

# 50 ЛЕТ – ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МЕТАЛЛОВ (Часть 1)



**РАЗЫГРАЕВ Николай Павлович**  
Канд. техн. наук  
АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва

## Введение

В начале 70-х гг. прошлого века в ЦНИИТМАШ под руководством канд. техн. наук А.С. Матвеева и проф., д-ра техн. наук И.Н. Ермолова сформировалась научная школа ультразвуковой дефектоскопии. Благодаря трудам И.Н. Ермолова и в первую очередь теории акустического тракта ультразвуковая дефектоскопия преобразилась в одно из важных научных направлений в технологии машиностроения.

В 1972 г. Н.П. Разыграев, молодой специалист, младший научный сотрудник ЦНИИТМАШ под научным руководством заведующего лабораторией ультразвуковых методов исследования металлов д-ра техн. наук, проф. И.Н. Ермолова проводил исследования акустических характеристик сталей для оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000. В процессе экспериментальных исследований Н.П. Разыграев впервые в ультразвуковой дефектоскопии металлов увидел, наблюдал и зафиксировал на экране ультразвукового дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», имеющем динамический диапазон экрана 36 дБ (это оказалось весьма важным в экспериментальных исследованиях), неизвестные ранее сигналы очень быстрой волны – они раньше всех других импульсов приходили на приемник и были примерно на два порядка слабее объемных продольной и поперечной волн. Н.П. Разыграев совместно с И.Н. Ермоловым достоверно интерпретировали эту волну как аналог головных волн (ГВ) в сейсмоакустике, доказали возможность использования их для выявления при- и подповерх-

ностных дефектов в металле, получили совместно с В.Г. Щербинским авторское свидетельство № 491092 на новый способ УЗК [1] (с приоритетом от 1 июня 1973 г.) и доложили об этом в 1974 г. в Киеве на Всесоюзной конференции по неразрушающему контролю [2].

Оглядываясь на многие годы назад, можно отметить, что важнейшими предпосылками для нового вклада ЦНИИТМАШ в ультразвуковую дефектоскопию металлов несомненно являются:

- организация лауреатом Государственной премии канд. техн. наук А.С. Матвеевым лаборатории ультразвуковых методов исследования металлов (ЛУЗМИМ);
- изобретение и разработка в лаборатории наклонных искателей с углом падения больше 1-го критического угла, обеспечивающих возбуждение в контролируемом металле только поперечных волн;
- общий пассионарный подъем в развитии УЗД в 1950–1960 гг. и образование нескольких творческих коллективов в Ленинграде под руководством С.Я. Соколова в ЛЭТИ, А.К. Гурвича в ЛИИЖТ, в Москве в ЦНИИТМАШ, в авиации под руководством Д.С. Шрайбера, в НИИХИММАШ под руководством Н.В. Химченко, немного позже в Кишиневе был создан ВНИИНК;
- приглашение и назначение заведующим ЛУЗМИМ И.Н. Ермолова и разработка им теории акустического тракта;
- создание научной школы УЗД в ЦНИИТМАШ и мощного творческого коллектива, нацеленного на решение самых актуальных задач технологии машиностроения;
- организация под руководством А.К. Гурвича научно-технического сообщества УЗДешников на базе конференций по УЗД в Ленинграде.

Дополнительными факторами, способствовавшими обнаружению головных волн, можно считать наличие в ЦНИИТМАШ новейшего дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», а также хорошего базового образования по акустике у Н.П. Разыграева, полученного в Московском горном институте, где в середине 1960-х гг. преподавали специалисты Акустического института АН СССР проф., д-р физ.-мат. наук А.В. Римский-Корсаков, канд.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ И ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ

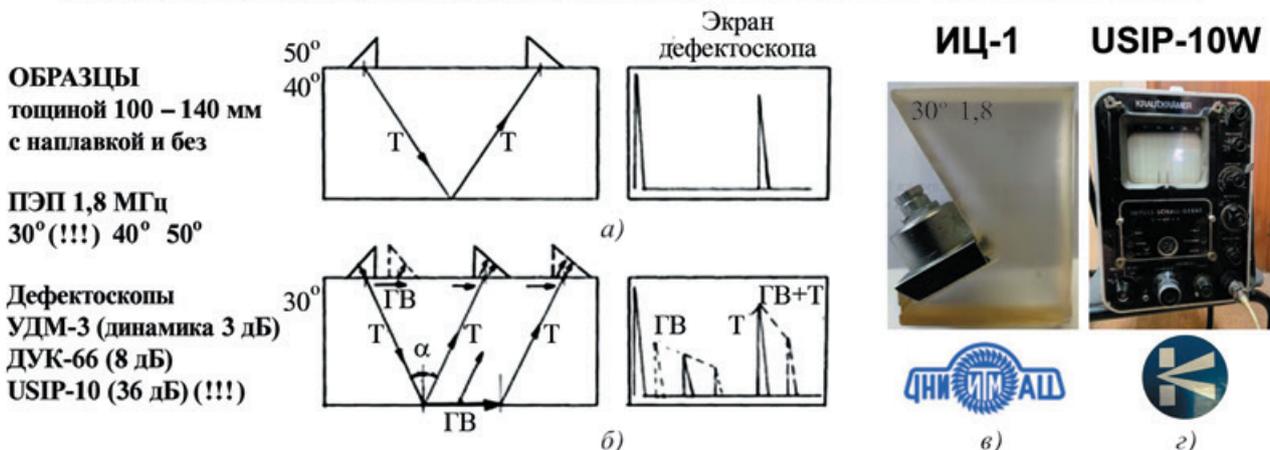


Рис. 1. Схемы прозвучивания металла и изображения импульсов на экране дефектоскопа (а, б), а также наклонного искателя ИЦ-1 ЦНИИТМАШ с углом призмы 30° (в) и дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер» (з)

техн. наук Б.Д. Тартаковский, канд. техн. наук А.Д. Лапин и др., а также д-р техн. наук И.Н. Ермолов из ЦНИИТМАШ и др.

### 1. Обнаружение головной волны в металле

В 1972 г. в ЦНИИТМАШ в связи с началом проектирования и подготовки к производству атомных электростанций нового поколения ВВЭР-1000 были поставлены новые специальные исследовательские работы по разработке новых технологий обработки, изготовления и контроля качества оборудования, трубопроводов, металлоконструкций АЭС. В том числе такие исследования были поставлены для обеспечения новыми технологиями, средствами контроля и методической документацией в части ультразвукового контроля металла.

В ЛУЗМИИ исследования акустических характеристик сталей для оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000 проводили на специальных образцах размером 300×400 мм, толщиной 100 мм и более из стали 15Х2МФА и биметалла из той же стали толщиной 113 мм с аустенитной наплавкой или плакировкой толщиной 13 мм. На рис. 1, а, б представлены схемы прозвучивания образцов зеркально-теневым методом наклонными искателями ЦНИИТМАШ, а также изображения импульсов на экране дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», прошедших через исследуемый образец на участках толщиной 100 и 113 мм, а также фотография искателя ЦНИИТМАШ ИЦ-1 с углом призмы 30° (рис. 1, в) и дефектоскоп USIP-10 (рис. 1, з).

На рис. 1, а слева показан ход поперечных волн Т в стали от излучателя к приемнику искателей с углом призм 40 и 50°, а справа – изображение зеркально-теневого сигнала на экране дефектоскопа. На рис. 1, б слева показан ход наклонных попереч-

ных волн в стали от искателей с углом призм 30° и ГВ возбуждаемой тем же искателем и распространяющейся вдоль контактной поверхности, а справа – изображения на экране дефектоскопа импульсов зеркально-теневого сигнала поперечных волн и ГВ при различных расстояниях между искателями. Импульсы ГВ всегда располагаются ближе к зондирующему импульсу, так как затрачивают существенно меньше времени на прохождение пути от излучателя до приемника. Эти быстрые импульсы ранее в УЗД металлов никто не наблюдал, а в нашем случае они были обнаружены и зафиксированы благодаря большому (порядка 36–40 дБ) динамическому диапазону экрана дефектоскопа, отсутствию на экране дополнительных паразитных импульсов при УЗК зеркально-теневым способом, возможности одномоментного наблюдения на экране зеркально-теневого сигнала мощной объемной поперечной волны и существенно меньшего сигнала головной волны. Разница амплитуд импульсов поперечной и ГВ в данном эксперименте составляла 26–36 дБ и более. Отечественные дефектоскопы УДМ-3 и ДУК-66 имели меньшие значения мощности зондирующего импульса, усилителя и динамического диапазона экрана (соответственно 3–4 и 10–12 дБ).

Быстрые импульсы наблюдались только при прозвучивании образцов искателями с углом призм 30°. Амплитуда быстрого импульса увеличивалась при сближении искателей, максимальная амплитуда и минимальное время прохождения импульса достигались при минимально возможном расстоянии между искателями.

Было много предположений о природе и характере быстрой волны. Первичные дополнительные исследования показали, что волна не прощупывается на контактной поверхности, имеет скорость

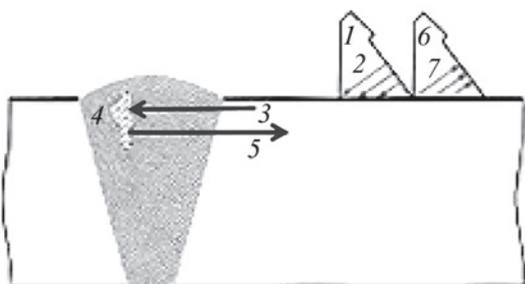


Рис. 2. Эхо-метод УЗК головными волнами:  
1 – излучатель; 2 – продольная волна, падающая под первым критическим углом; 3 – продольная подповерхностная волна; 4 – дефект, отражающий волну; 5 – отраженная подповерхностная волна; 6 – приемник; 7 – боковая продольная волна в призме приемника

распространения практически равную скорости продольной волны, быстро ослабевает с расстоянием, при использовании искателей с углом призмы  $30^\circ$  на расстояниях 100 мм и более импульсы не видны даже при использовании дефектоскопа USIP-10.

Было также отмечено, что волна в полной мере подчиняется акустической теореме взаимности, что фиксировалось при прозвучивании металла двумя расположенными навстречу друг другу искателями как вдоль ровной контактной поверхности, так и в случае прохождения звука через ступеньку (под ступенькой) высотой 13 мм. При этом время распространения и амплитуда импульсов не изменялись при взаимной перестановке разъемов излучателя и приемника на дефектоскопе.

По мере совершенствования искателей оказалось возможным впервые выполнить прозвучивание эхо-методом. При этом излучатель и приемник были расположены друг за другом по отношению к вертикальной стенке. На экране дефектоскопа мы увидели эхо-сигнал ГВ от вертикальной стенки – донный сигнал, и он прощупывался под контактной поверхностью. Мы впервые не только увидели ГВ, распространяющуюся вдоль контактной поверхности, но и осязали ее внутри металла. Это вызвало новый всплеск интереса к быстрой волне в связи с возможностью ее использования для выявления приповерхностных и подповерхностных дефектов.

Все результаты исследований обсуждались на заседаниях научного совета отдела неразрушающих методов исследования металлов под руководством А.С. Матвеева, вызвали всеобщий интерес и сопровождалась интересными дискуссиями. По прошествии некоторого времени вопрос об открытии новой волны был снят с повестки дня, и было принято решение о постановке новой специализированной работы по исследованию головных волн и подаче заявки на изобретение нового способа ультра-

звукового контроля. Способ контроля по а.с. № 491092 эхо-методом сварных соединений с использованием головных волн показан на рис. 2. Излучатель 1 продольной волны под первым критическим углом возбуждает в призме продольную волну 2, падающую на границу искатель – контролируемый элемент. В контролируемом металле возбуждается головная волна, в том числе продольная подповерхностная волна 3. Она распространяется вдоль поверхности и частично отражается от внутренней подповерхностной несплошности 4. Отраженная подповерхностная волна возбуждает в призме приемника 6 боковую продольную волну 7, регистрируется и фиксируется на экране дефектоскопа. По времени распространения, положению на экране дефектоскопа и амплитуде эхо-сигнала способ контроля позволяет определить наличие дефекта, его координаты, условные и эквивалентные размеры и характеристики.

## 2. Базисные исследования головных волн

Выполненные в ЦНИИТМАШ в 1973–1975 гг. в рамках научно-исследовательской работы Т-76 «Исследование боковых ультразвуковых волн с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)» [3] оригинальные пионерские исследования возбуждения, распространения и приема ГВ показали возможность применения их для обнаружения дефектов в при- и подповерхностном слоях глубиной 1–15 мм. На основе использования ГВ были разработаны новые способы ультразвукового контроля качества материалов, защищенные авторскими свидетельствами [4, 5].

Как уже отмечалось, для возбуждения ГВ может быть использован наклонный искатель с углом, близким к первому критическому [6]. Схема экспериментального исследования оптимального угла призмы искателя ГВ пьезопластинами диаметром 18 мм на частоту 1,8 МГц показана на рис. 3. Один из искателей имел плексигласовую призму с углом  $27^\circ 30'$  (первый критический угол), другой – переменный угол наклона.

Результаты эксперимента (сплошная линия) показали, что максимум амплитуды приходится на значение угла наклона призмы, соответствующее первому критическому. Дальнейший ход кривой соответствует диаграмме направленности пьезопластины, теоретическое значение которой показано штрихами. Некоторое несовпадение теоретической и экспериментальной кривых объясняется неточностью формы пьезопластины искателя с переменным углом (она была немного обрезана по хордам), а также тем, что размеры пьезопластин излучателя и приемника были равны, благодаря чему минимумы сгладились. Следовательно, оптималь-

ное значение угла призмы для возбуждения ГВ соответствует первому критическому углу.

Если вновь обратиться к рис. 1, то с учетом результатов исследования на рис. 2 стало понятно, что продольно-поверхностная головная волна в контролируемом образце возбуждалась за счет лучей продольной волны, исходящих от излучателя под первым критическим углом. Этот угол для границы оргстекло–сталь равен  $27,5^\circ$ , т.е. соответствующий луч у искателя с углом призмы  $30^\circ$  отстоит на  $2,5^\circ$  от осевого луча.

Применительно к задачам УЗ-дефектоскопии металлов были выполнены исследования закономерностей **ослабления ультразвуковых головных волн** с углом ввода  $90^\circ$  с расстоянием, фиксируемым по возбуждаемой головной волной в приграничной среде боковой волне [7].

Из работы [8] известно выражение для ослабления потенциала головной волны, распространяющейся вдоль границы двух жидких сред. Волна проходит путь  $L_0 L_1$  и  $L_2$  (рис. 4):

$$\Psi_\delta = \frac{2in \exp[ik_0(L_0 + L_2) + ik_1L_1]}{k_0m(n^2 - 1)\sqrt{(L_0 + L_2)\sin\alpha + L_1L_1^{3/2}}}, \quad (1)$$

где  $L_0, L_2$  – путь в призмах из оргстекла или жидкости;  $L_1$  – путь в нижней среде;  $\alpha$  – угол падения волны;  $c_0, c_1$  – скорость звука в средах;  $k_0, k_1$  – волновое число в верхней и нижней средах;

$$n = \frac{c_0}{c_1} = \frac{k_0}{k_1} \quad \text{– показатель преломления;}$$

$$m = \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad \text{– отношение плотностей верхней и нижней сред.}$$

В этом выражении  $k_0(L_0 + L_2) + k_1L_1$  означает набег фазы на пути  $L_0L_1L_2$  (рис. 4) от излучателя до приемника. Этот путь состоит из отрезков  $L_0$  и  $L_2$ , по которым волна распространяется в верхней среде под первым критическим углом к границе и от нее и которые в дальнейшем считаем равными, и отрезка  $L_1$ , по которому волна распространяется вдоль границы со скоростью, равной скорости продольной волны в нижней среде.

Как уже отмечалось, формула (1) относится к случаю, когда волна распространяется вдоль границы двух жидких сред. Однако ввиду того, что физика распространения головной волны вдоль границы двух твердых сред или жидкость – твердое тело аналогична случаю с границей жидкость–жидкость, можно предположить, что основные закономерности, в частности зависимость  $\Psi_\delta$  от  $L_1$ , будут сохраняться и для твердых тел. Экспериментальное определение зависимости изменения амплитуды головной волны от расстояния, на которое она рас-

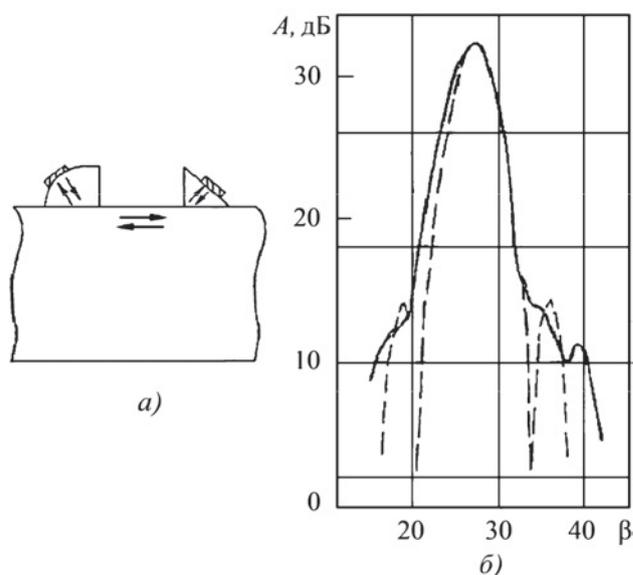


Рис. 3. Исследование зависимости чувствительности излучения и приема головных волн от угла наклона пьезопреобразователя: а – схема эксперимента; б – результаты эксперимента; сплошная линия – результаты эксперимента; штриховая – расчетная диаграмма направленности

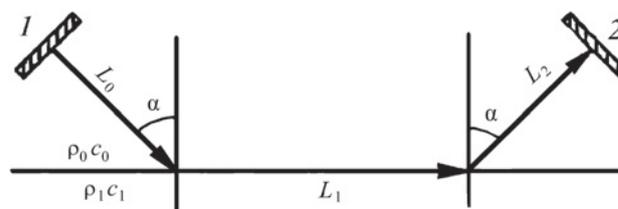


Рис. 4. Распространение головной волны вдоль границы: 1 – излучатель; 2 – приемник

пространяется, проводилось на образцах из перлитной стали контактным и иммерсионным способами. Контроль контактным способом осуществляли с помощью наклонных искателей с углом призмы, равным первому критическому углу, т.е. для пары оргстекло–сталь угол равнялся  $27^\circ30'$ . При контроле иммерсионным способом искатели и образец помещали в ванну с жидкостью.

Исследования вели с помощью дефектоскопа USIP-10W и искателей на частоту 1,0; 1,25; 1,8; 2,5; 3,6; 4,0 и 5,0 МГц. На каждой частоте измерения проводили с пьезопластинами диаметром 12 и 18 мм. В результате получено, что при распространении ГВ вдоль границы с водой (иммерсионный режим контроля) ослабление ее амплитуды происходит по закону  $L_1^{-2}$ .

При контактном методе амплитуда пришедшего сигнала убывает с увеличением расстояния по закону  $L_1^{-1,73 \pm 0,024}$ . В качестве примера некоторые результаты измерений приведены на рис. 5. Влияние затухания звука пренебрежимо мало. Зависи-

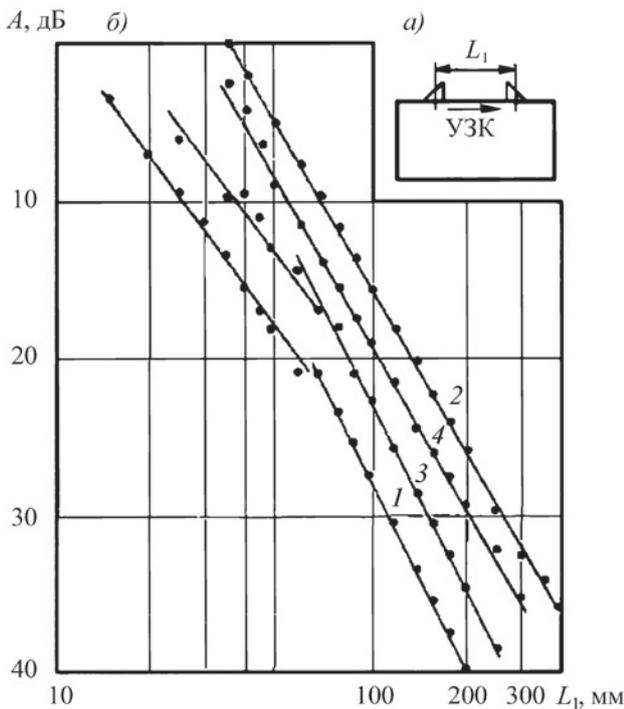


Рис. 5. Ослабление головной волны с расстоянием на частоте 1,8 МГц: 1 и 3 – иммерсионный режим; 2 и 4 – контактный режим при диаметрах пьезоэлементов 18 мм (1 и 2) и 12 мм (3 и 4)

мости 1 и 3 относятся к иммерсионному режиму, а 2 и 4 – к контактному. Для обоих случаев приведены результаты на частоте 1,8 МГц при диаметрах пьезоэлементов 18 мм (1 и 2) и 12 мм (3 и 4). Точками показаны результаты экспериментальных измерений, а прямыми линиями – зависимости, полученные в результате математической обработки экспериментальных результатов.

При возбуждении и приеме ГВ контактными искателями с пьезоэлементами диаметром 18 мм ослабление амплитуды происходит по закону  $L_1^{-1,75}$ . Полученные результаты указывают на то, что при распространении вдоль границы вода–сталь амплитуда ГВ убывает быстрее, чем вдоль границы воздух–сталь. Такой результат легко объясняется тем, что в жидкости образуется боковая продольная волна, которая уносит определенное количество энергии. Если верхней средой является воздух, то благодаря большой разнице акустических импедансов воздуха и стали энергия боковой волны ничтожно мала. Амплитуда головных УЗ-волн убывает значительно быстрее в сравнении с обычно используемыми в УЗ-дефектоскопии объемными продольными и поперечными волнами, амплитуда которых убывает пропорционально расстоянию.

Быстрое ослабление головной волны связано с образованием боковых волн как в верхней, так и в нижней средах. Роль боковой волны в нижней сре-

де играет образующаяся на границе раздела боковая поперечная волна [9].

Экспериментальные результаты говорят о том, что расстояния, на которых можно фиксировать ГВ (~300 мм), более чем на порядок меньше, чем при использовании в УЗ-дефектоскопии обычных объемных волн.

Исследованы процесс формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде, а также физика процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде, а именно: изучены распределения амплитуды напряжений в ГВ с глубиной и определены углы лучей, на которых эти амплитуды достигают максимального значения [10].

Схема измерения распределения амплитуды напряжений в головной волне по глубине показана на рис. 6. Расстояние между излучателем 1 и плоскостью MN, на которой располагается приемник 2, менялось в пределах от 15 до 200 мм. При определенном расстоянии ( $l = 15, 50, \dots, 200$ ) приемник с пьезоэлементом диаметром 2 мм перемещался по плоскости MN, и измерялась амплитуда импульса головной волны в зависимости от глубины  $z$ . Оси излучателя и приемника располагались в одной плоскости. Характеристики поля головной волны снимались с помощью контактных наклонных искателей.

На основании предварительных экспериментов ранее был сделан вывод о том, что максимум амплитуды головной волны достигается на определенном луче, идущем от точки выхода искателя. Для проверки общности этого предположения и определения углов была принята следующая система изображения результатов (рис. 7). По оси абсцисс отложена амплитуда сигнала подповерхностной волны, а по оси ординат – глубина точки измерения  $z$ . При построении зависимости амплитуды сигнала от глубины ее значения нормируются относительно максимальной амплитуды для данного расстояния  $l$ . Для ряда значений  $l$ , которые обычно кратны 50 мм и показаны выше нулевой амплитуды, такие зависимости наносятся на один график с соблюдением геометрических пропорций между максимумом кривой распределения амплитуд, т.е. нулями амплитуд. На рис. 7 приведены результаты, полученные при использовании контактных излучателей с пьезоэлементами диаметром 18 мм на частоте 1,0 и 5,0 МГц, а также диаметром 12 мм на частоте 1,8 МГц. Там же показан луч, на котором расположены максимальные значения амплитуд при различных расстояниях и значение угла между этим лучом и контактной поверхностью (угол скольжения). Поле ГВ в контролируемой среде характеризуется двумя существенными признаками.

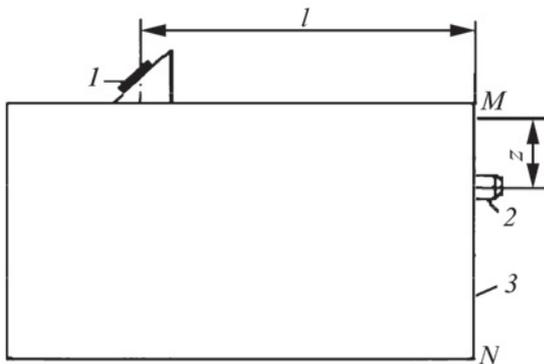


Рис. 6. Схема измерения поля головной волны в стали: 1 – излучатель; 2 – точечный приемник; 3 – образец

Это, во-первых, наличие минимума (нуля) амплитуды на поверхности и, во-вторых, наличие луча, на котором достигается максимум амплитуды. Угол, образованный этим лучом с контактной поверхностью образца, составляет 11–12° на частотах 1,8; 2,5; 5,0 МГц и 12–15° – на частоте 1,0 МГц. Можно считать, что в пределах точности экспериментальных измерений этот угол остается практически постоянным. При измерении распределения поля ГВ излучателей с пьезоэлементами диаметром 12 мм (см. рис. 7, в) на тех же частотах было обнаружено, что поле головной волны имеет такую же

структуру, а угол с максимальным значением амплитуды оставался практически постоянным (12°). Таким образом, в пределах частот и диаметров пьезоэлементов, обычно используемых в УЗ-дефектоскопии, направление луча с максимальным значением амплитуды практически не меняется.

Теоретическая оценка акустического поля ГВ, формируемого контактным искателем, выполнена в соответствии со следующим алгоритмом. Рассчитывалась диаграмма направленности в плексигласе по формуле

$$\Phi(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол направления луча, отсчитываемый от акустической оси излучателя;  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка;  $k$  – волновое число;  $a$  – радиус излучателя.

Для каждого луча диаграммы направленности определялся угол падения на границу и направление преломленного луча. Амплитуда волны в направлении преломленного луча определялась перемножением значения, полученного из формулы (2), на коэффициент прохождения по амплитуде действующей составляющей тензора напряжений, который при угле преломления, равном 90°, имеет минимум.

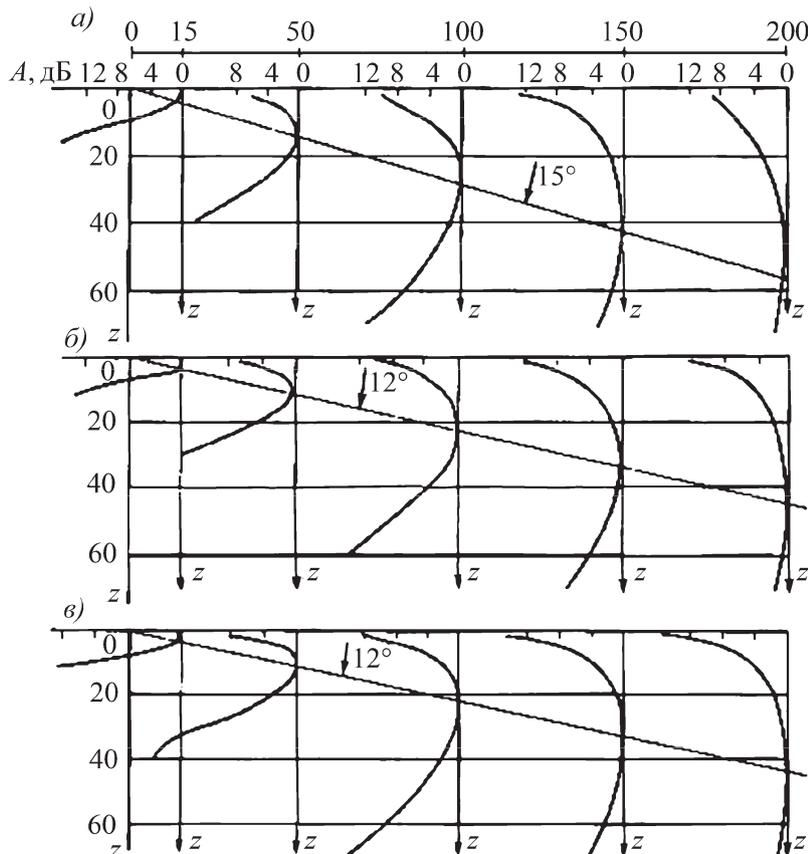


Рис. 7. Экспериментальные значения поля головной волны для излучателя с пьезоэлементом диаметром 18 мм на частоте 1,0 МГц (а), 5,0 МГц (б) и диаметром 12 мм на частоте 1,8 МГц (в)

Коэффициент прохождения по амплитуде для границы оргстекло–сталь рассчитывался на ЭВМ по формулам, приведенным в работе [11]:

$$D_{II} = \frac{2\rho_2 c_{2l} c_{2t}^2 c_{1l} \cos 2\alpha_{2l} \cos \alpha_{1l}}{\rho_1 c_{1l}^4 \cos 2\alpha_{1l} \sin \alpha_{1l} N}, \quad (3)$$

где

$$N = 2ctg\alpha_{1l} + \frac{c_{1l}}{2c_{1t}} \frac{\cos^2 2\alpha_{1l}}{\cos \alpha_{1l}} + \frac{2\rho_2 c_{2l}^4}{\rho_1 c_{1l}^4} ctg\alpha_{2l} + \frac{\rho_2 c_{1l} c_{2l}^3}{2\rho_1 c_{1l}^4} \frac{\cos^2 2\alpha_{2l}}{\cos \alpha_{1l}}; \quad (4)$$

$\rho_1, \rho_2$  – плотность верхней и нижней сред соответственно;  $c_{1l}, c_{2l}$  – скорость продольной волны в верхней и нижней средах соответственно;  $c_{1t}, c_{2t}$  – скорость поперечной волны в верхней и нижней средах соответственно;  $\alpha_{1l}, \alpha_{2l}$  – углы падения и преломления поперечной волны соответственно;  $\alpha_{1l}, \alpha_{2l}$  – углы падения и преломления продольной волны соответственно.

Рассчитанные акустические поля ГВ излучателей с пьезоэлементами диаметром 18 мм для границы оргстекло–сталь на частоте от 1 до 5 МГц показаны на рис. 8.

Принятая модель формирования поля головной волны в нижней среде хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Теоретически рассчитанное поле головной волны, так же как и определенное экспериментально, имеет на поверхности минимальные значения амплитуды; на определенном луче находится максимальное значение амплитуды. Значения угла, образуемого этим лучом с поверхностью, рассчитанные теоретически и полученные экспериментально для излучателей с частотой 1,8 и 2,5 МГц, практически совпадают. Для излучателей с другими частотами экспериментальное и теоретическое значения этого угла также близки. Вблизи границы раздела сред экспериментально снятое поле головной волны не полностью совпадает с полем, теоретически рассчитанным по предложенной модели. Это различие может объясняться следующим. При выводе формулы (3) предполагалось, что поверхность раздела сред плексиглас–сталь является безграничной, напряжения в верхней и нижней средах на границе равны на всем ее протяжении. В экспериментах часть поверхности вне места соприкосновения с призмой искателя является свободной, и на ней нормальные и тангенциальные напряжения обращаются в нуль. Поскольку в зоне расположения искателя поверхность соприкасается с плексигласовой призмой через слой масла, на этом участке тангенциальные

напряжения также обращаются в нуль, а нормальные не равны нулю.

Собственные теоретические исследования структуры акустического поля подповерхностной ГВ выполнены Л.В. Басацкой и И.Н. Ермоловым [12]. Они сопоставили полученные ими расчетные решения с приведенными выше и подтвердили экспериментально полученные закономерности структуры поля, в особенности вблизи угла с максимальной амплитудой акустического поля подповерхностной волны.

### 3. Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами

Ультразвуковой контроль ГВ может осуществляться теньвым и эхо-методами. Для контроля теньвым методом в качестве излучателя и приемника могут быть использованы призматические искатели, имеющие угол падения, равный значению первого критического угла. Такие излучатели и приемники применялись при изучении ослабления головных волн с расстоянием и структуры акустического поля

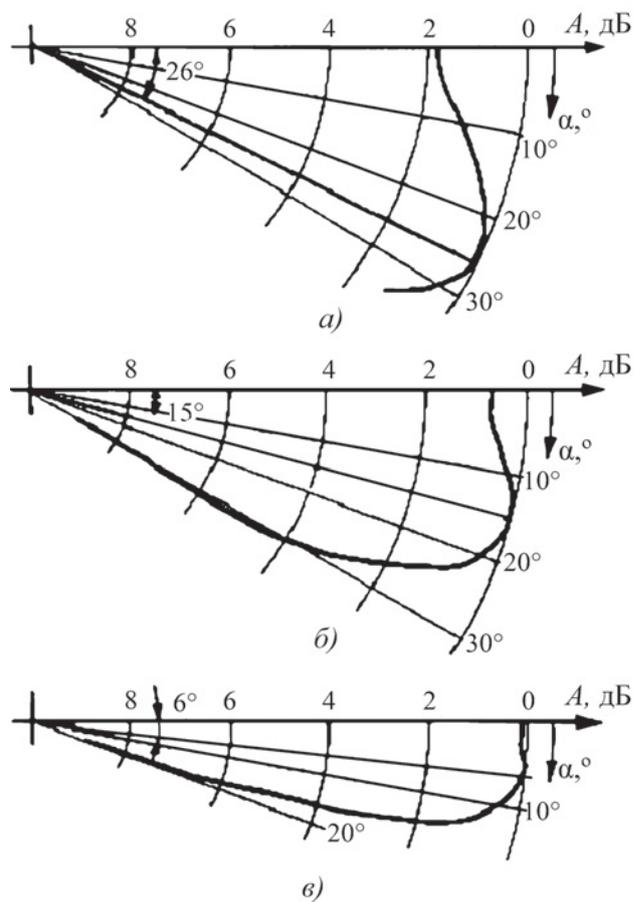


Рис. 8. Поле головной волны контактных излучателей (расчет) с частотой: а – 1,0 МГц; б – 1,8 МГц; в – 5,0 МГц

наклонного искателя головной волны в контролируемой среде (см. раздел 1 данной статьи) [13]).

Для контроля эхо-методом, а он наиболее часто используется при УЗК в энергомашиностроении и энергетике, необходимо было разработать специальные искатели с достаточными для практики чувствительностью и соотношением полезный сигнал/шум. Возможность применения искателей совмещенной конструкции определена экспериментально. Был спроектирован и изготовлен наклонный искатель ГВ с призмой из оргстекла с пьезоэлементом диаметром 18 мм на частоту 1,8 МГц. Угол призмы 27°30'. Размеры и форму призмы выбирали из условия достижения минимального уровня собственных шумов искателя. С помощью такого искателя измеряли донный сигнал (отражение от грани, перпендикулярной контактной плоскости и оси искателя) и уровень шумов в функции от расстояния в диапазоне 0–100 мм (рис. 9).

Верхняя кривая является аппроксимированной зависимостью амплитуды донного сигнала от расстояния.

Экспериментальные значения донного сигнала, показанные на рис. 9 точками, имеют значительные флуктуации вследствие сложения полезного сигнала с сигналами собственных шумов искателя. Уровень шумов отстоит от донного сигнала не более чем на 10 дБ. Такое соотношение полезный сигнал/шум делает невозможным обнаружение небольших подповерхностных дефектов с помощью данного искателя. Действительно, подповерхностный дефект в виде плоскодонного отверстия диаметром 4 мм, плоскость которого ориентирована перпендикулярно контактной поверхности, на глубине 5 мм при любом расстоянии между дном отверстия и искателем не виден на экране дефектоскопа. Полученный результат указывает на низкую чувствительность искателей совмещенной конструкции, а также на то, что выбор конструкции искателей должен определяться особенностями УЗК ГВ.

Главная особенность технологии УЗК ГВ состоит в том, что импульсы ГВ первыми приходят на приемник и возникают вблизи зондирующего импульса. Для эффективного использования данного свойства ГВ искатели должны иметь акустические параметры, которые позволяют получить высокое соотношение полезный сигнал/шум вблизи зондирующего импульса. В связи с такими требованиями применение совмещенных искателей при УЗК эхо-методом оказалось неэффективным.

Известно, что уровень шумов вблизи зондирующего импульса снижается у раздельно-совмещенных (РС) искателей. В нашем случае РС-искатели в конструктивном отношении могут быть двух типов. Они условно названы «тандем» и «дуэт». В первом (рис. 10, б) два наклонных преобразователя (излучатель и приемник) расположены друг за другом по отношению к отражателю, в «дуэте» (рис. 10, а) излучатель и приемник расположены рядом, примерно на одном расстоянии от отражателя.

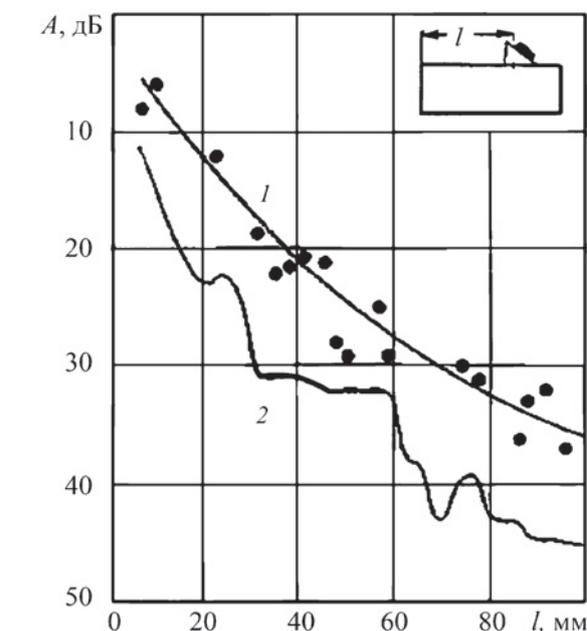


Рис. 9. Уровень донного сигнала шумов совмещенного искателя:

1 – донный сигнал; 2 – шумы

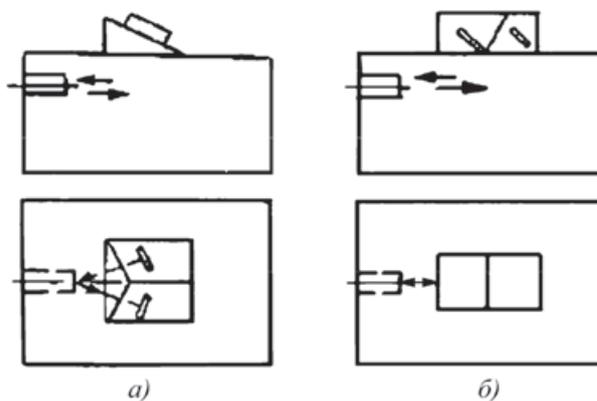


Рис. 10. Типы искателей для контроля головными волнами: а – «дуэт»; б – «тандем»

Были проработаны акустические системы (искатели), в которых излучатель и приемник составляют одну единую конструкцию, т.е. типа «тандем» и «дуэт».

Анализируя выбранные типы конструкций искателей, необходимо прежде всего рассмотреть их технические характеристики с точки зрения производительности контроля. Если конструкция искателя выполнена по типу «тандем», то будут обнаруживаться дефекты в зоне, расположенной по оси искателя и вблизи от нее на ширину поля излуче-

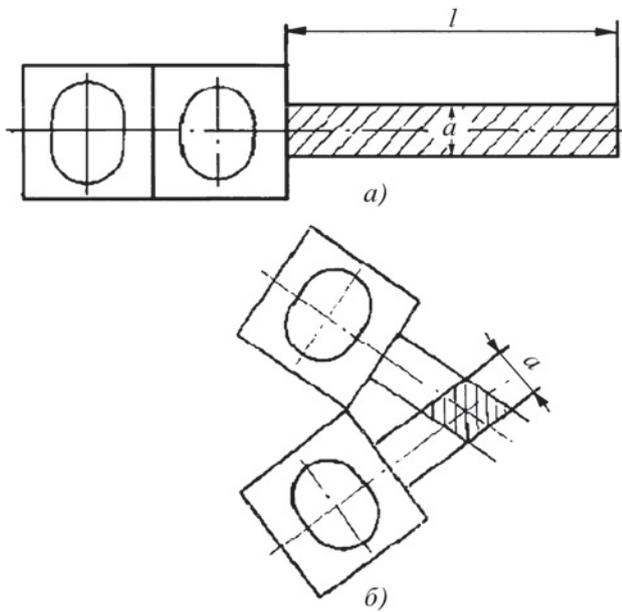


Рис. 11. Зона контроля для различных искателей: а – «тандем»; б – «дуэт»



Рис. 12. Первые искатели головных волн: а – ИЦ-61 («тандем»); б – ИЦ-106 (миниатюрный «дуэт»)

ния–приема. Расстояние  $l$  (рис. 11), на котором возможно обнаружение дефектов, будет зависеть от интенсивности излучаемого поля, отражающих характеристик дефектов и глубины их залегания. Для одинаковых дефектов на одной глубине это расстояние будет определяться только интенсивностью излучаемого поля. Если принять ширину захвата при контроле таким искателем равной половине диаметра пьезоэлемента  $a$ , то зона контроля будет определяться произведением расстояния на ширину зоны захвата. Выражая зону контроля в виде площади проекции на контактную поверхность, получим  $S_a = al$ .

Для искателей типа «дуэт» проекция контролируемой зоны на контактную поверхность представляет собой ромб, а ее площадь определяется по формуле

$$S_a = a^2 / \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между акустическими осями излучателя и приемника.

Считая  $a$  постоянной величиной, можно утверждать, что площадь контролируемой зоны для искателя «дуэт» определяется углом встречи осей излучателя и приемника.

Однако при УЗК важна не просто площадь зоны контроля, которая является характеристикой производительности в статике. Важно знать, какие параметры и как будут влиять на производительность контроля с учетом направления сканирования, т.е. в динамике. В частности, при контроле искателем «тандем», по-видимому, расстояние  $l$  будет больше, чем при контроле искателем «дуэт». Это означает, что искатель «тандем» более производителен при построчном сканировании по большой площади (контроль поковок, листов). В свою очередь, «дуэт» имеет большую ширину зоны контроля, и, на-

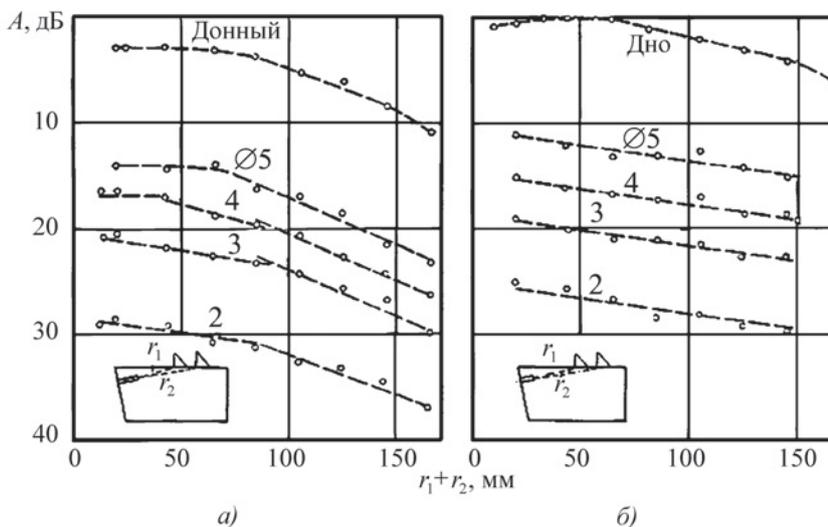


Рис. 13. Зависимости амплитуда–расстояние–диаметр для подповерхностных дефектов с разным размером при контроле искателем ИЦ-61 (-91): а – 1,8 МГц; б – 2,5 МГц

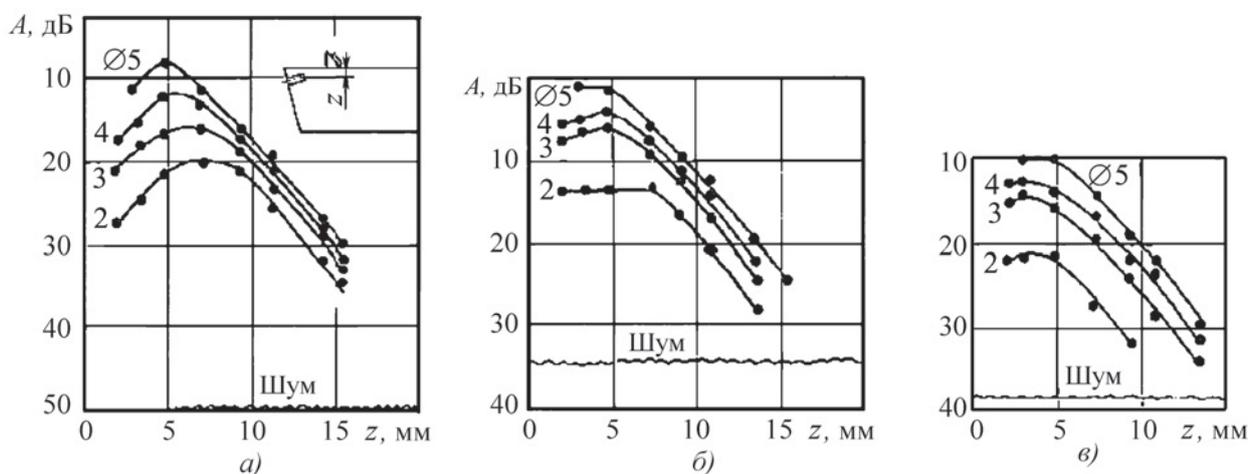


Рис. 14. Зависимости амплитуда–глубина–диаметр для разных размеров отражателей при контроле искателем ИЦ-70: а – № 3 (1,8 МГц); б – № 8 (1,8 МГц); в – № 9 (2,5 МГц)

пример, в случае контроля сварного шва в целях выявления поперечных трещин, при котором искатель перемещается по наплавленному металлу шва вдоль его оси, может быть более производителен. С точки зрения производительности контроля для искателя «дуэт» возможен случай, когда акустические оси параллельны друг другу ( $\alpha = 0$ ). Однако в этом случае УЗК осуществляется боковыми лучами диаграммы направленности, и возможность получения необходимой чувствительности весьма проблематична.

Для получения наилучших характеристик разрабатываемых искателей были выбраны оптимальные параметры и использованы в их конструкции.

На основании выбранных параметров разработаны первые конструкции искателей головных волн: ИЦ-61 и ИЦ-70 («дуэт»). На рис. 12 представлены фотографии искателей ИЦ-61 («тандем») и ИЦ-106 (миниатюрный «дуэт»), разработанные в лаборатории ультразвуковых методов исследования металлов (ЛУЗМИМ), которой руководил И.Н. Ермолов.

Для этих искателей исследованы зависимости амплитуды эхо-сигнала от размера дефекта, глубины его залегания и расстояния, проходимого ультразвуком. В соответствии с ГОСТ 14782 эти зависимости определялись с помощью плоскодонных отверстий, дно которых перпендикулярно лучу с максимальной амплитудой поля. На рис. 13 приведены зависимости между амплитудой максимального сигнала ГВ, расстоянием, которое проходит звук по пути излучатель–отражатель–приемник, и размером отражателя (АРД-диаграмма) для ИЦ-61. В результате анализа зависимости амплитуды эхо-сигнала от расстояния, проходимого звуком  $A \sim (r_1 + r_1 r_2)^{-n}$ , для ИЦ-61 обнаружено, что показатель степени принимает значения меньшие

единицы. Исследование зависимости между амплитудой эхо-сигнала и размером отражателя показало, что амплитуда  $A$  прямо пропорциональна площади отражателя  $S$ . Отметим также, что для ИЦ-61 максимальная амплитуда эхо-сигнала достигается вдоль луча с максимальной амплитудой поля излучателя. Это означает, что для каждой глубины залегания дефекта имеется расстояние, при котором дефект выявляется с максимальной амплитудой.

На рис. 14 показаны зависимости амплитуда–глубина–диаметр отражателя при контроле искателем ИЦ-70 на частоте 1,8 МГц (рис. 14, а, б) и 2,5 МГц (рис. 14, в). Полученные значения аналогичны зависимостям для прямых раздельно-совмещенных искателей. Максимальная чувствительность достигается на глубине, соответствующей пересечению акустических осей (лучей с максимальной амплитудой) поля излучателя и приемника.

Анализ полученных характеристик показал, что разработанные искатели позволяют обнаруживать достаточно небольшие подповерхностные дефекты. В дальнейшем в ЦНИИТМАШ были разработаны другие типы искателей (преобразователей) ГВ:

- искатели ИЦ-91 и ПГЦ-91, в акустической части являются полным аналогом ИЦ-61;
- искатели ПГЦ-70, в акустической части являются полным аналогом ИЦ-70.

В них используются специализированные детали и материалы, обеспечивающие работоспособность и качество искателей. Для решения специализированных задач УЗК различных элементов, сварных соединений, наплавов на кромках и антикоррозионных наплавов были разработаны и используются специализированные преобразователи головных волн для ручного и автоматизированного

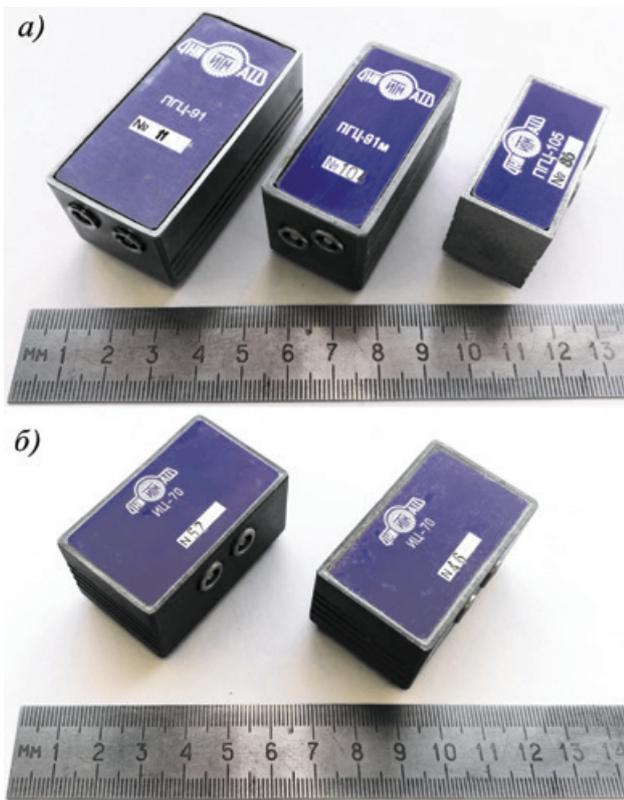


Рис. 15. Современные искатели (преобразователи ПГВ) головных волн:  
а – «тандем»: ПГЦ-91, ПГЦ-91м и миниатюрный ПГЦ-105; б – «дуэт»: ИЦ-70

контроля (рис. 15) – «тандем»: ПГЦ-91м, ПГЦ-300, ПГЦ-105 и ПГЦ-111; «дуэт»: ПГЦ-70м, ПГЦ-106 и ПГЦ-108, ПГЦ-112 и др. Покупатели искателей головных волн одновременно с их приобретением, вступая во взаимоотношения с разработчиками и изготовителями, в полной мере обеспечиваются нашими методическими разработками и консультациями.

#### Библиографический список

1. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Способ ультразвукового контроля качества материалов: А.с. № 491092 от 01.06.73 // Бюл. изобр. 1975. № 41.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом // Неразрушающий

контроль материалов изделий...: Труды VII Всесоюзной конференции. Киев, 1974.

3. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Исследование боковых ультразвуковых волн с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая). Т-76: Отчет НИР. М.: ЦНИИТМАШ, 1975.
4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов: А.с. № 502311 от 28.12.73 // Бюл. изобр. 1973. № 5.
5. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвукового контроля качества материалов: А.с. № 565249 от 20.05.74 // Бюл. изобр. 1977. № 26.
6. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Использование волн головного типа для ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 33–40.
7. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием // Дефектоскопия. 1979. № 1. С. 37–40.
8. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1957. 497 с.
9. Разыграев Н.П. Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 1979.
10. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 5–10.
11. Krautkramer J. und H. Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Dritte auflage. Berlin–Heidelberg–N.Y.: Springer-Verlag, 1975. 612 s.
12. Басацкая Л.В., Ермолов И.Н. Теоретическое исследование ультразвуковых продольных подповерхностных волн в твердых средах // Дефектоскопия. 1980. № 7. С. 58–65.
13. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н. Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами // Дефектоскопия. 1981. № 1. С. 53–62.

Продолжение читайте в следующих номерах журнала. ■

#### Ответы на кроссворд

**По горизонтали:** 3. Дуралюмин. 5. Изотропия. 6. Жаростойкость. 11. Волокнит. 13. Литье. 15. Модифицирование. 17. Деазотирование. 20. Дефект. 21. Зерно. 22. Блюм.

**По вертикали:** 1. Макромолекула. 2. Ковкость. 4. Материаловедение. 7. Крица. 8. Воронение. 9. Борирование. 10. Анизотропия. 12. Концентрация. 14. Диамагнетизм. 16. Абразив. 18. Излом. 19. Железо.