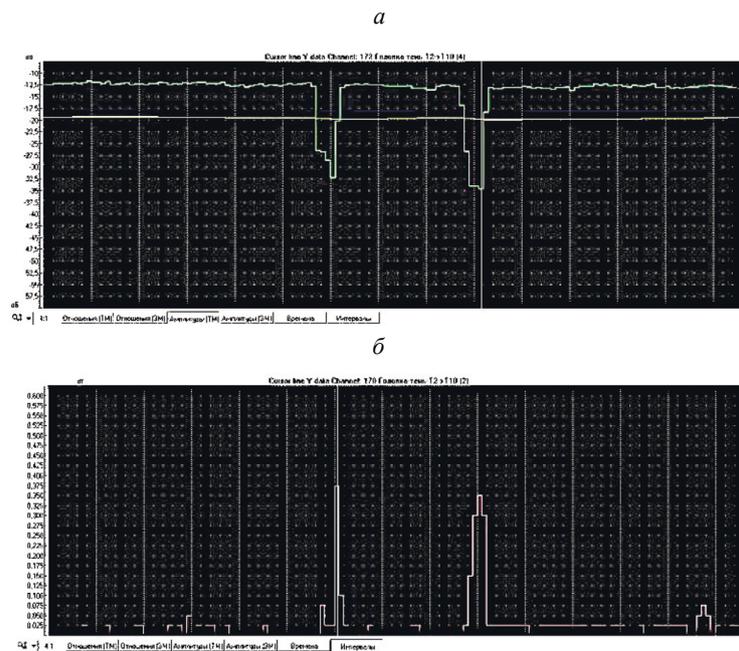


Рис. 5. Динамические огибающие амплитуды (а) и временного сдвига (б) теневого сигнала при перемещении по поверхности изделия, на которой имеются два дефекта.

Как видно, падение амплитуды прошедшего (теневого) сигнала сопровождается увеличением времени его распространения, что подтверждает эффективность совместного использования амплитудного и временного вариантов теневого метода контроля поверхностными волнами. Регистрация двух параметров будет способствовать повышению помехозащищенности контроля и предоставляет потенциальные возможности оценки глубины (размера) выявленного дефекта.

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

Для эхометода контроля совмещенным преобразователем и бесконечно протяженной канавки может быть принята модель акустического тракта, отличие которой от рассмотренной выше модели для теневого метода заключается в необходимости учета не коэффициента прохождения, а коэффициента отражения от дефекта, а геометрическая разница сводится к тому, что для эхометода расстояния, пройденные волной на всех участках пути от излучателя до дефекта и обратно, равны (рис. 6).

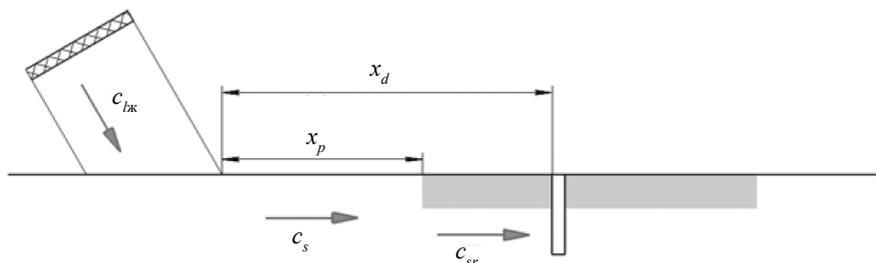


Рис. 6. Модель акустического тракта эхометода ультразвукового контроля поверхностными волнами.

По аналогии с приведенным ранее выражением для теневого метода (2) запишем интенсивность эхосигнала от дефекта в виде:

$$I_d^3 = I_n \tilde{Q}(b, x_d) \tilde{R}_d(h_d, s_d) \tilde{K}_a(b) \tilde{\Psi}(x_d, x_p, r). \quad (7)$$

При расположении дефекта на акустической оси преобразователя $\tilde{K}_a = 1$. В таком случае для дальнейшей зоны амплитуду эхосигнала можно записать в виде:

$$A_d^3 = A_n \left(\frac{1}{x_d} \right) R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (8)$$

На расстояниях, не превышающих величину ближней зоны преобразователя, для которой $\tilde{Q}(b, x_d) = 1$, амплитуда эхосигнала принимает вид:

$$A_d^3 = A_n R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (9)$$

При практическом контроле настройка чувствительности выполняется по эхо-сигналу от эталонного отражателя, в качестве которого для поверхностных волн принято использовать прямой двугранный угол в образце из контролируемого материала [13]. Положим, что расстояние от точки возбуждения—приема поверхностных волн до эталонного отражателя выбрано минимальным, достаточным для раздельного наблюдения и измерения зондирующего и отраженного импульсов. В таком случае влияние затухания поверхностных волн практически отсутствует даже в случае контакта поверхности с жидкостью — $\Psi = 1$. Для оценки возможного влияния контакта с жидкостью на коэффициент отражения поверхностной волны от прямого двугранного угла (R_{inf}) проведен эксперимент, который не показал значимого изменения амплитуды эхосигнала от прямого двугранного угла при погружении образца в воду. В связи с этим (R_{inf}) принят равным значению, полученному для рэлеевской волны [11], и амплитуда A_0 опорного эхосигнала от эталонного отражателя равна:

$$A_0 = 0,67A_n. \quad (10)$$

В результате с учетом [7] для коэффициента выявляемости дефекта, расположенного в ближней зоне поля преобразователя, получим:

$$K_d^3 = \frac{3}{2} R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (11)$$

Полученное общее выражение может быть использовано для детального анализа акустического тракта эхо-импульсного иммерсионного контроля поверхностными волнами.

Для модели дефекта в виде прямоугольной канавки его следует дополнить формулами для R_d из [11].

Данные расчетов и экспериментальные значения коэффициента выявляемости прямоугольной и полуцилиндрической канавок на плоской поверхности в воздухе и в воде представлены на рис. 7.

Наблюдается удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов выполненных в работе экспериментов с теоретическими и опытными данными других авторов

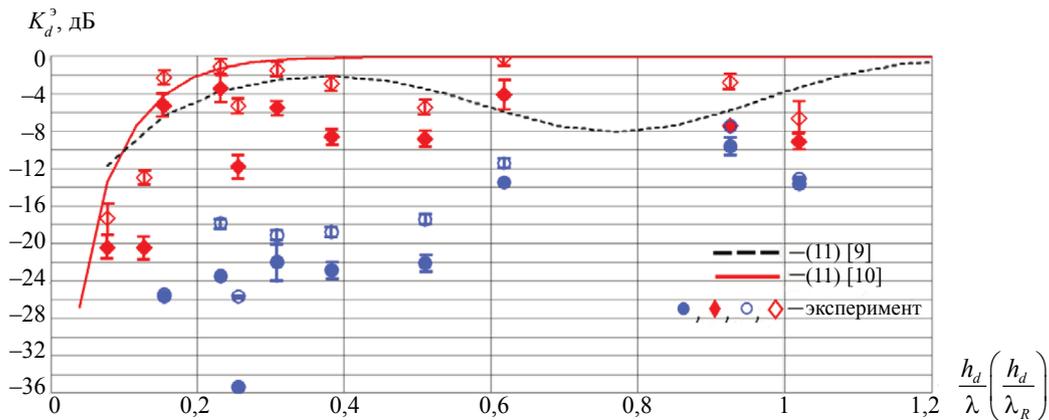


Рис. 7. Коэффициенты выявляемости узкой ($s_d/\lambda \rightarrow 0$) прямоугольной (\blacklozenge, \circ) и полуцилиндрической ($s_d/\lambda \approx 5$) канавок глубиной h_d при эхометодоме контроля поверхностными волнами: \circ, \diamond — сталь—воздух; \bullet, \blacklozenge — сталь—вода.

[9, 11]. При этом отсутствие осцилляций на расчетной кривой для прямоугольной канавки объясняется, как и для теневого метода, использованным в [11] энергетическим приближением.

Из рис. 7 видно, что коэффициенты выявляемости для вариантов контроля на воздухе и в иммерсионной среде отличаются незначительно; выявляемость полуцилиндрической канавки эхо-методом близка к выявляемости прямоугольной канавки при глубинах от длины волны и более; приемлемые для практики значения коэффициентов выявляемости обеспечиваются для трещиноподобных дефектов глубиной более $0,2\lambda$ и дефектов с гладким профилем глубиной более $0,6\lambda$.

Влияние ширины гладкого дефекта на его выявляемость иллюстрируется данными, представленными на рис. 8. Как видно, и при эхо-импульсном, и амплитудном теневом методах критически снижается выявляемость полуцилиндрических канавок, ширина которых превышает глубину на порядок и более.

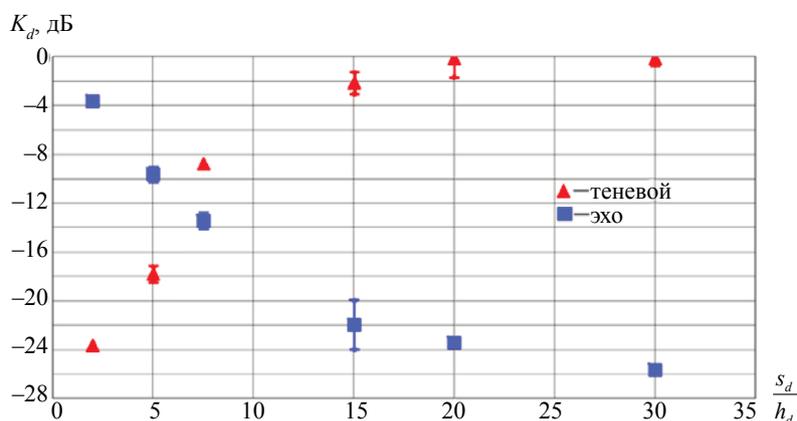


Рис. 8. Зависимость коэффициентов выявляемости при эхо- и теневом методах от относительной ширины полуцилиндрической канавки.

На основе выполненных исследований иммерсионного ультразвукового контроля поверхностными волнами:

обоснована возможность применения эхоимпульсного, а также амплитудного и временного вариантов теневого методов для иммерсионного контроля поверхностными волнами плоских и криволинейных (выпуклых и вогнутых) поверхностей изделий сложной формы поперечного сечения;

разработана методика комплексного применения методов и обоснованы требования к оборудованию иммерсионного ультразвукового контроля поверхностными волнами для выявления дефектов с гладким профилем и трещиноподобных поверхностных дефектов глубиной в доли длины волны;

создана установка NORDINSCAN-RAIL-S (рис. 9) компания «Нординкрафт» для автоматического иммерсионного ультразвукового контроля качества поверхности рельса, включающая много-



Рис. 9. Общий вид установки ультразвукового контроля качества поверхности рельса NORDINSCAN-RAIL-S (компания «Нординкрафт») в линии приемочного контроля рельсов металлургического предприятия.

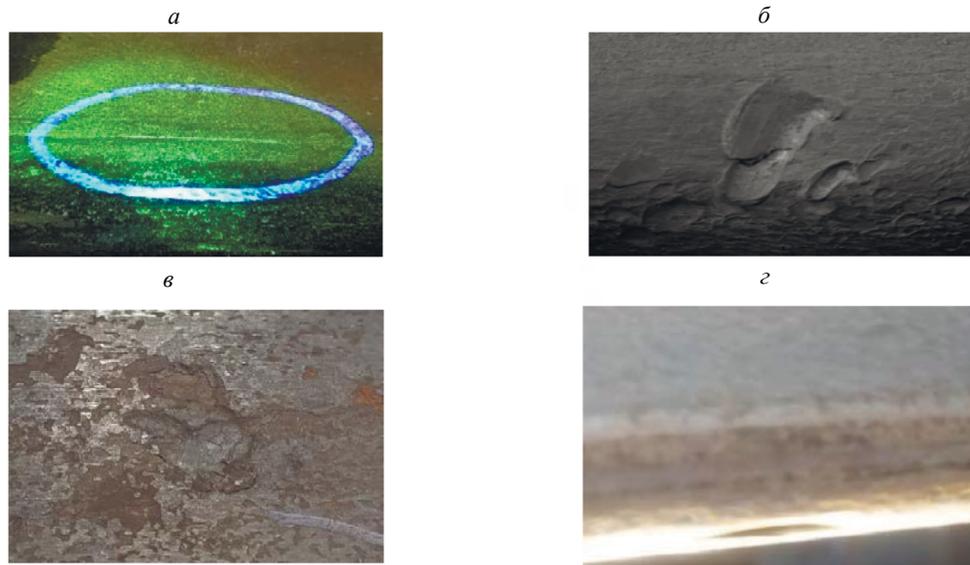


Рис. 10. Примеры недопустимых поверхностных металлургических дефектов рельсов, выявленных при иммерсионном контроле поверхностными волнами: риска протяженностью 30 мм вдоль направления прокатки на поверхности катания (*а*); отпечаток $\sim 12 \times 10$ мм глубиной 1,0 мм на поверхности катания головки (*б*); плена $\sim 12 \times 17$ мм глубиной 0,8 мм на подошве (*в*); трещина на кромке пера подошвы (*з*).

канальный дефектоскопический аппаратно-программный комплекс с блоками пьезоэлектрических фазированных антенных решеток [14] и позволяющая выполнять в потоке производства приемочный контроль железнодорожных рельсов и рельсового проката всех типов с целью выявления дефектов по всему периметру поверхности (в том числе в зонах, недоступных для вихретокового контроля).

На рис. 10 приведены примеры реальных дефектов (трещин, отпечатков, плен, раковин, рисок), выявленных с использованием описанной в статье методики и оборудования.

ВЫВОДЫ

Результаты представленных в статье исследований и их реализация при создании оборудования и технологии ультразвукового контроля рельсов с целью выявления поверхностных дефектов: сформировали методическую основу комплексного применения эхо-импульсного метода совместно с амплитудным и временным вариантами теневого метода иммерсионного контроля поверхностными волнами;

показали высокую чувствительность, повышенную помехозащищенность и дополнительные возможности контроля криволинейных поверхностей изделий сложной формы с использованием иммерсионной технологии применения поверхностных ультразвуковых волн;

расширили возможности применения ультразвуковых поверхностных волн для задач дефектоскопии при подводном положении объекта контроля и в иммерсионных технологиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупан А.В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами. М.: Спектр, 2014. 120 с.
2. Жостков Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности // Акустический журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 708—720.
3. Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И., Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница акустического контакта // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 1. С. 18—39.
4. Викторов И.А. Волны типа рэлеевских на цилиндрических поверхностях // Акустический журн. 1958. № 2. С. 131—136.
5. Викторов И.А., Грищенко Е.К., Каёкина Т.М. Исследование распространения ультразвуковых поверхностных волн на границе твердого тела с жидкостью // Акустический журн. 1963. № 2. С. 162—170.

6. *Викторов И.А.* К расчету фазовых скоростей поверхностных волн на границе твердого полупространства с жидким слоем // *Акустический журн.* 1977. № 6. С. 947—948.
7. *Никифоров Л.А., Харитонов А.В.* Возбуждение поверхностной волны ультразвуковым пучком на границе раздела жидкость—твердая среда // *Дефектоскопия.* 1973. № 3. С. 45—53.
8. *Викторов И.А., Зубова О.М.* О диаграммах направленности излучателей волн Лэмба и Рэлея // *Акустический журн.* 1963. № 2. С. 171—175.
9. *Викторов И.А.* О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // *ДАН СССР.* 1958. Т. 119. № 3. С. 463—465.
10. *Жарылкапов С.Ж., Крылов В.В.* Рассеяние волн Рэлея на выемке произвольной глубины // *Акустический журн.* 1987. № 5. С. 878—883.
11. *Данилов В.Н., Ямщиков В.С.* К вопросу о рассеянии поверхностных волн Рэлея на пограничных дефектах // *Акустический журн.* 1985. № 3. С. 323—327.
12. *Ахромеева И.Д., Крылов В.В.* Преобразование волн Рэлея в объемные на локальных дефектах поверхности // *Акустический журн.* 1977. № 4. С. 510—516.
13. *Дамаскин А.Л., Дымкин Г.Я., Костюк О.М.* Исследование акустического тракта при эхоимпульсном контроле поверхностными волнами // *Дефектоскопия.* 1991. № 2. С. 26—30.
14. *Кириков А.В., Дымкин Г.Я.* Устройство для иммерсионного ультразвукового контроля / Патент на изобретение № 2723913 от 21.02.2020 г.