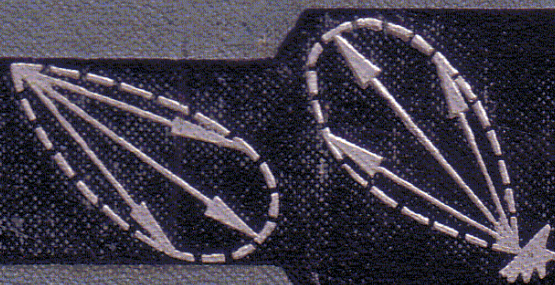


УЛЬТРА-
ЗВУКОВОЙ
КОНТРОЛЬ
СВАРНЫХ
ШВОВ

А.К.ГУРВИЧ, И.Н.ЕРМОЛОВ



ПРЕДИСЛОВИЕ

Соединение различных узлов и деталей с помощью сварки находит широкое применение в промышленности и на транспорте.

Повышение требований к качеству сварных конструкций, расширение диапазона толщин свариваемого металла, освоение новых автоматизированных методов сварки обуславливает необходимость совершенствования и внедрения новых прогрессивных методов контроля качества сварных соединений. Исследованиями последних лет установлены большие возможности ультразвукового контроля, впервые предложенного советским ученым С. Я. Соколовым. В связи с этим особое значение приобретает дальнейшее развитие и освоение метода ультразвуковой дефектоскопии для выявления внутренних пороков в сварных швах.

Специфика ультразвуковой дефектоскопии сварных швов требует создания специальной аппаратуры и разработки методик контроля. Существенную помощь в решении указанных задач должны оказывать литературные пособия, систематизирующие современные положения и пути развития ультразвукового контроля сварных соединений.

Настоящая работа является попыткой изложить в одной книге общие методические положения ультразвуковой дефектоскопии сварных швов, основные принципы конструирования аппаратуры, особенности и порядок контроля различных видов соединений, а также пути автоматизации процесса контроля.

Рассматриваемому методу присущи как преимущества, так и некоторые недостатки по сравнению с широко распространенными методами рентгено- и гаммаграфирования. В ряде случаев эти методы дополняют друг друга. Поэтому в книге большое внимание уделено формам применения ультразвукового контроля и сочетания его с методами просвечивания.

Применяемая в настоящее время ультразвуковая аппаратура не позволяет получать объективный документ контроля. Результаты такого контроля во многом зависят от квалификации оператора и его сосредоточенности в процессе работы, а также от степени соответствия основных параметров контроля параметрам, предусмотренным методикой. В связи с этим в книге подробно изложены основные принципы стандартизации метода ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений, повышающие точность контроля.

Объективность, высокая надежность и производительность ультразвукового контроля могут быть достигнуты в результате механизации и автоматизации процесса дефектоскопии с регистрацией результатов в документе контроля. Этой весьма актуальной и малоосвещенной проблеме в книге уделено особое внимание. В ней широко использованы результаты исследований, выполненных авторами или под их руководством в отделе ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений на железнодорожном транспорте НИИ мостов ЛИИЖТ и в лаборатории ультразвуковой дефектоскопии ЦНИИТМаш, а также материалы опубликованных отечественных и зарубежных работ.

Небольшой объем книги не позволил подробно рассмотреть все вопросы техники ультразвукового контроля, в частности, вопрос автоматизации контроля швов труб на трубопрокатных заводах, различные примеры практического применения ультразвуковой дефектоскопии и некоторые другие, а также пути дальнейшего развития этого метода. Большинство этих вопросов освещено в литературе, перечень которой приведен в конце книги.

Главы I, III, V, VI; вступительная часть, § 1, 2, 4, 6 и 7 гл. VII; вступительная часть, § 3 и 5 гл. VIII; гл. IX; вступительная часть, § 1, 2 и 4 гл. X; гл. XI и гл. XII написаны А. К. Гурвичем.

Главы II, IV; § 3 и 5 гл. VII; § 1, 2 и 4 гл. VIII; § 3 гл. X написаны И. Н. Ермоловым.

Авторы благодарят товарищей по работе и выражают особую признательность младшему научному сотруднику Л. И. Кузьминой за постановку и проведение ряда специальных исследований и большую практическую помощь в процессе подготовки книги.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 252601, Киев, 4ГСП, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ И МЕТОДАХ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Ультразвуковыми колебаниями называют упругие колебания, частота которых больше 20 кГц, т. е. выше частоты звука, воспринимаемого человеческим ухом. В дефектоскопии используются ультразвуковые колебания с частотой 0,5 — 25 МГц.

Упругие колебания могут быть возбуждены в газообразных, жидких и твердых средах. При этом колебательное движение возбужденных частиц благодаря наличию упругих сил между ними вызывает распространение упругой ультразвуковой волны, сопровождаемое переносом энергии.

Распространение волны происходит с определенной скоростью, называемой скоростью ультразвуковой волны. Следует отличать скорость волны C от скорости колебаний частиц v . Распространение упругой волны сопровождается образованием зон, в которых частицы находятся в одинаковом колебательном состоянии. Минимальное расстояние между двумя такими зонами называется длиной волны.

Длина волны λ связана со скоростью распространения и частотой колебаний соотношением

$$\lambda = \frac{C}{f}, \quad (1)$$

где C — скорость распространения волны; f — частота колебаний.

Скорость распространения волны определяется физическими свойствами среды. Поэтому изменить длину ультразвуковой волны в любой среде можно только путем изменения частоты возбуждаемых колебаний.

Направление колебаний частиц может быть различным по отношению к направлению распространения волны; оно определяет собой тип волны. В бесконечном (неограниченном) объеме могут возникать два типа волн: продольные и поперечные. В продольной волне (волне сжатия) частицы колеблются вдоль направления распространения волны, а в поперечной волне (волне сдвига) — перпендикулярно.

Продольные волны могут быть возбуждены в любых средах, а поперечные — только в твердых.

В неограниченных твердых средах плотностью ρ скорость продольных волн C_l определяется модулем нормальной упругости E и коэффициентом Пуассона ν :

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

а скорость поперечной волны C_t — модулем сдвига G :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) можно определить отношение скоростей поперечных и продольных волн [67]

$$\frac{C_t}{C_l} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}}. \quad (4)$$

Поскольку в металлах $\nu \approx 0,3$,

$$\frac{C_t}{C_l} \approx 0,55.$$

В твердых телах, кроме продольных и поперечных, могут распространяться другие типы волн. Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться поверхностные волны, или волны Рэлея, частицы в которых движутся по эллипсу. В металлах эти волны практически затухают на глубине около $1,5 \lambda$. Скорость поверхностных волн равна примерно $0,93$ скорости поперечных волн.

Если среда ограничена двумя поверхностями, расстояние между которыми соизмеримо с длиной волны, то в полученной таким образом пластине распространяются нормальные волны (их также называют волнами Лэмба, пластиночными или свободными).

В стержнях могут распространяться также изгибные волны, волны расширения-сжатия, и, кроме того, крутильные

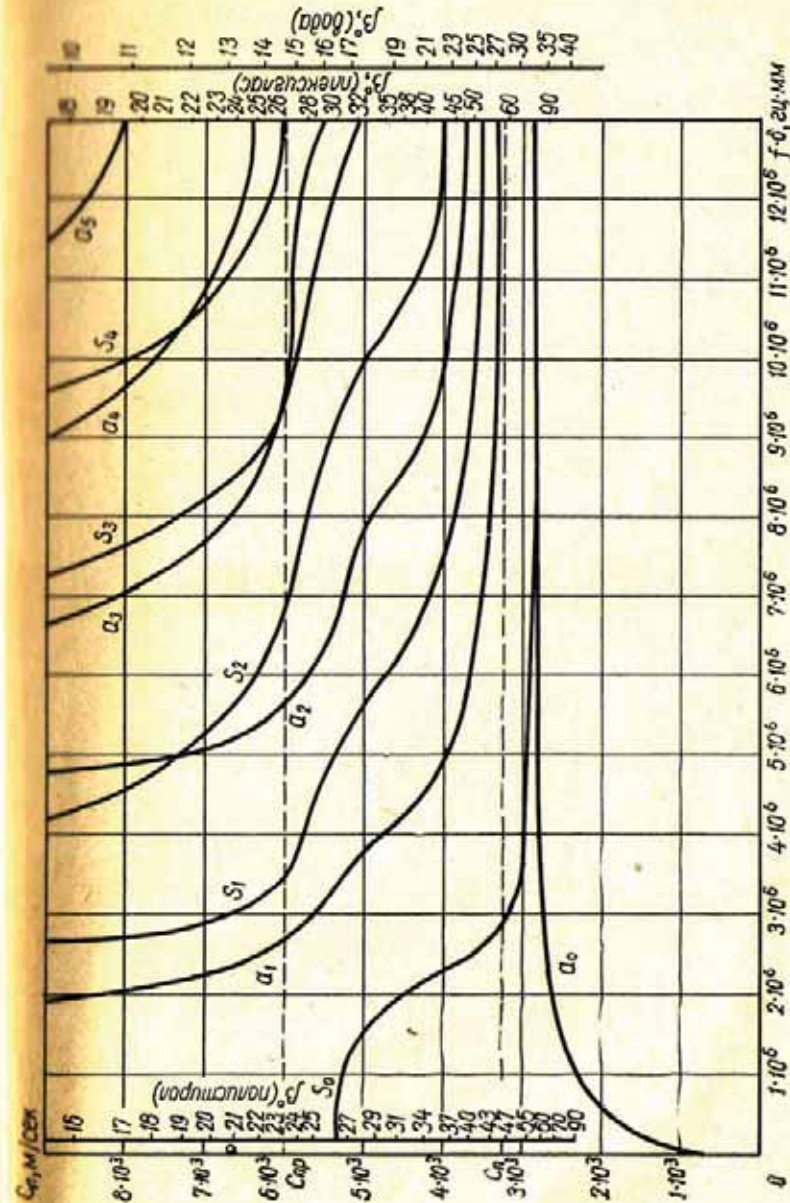


Рис. 1. Графики, характеризующие условия возбуждения пластиночных волн в листах стали:

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 — антисимметричные моды; s_0, s_1, s_2, s_3, s_4 — симметричные моды; β — угол падения продольной волны; f — частота ультразвука; δ — толщина листа.

и радиальные. Волны в пластинах и стержнях отличаются от других типов тем, что скорость их зависит от частоты и толщины пластины или диаметра стержня.

Зависимость скорости распространения пластиночных волн различных мод в стали от произведения частоты колебаний на толщину листа представлена на рис. 1.

При дефектоскопии сварных швов используют в основном поперечные и продольные ультразвуковые волны. Данные о скорости и длине поперечных и продольных волн в некоторых веществах, использующихся или встречающихся при дефектоскопии сварных соединений, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость распространения и длина ультразвуковых волн в средах с различным акустическим сопротивлением

Вещество	Скорость ультразвука C , м/сек		Длина волны λ , мм, при частоте 2,5 Мгц		Плотность среды ρ , г/см ³	Удельное акустическое сопротивление среды $\rho C \cdot 10^5$, г/см ² ·сек	
	Продольная волна	Поперечная волна	Продольная волна	Поперечная волна		Продольная волна	Поперечная волна
Дюралюминий	6260	3080	2,5	1,23	2,7	1,7	0,83
Бериллий	12 500	8700	5,0	3,48	1,85	2,3	1,33
Вольфрам	5460	2870	2,17	1,15	19,1	10,4	5,50
Вода	1490	—	0,59	—	1,0	0,15	—
Воздух	330	—	0,13	—	0,0013	0,00004	—
Глицерин	1923	—	0,78	—	1,261	0,242	—
Кварцевое стекло	5570	3515	2,22	1,4	2,6	1,45	0,91
Магний	5790	3100	2,31	1,24	1,74	1,01	0,58
Масло трансформаторное	1425	—	0,57	—	0,9	0,128	—
Медь	4700	2260	1,89	0,91	8,9	4,18	2,05
Плексиглас	2670	1121	1,06	0,45	1,18	0,32	0,132
Полистирол	2350	1120	0,94	0,45	1,06	0,25	0,119
Сталь	5850	3260	2,36	1,3	7,8	4,55	2,52
Титан	6000	3500	2,4	1,4	4,5	2,7	1,58
Шлаковые включения (спекшийся сварочный флюс АН-348)	6000	—	2,4	—	3,3	2	—
Шлаковые включения (спекшийся флюс 48-АФ-1)	4000	—	1,6	—	2,5	1,0	—

1. ИНТЕНСИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА И ЗАТУХАНИЕ ЕГО В МЕТАЛЛАХ

Пространство, в котором распространяются ультразвуковые волны, называется ультразвуковым (акустическим) полем. Поле в жидкостях и газах можно описать с помощью смещения U частиц от положения равновесия, колебательной скорости v этих частиц и акустического давления P , создаваемого последними. В твердых телах акустическое поле, имеющее более сложный вид, описывается с помощью напряжений и деформаций [67].

Ультразвуковая волна в направлении своего движения несет определенную энергию, которую излучил источник. Количество энергии, переносимой волной за 1 сек через 1 см² площади, перпендикулярной к направлению распространения, называется интенсивностью ультразвука. Зная интенсивность ультразвука и поперечное сечение пучка, легко определить мощность ультразвуковой волны.

Интенсивность звука I в плоской волне пропорциональна квадрату амплитуды упругого смещения и квадрату частоты колебаний:

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho C U^2 = \frac{P^2}{2\rho C}, \quad (5)$$

где f — частота колебаний, гц; ρ — плотность среды, кг/м³; C — скорость распространения волны, м/сек; U — амплитуда смещения, м; P — амплитуда акустического давления, н/м².

Произведение скорости C ультразвука на плотность ρ среды, в которой он распространяется, называется удельным акустическим сопротивлением. Значения удельных сопротивлений, характеризующих акустические свойства вещества, приведены в табл. 1.

По мере распространения ультразвуковой волны интенсивность ее падает. Ослабление интенсивности сферической волны обуславливается ее расхождением и затуханием колебаний, а плоской — только затуханием.

Снижение интенсивности ультразвука вследствие его затухания происходит по экспоненциальному закону

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (6)$$

где I_x — интенсивность ультразвука на расстоянии r от места, где интенсивность равна I_0 , вт/м^2 ; δ — коэффициент

затухания, $1/\text{м}$. Чем больше коэффициент затухания, тем значительнее ослабление ультразвука, а следовательно, тем меньше глубина проникновения его.

Поскольку амплитуда волны пропорциональна корню квадратному из интенсивности, влияние затухания на амплитуду описывается формулой

$$U_x = U_0 e^{-\delta r}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что величина коэффициента затухания определяет длину пути волны $r = 1/\delta$, на котором амплитуда волны ослабляется в e раз ($e = 2,718$ — число Непера).

Очень часто нет необходимости измерять амплитуду U или интенсивность I волны в абсолютных единицах, а достаточно определить их величину относительно некоторого постоянного уровня, который обозначим через I_0 или U_0 . Тогда для выражения относительной величины $I/I_0 = U^2/U_0^2$ используются специальные единицы — децибелы. Число децибел

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{U}{U_0}.$$

На рис. 2 дана номограмма перевода относительных величин (амплитуд) в децибелы. Например, значению

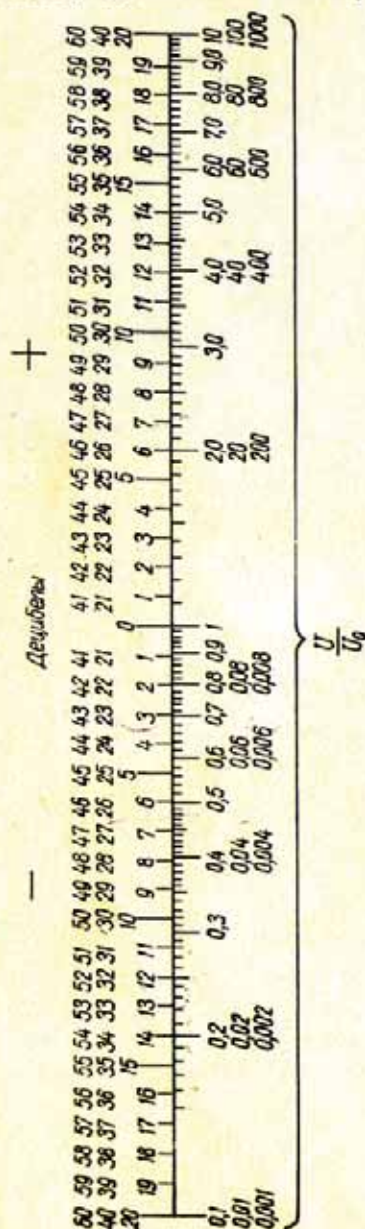


Рис. 2. Номограмма перевода относительных единиц в децибелы.

$U/U_0 = 2$ (нижняя шкала около оси) соответствует величина примерно $+6$ дБ (верхняя шкала около оси), а значению $U/U_0 = 0,004$ (крайняя нижняя шкала) — величина — 48 дБ (крайняя верхняя шкала).

При измерении амплитуд или интенсивностей в децибелах удобно применять другой способ учета влияния затухания на ослабление колебаний. Переходя в формуле (7) к децибелам, получаем:

$$N = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} = -20 \delta r \lg e = -8,69 \delta r = \delta_N r.$$

Величина $\delta_N = -8,69 \delta$ определяет коэффициент затухания в единицах отрицательный децибел на метр.

В твердых телах коэффициент затухания складывается из коэффициента поглощения δ_n и рассеяния δ_p :

$$\delta = \delta_n + \delta_p. \quad (8)$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направления распространяющейся волны в результате отражений от неоднородностей среды [67].

Поглощение поперечных волн меньше, чем продольных, так как они не связаны с адиабатическими изменениями объема, при которых появляются потери на теплопроводность. Потери на теплопроводность пропорциональны квадрату частоты. Однако при дефектоскопии свариваемых металлов затухание ультразвука в них определяется прежде всего рассеянием волны в поликристаллической структуре.

В кристаллах скорость звука имеет разное значение в зависимости от направления его распространения относительно осей симметрии кристалла. Это явление называют упругой анизотропией. В объеме металла кристаллы ориентированы самым различным образом, поэтому при переходе ультразвука из одного кристалла в другой скорость звука может изменяться в большей или меньшей степени. В результате возникает частичное отражение, преломление ультразвука и трансформация типов волн, что и определяет механизм рассеяния.

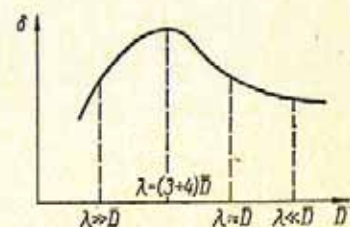


Рис. 3. Кривая зависимости затухания ультразвука от размеров кристаллов поликристаллических тел.

Очень большое влияние на величину коэффициента рассеяния в металлах оказывает соотношение средней величины зерен $\bar{D}$ и длины волны ультразвука λ (рис. 3). При $\lambda \ll \bar{D}$ звук поглощается в каждом зерне, как в одном большом кристалле, и затухание определяется в основном поглощением.

При $\lambda \approx \bar{D}$ рассеяние очень велико. Ультразвук как бы проникает, диффундирует между отдельными кристаллами подобно свету в мутной среде. Этот механизм называют

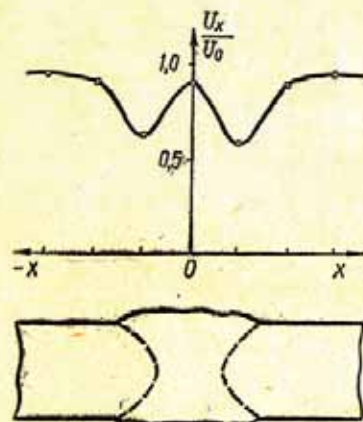


Рис. 4. Зависимость относительного ослабления амплитуды волны ультразвука частотой 2,5 МГц в различных зонах сварного шва из алюминиевого сплава АМг-6Т.

диффузным рассеянием. Особенно велико затухание при $\lambda \approx (3 \div 4) \bar{D}$. Здесь к диффузному рассеянию добавляется поглощение, связанное с релаксацией теплопроводности на анизотропных кристаллах. Возникающие на границах отдельных кристаллов в процессе их деформации градиенты температур не успевают выравниваться за период колебаний, что приводит к возрастанию тепловых потерь [67].

При $\lambda \gg \bar{D}$ происходит рассеяние волны мелкими частицами, при котором коэффициент затухания пропорционален f^4 (рэлеевское рассеяние).

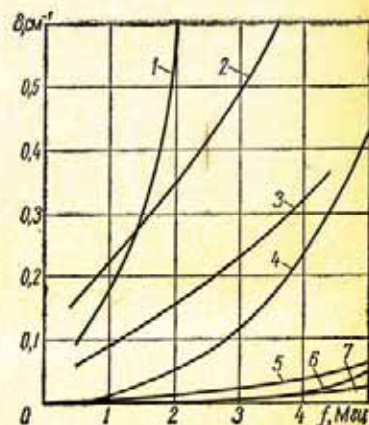


Рис. 5. Кривые зависимости коэффициента затухания δ от частоты ультразвука f [106]: 1 — резина; 2 — плексиглас; 3 — полистирол; 4, 5 — медь, $D = 0,06$ мм; 6 — сталь 15, $D = 0,05$ мм; 7 — сталь, $D = 0,025$ мм (1, 2, 3, 5, 6, 7 — продольные; 4 — поперечные волны).

Зависимость коэффициента затухания от величины зерна используют для измерения последней. При этом применяют диапазон длины волн от $\lambda = (3 \div 4) \bar{D}$ до $\lambda = (10 \div 15) \bar{D}$, так как при этом δ быстро изменяется в зависимости от диаметра зерна (пропорционально $\bar{D}^2$).

Для дефектоскопии обычно применяют более низкие частоты (0,5 — 10 МГц) так, чтобы λ была больше $(10 \div 15) \bar{D}$. В этом интервале ультразвук слабо затухает и, как правило, не возникают помехи, связанные с приемом сигналов, рассеянных на кристаллах.

Затухание ультразвука в контролируемом металле во многом определяет максимальную частоту колебаний, используемых при дефектоскопии. Значения коэффициента затухания обычно определяют экспериментальным путем (см. гл. VII).

Коэффициенты затухания изменяются также в зависимости от технологии сварки и режимов термообработки. Затухание, как правило, максимально в переходной зоне (зоне термического влияния) в области крупного зерна и возрастает с увеличением частоты ультразвука (рис. 4, 5). При некоторых частотах затухание может стать настолько большим, что ультразвуковые колебания полностью рассеются в основном металле и переходной зоне, не достигнув металла шва.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний при дефектоскопии металлов в основном используют электроакустические преобразователи в виде пластин из пьезоэлектрических материалов (кварца, титаната бария и др.). Если пьезоэлектрическую пластину сжимать или растягивать, то на ее поверхности возникают заряды. Знак зарядов определяется характером деформации (сжатием или растяжением), а величина — приложенной силой.

При воздействии на пластину механических колебаний между ее поверхностями возникает переменная электродвижущая сила. Это явление, называемое прямым пьезоэлектрическим эффектом, используют для регистрации (приема) ультразвуковых колебаний.

Пьезоэлектрический эффект обратим. Обратный пьезоэлектрический эффект проявляется в изменении размеров пластины при воздействии на нее электрического напряжения. Характер деформации определяется полярностью приложенного напряжения. Если напряжение переменное, то размеры пластины будут изменяться с частотой приложенного напряжения.

Таким образом, с помощью пьезоэлектрической пластины можно преобразовывать электрические колебания в ультразвуковые и, наоборот, ультразвуковые в электрические.

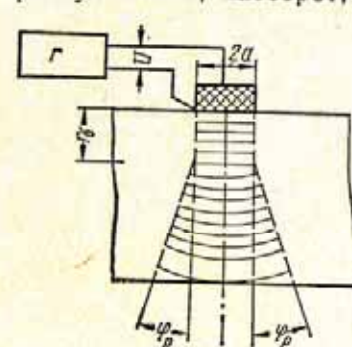


Рис. 6. Схематическое изображение поля дискового излучателя.

В последнее время в дефектоскопии начинают применять электромагнитоакустические преобразователи [124].

Если размеры преобразователя существенно больше длины волны излучаемого им ультразвука, то ультразвуковые колебания в однородных металлах будут распространяться в виде направленного пучка (рис. 6). Вблизи от излучателя на участке, называемом ближней зоной или зоной Френеля, ультразвуковая волна распространяется почти без расхождения

в стороны. В ближней зоне амплитуда поля как вдоль оси пучка, так и по его сечению претерпевает осцилляции.

В дальней зоне поля или зоне Фраунгера, расположенной за ближней зоной, начинается постепенное расхождение волн. Поле волны приобретает форму усеченного конуса, половина угла раствора которого (рис. 6)

$$\varphi_p \approx \arcsin 0,61 \frac{\lambda}{a} = \arcsin 0,61 \frac{C}{af}, \quad (9)$$

где λ — длина волны; a — радиус излучателя; C — скорость волны; f — частота колебаний.

Амплитуда сферической волны в дальней зоне уменьшается обратно пропорционально расстоянию r рассматриваемой точки от источника волны. Интенсивность волны при этом падает обратно пропорционально квадрату этого расстояния, что соответствует распространению энергии в конусе.

Протяженность r_6 ближней зоны

$$r_6 = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 f}{C}. \quad (10)$$

При частоте продольных колебаний $2,5 \text{ МГц}$ и диаметре излучателя 12 мм , широко применяемых в дефектоскопии, протяженность ближней зоны в стали составляет приблизительно 15 мм , а угол расхождения не превышает 14° ; при тех же условиях протяженность ближней зоны в плексигласе равна примерно 35 мм , а величина угла расхождения составляет 6° .

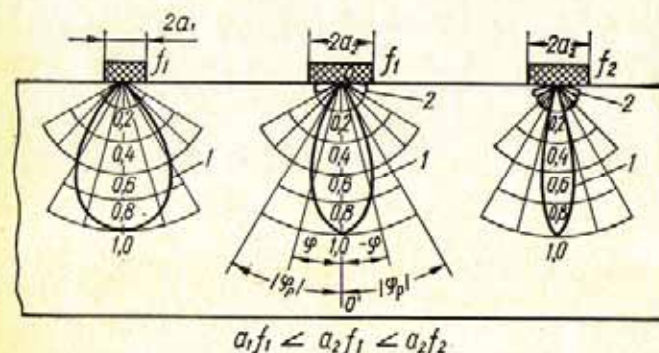


Рис. 7. Диаграммы направленности излучателя: 1 — основной лепесток; 2 — боковые лепестки

Как видно из выражения (9), направленность ультразвукового поля тем выше, чем больше произведение радиуса излучателя a на частоту f излучаемых им колебаний. Направленность полей в данной среде, создаваемых рядом излучателей, будет одинакова, если равны произведения радиуса излучателей на соответствующую частоту ультразвука:

$$a_1 f_1 = a_2 f_2 = a_3 f_3 = \dots = a_n f_n.$$

Таким образом, произведение af является важным параметром, обуславливающим направленность поля.

Направленность поля удобно представлять в виде графика в полярных координатах, называемого диаграммой направленности и характеризующего угловую зависимость амплитуды поля в дальней зоне (рис. 7). Полярный угол φ отсчитывается от полярной оси,

совмещаемой с направлением излучения, соответствующим максимальной амплитуде поля. Радиус-вектор $\Phi(\varphi)$ пропорционален отношению амплитуды волны $U(\varphi)$, излучаемой в направлении под углом φ , к максимальной амплитуде $U(0)$. Очевидно, что $\Phi(0) = 1$. Амплитуды поля $U(0)$ и $U(\varphi)$ должны быть измерены на одинаковом расстоянии от центра излучения O (начала координат).

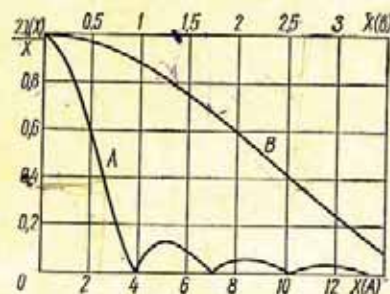


Рис. 8. Зависимость абсолютного значения $\frac{2J_1(x)}{x}$ от безразмерного аргумента x : А — общий ход функции; В — для малых значений аргумента.

ной из центра излучателя к точке наблюдения.

Графическое представление функции (11), по которому может быть рассчитана диаграмма направленности для различных соотношений $\frac{a}{\lambda}$, приведено на рис. 8.

Из анализа выражения (11) видно, что по мере увеличения соотношения $\frac{a}{\lambda}$ или произведения af увеличивается направленность поля (рис. 6). При $\frac{a}{\lambda} \geq 0,6$ в диаграмме, кроме основного лепестка, возникают боковые лепестки (рис. 7).

При соотношениях $\frac{a}{\lambda} > 1$, что имеет место при дефектоскопии металлов, выражение (11) с практически достаточной точностью справедливо и для продольных волн в твердых телах [67]. Поскольку основная часть излучаемой энергии сосредоточена в основном лепестке (до 80%), в дефектоскопии обычно ограничиваются рассмотрением, только основного лепестка диаграммы, угол раскрытия $2|\varphi_p|$ которого определяется выражением (9).

Диаграмма направленности поля продольной волны, создаваемого дисковым излучателем в жидкости, описывается выражением [81]

$$\Phi(\varphi) \approx \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \varphi}, \quad (11)$$

где J_1 — символ цилиндрической функции Бесселя первого порядка; φ — угол между акустической осью излучателя и линией, проведен-

Если преобразователь используется для приема ультразвуковых колебаний, он также имеет определенную направленность по чувствительности. Диаграммы направленности преобразователя в режиме излучения и приема совпадают.

При падении ультразвуковой волны на поверхность раздела двух сред в общем случае часть энергии проходит во вторую среду, а часть — отражается в первую.

Если ультразвуковая волна падает перпендикулярно к границе раздела двух сред, то проходящая и отраженная волны будут такого же типа, как и волна падающая. Распределение энергии между отраженной волной и прошедшей определяется соотношением удельных акустических сопротивлений сред.

Коэффициент отражения, т. е. отношение интенсивностей отраженной и падающей волн, при падении волны по нормали

$$R = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2, \quad (12)$$

где $\rho_1 C_1$ и $\rho_2 C_2$ — акустические сопротивления первой и второй сред.

Очевидно, при этом коэффициент прохождения волны $D = 1 - R$.

При равенстве акустических сопротивлений падающая по нормали ультразвуковая волна без потерь на отражение полностью переходит из одной среды в другую. Чем больше разница в акустических сопротивлениях, тем больше интенсивность отраженной волны. Коэффициенты отражения продольной волны на границе между металлом и некоторыми средами, заполняющими дефекты сварки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты отражения продольной волны при падении ее перпендикулярно границе раздела двух сред, %

Контролируемый металл	Воздух	Вода	Масло минеральное	Медь	Кварц	Шлак (спекшийся флюс АН-348)	Вольфрам	Шлак (спекшийся флюс 48-АФ-1)
Дюралюминий	100	72	74	18	0,6	—	70	>7
Сталь	100	88	89	0,18	28	>15	—	—

Приведенные значения коэффициентов отражения справедливы лишь при условии, что размеры несплошностей (дефектов) намного больше длины волны. Если же размеры несплошности в направлении, перпендикулярном ультразвуковому лучу, значительно меньше длины волны, то

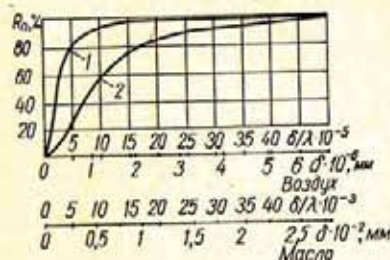


Рис. 9. Графики зависимости коэффициента отражения R_n ультразвука от тонкого слоя воздуха и масла в стали при различных соотношениях толщины δ слоя и длины λ волны в нем ($f = 2,5 \text{ МГц}$):
1 — воздух; 2 — масло

отражения при нормальном падении звуковой волны*

$$R_n = \frac{\left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} - \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}\right)^2}{4 \operatorname{ctg}^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda_2} + \left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}\right)^2}, \quad (13)$$

где δ — толщина слоя включения; λ_2 — длина волны в слое.

Из уравнения следует, что отражение от тонкого слоя зависит от отношения длины волны к толщине слоя и тем эффективнее, чем больше различие акустических сопротивлений слоя и окружающей среды. На рис. 9 приведены графики зависимости коэффициента отражения R_n от отношения толщины несплошности к длине волны в ней, рассчитанные по уравнениям (1) и (13). Из них следует, что трещина в стали, заполненная воздухом и имеющая раскрытие всего лишь в 1 мк, должна отражать 90% энергии падающих

* Поперечные размеры несплошности значительно больше длины волны.

на нее ультразвуковых колебаний частотой 2,5 МГц. Если же трещина заполнена минеральным маслом, то для отражения той же части энергии необходимо, чтобы раскрытие трещины было не менее 0,01 мм. Однако данные расчета не полностью подтверждаются экспериментально. Заметное уменьшение коэффициента отражения от слоя воздуха в стали начинается при $\delta \approx 10^{-4} \text{ мм}$ [67].

Когда толщина слоя достигает четверти длины волны, от него отражается практически столько же энергии, как и при бесконечной толщине слоя. Если раскрытие слоя еще больше, то отражающая способность уменьшается и при полуволновой толщине отражение будет очень слабым. Величина этого минимума зависит от затухания ультразвука в слое, а также от формы и длительности ультразвукового импульса. Например, полуволновой слой воздуха, расположенный между двумя металлическими поверхностями, будет отражать ультразвук так же хорошо, как и бесконечно толстый слой. Это объясняется тем, что большее затухание высокочастотных ультразвуковых колебаний в воздухе мешает возникновению интерференционных явлений, благодаря которым улучшается прохождение ультразвука через полуволновой слой.

Совершенно по-другому происходит отражение от слоя, акустическое сопротивление вещества которого $\rho_2 C_2$ лежит между акустическими сопротивлениями $\rho_1 C_1$ и $\rho_3 C_3$ протяженных сред, разделяемых этим слоем. В этом случае прохождение ультразвука из одной среды в другую будет всегда лучше, чем при отсутствии слоя. Максимум прохождения наступает, когда толщина слоя равна четверти длины волны, а акустическое сопротивление слоя

$$\rho_2 C_2 = \sqrt{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}.$$

Это явление используется для «просветления» границы раздела.

Переход ультразвуковых колебаний из одной среды в другую при падении их под углом к границе раздела сопровождается как отражением и преломлением, так и трансформацией (расщеплением) волны.

Так, если из одной твердой среды на границу с другой твердой средой падает под углом β продольная волна C_l (рис. 10, а), то в общем случае возникают еще четыре волны: две преломленные (продольная C_l и поперечная C_t) и две отраженные (продольная C_l и поперечная C_t).

Углы преломления и отражения волн связаны с углом падения выражением Снеллиуса

$$\frac{\sin \beta}{C_{t_1}} = \frac{\sin \beta_t}{C_{t_1}} = \frac{\sin \alpha_{t_2}}{C_{t_2}} = \frac{\sin \alpha}{C_{t_2}} = \frac{\sin \beta_l}{C_{t_1}}, \quad (14)$$

где C_{t_1} , C_{t_1} — скорости распространения продольной и поперечной волн в первой среде; C_{t_2} , C_{t_2} — скорости распространения продольной и поперечной волн во второй среде; α_{t_2} , α — углы преломления продольной и поперечной волн; β_l , β_t — углы отражения продольной и поперечной волн.

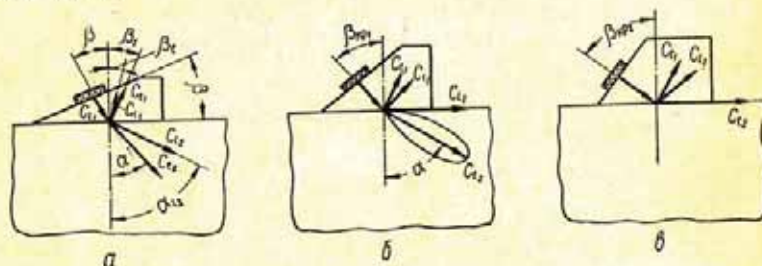


Рис. 10. Отражение и преломление продольной волны на границе раздела двух твердых сред.

Из выражения (14) следует, что $\beta_l = \beta_t$.

По мере увеличения угла падения β , начиная с некоторого значения β_{kp1} (рис. 10, б), называемого первым критическим углом, преломленная продольная волна не будет проникать во вторую среду ($\alpha_{t_2} = 90^\circ$)*.

При дальнейшем увеличении угла наступает момент (рис. 10, в), когда поперечная волна начинает скользить вдоль поверхности раздела ($\alpha_{t_2} = 90^\circ$); соответствующий угол β_{kp2} падения называется вторым критическим углом.

Значения критических углов удовлетворяют равенствам

$$\sin \beta_{kp1} = \frac{C_{t_1}}{C_{t_2}} \text{ и } \sin \beta_{kp2} = \frac{C_{t_1}}{C_{t_2}}.$$

При углах падения, меньших, чем второй критический угол, и больших, чем первый, во второй среде возникает лишь поперечная волна.

* Предполагается, что скорость распространения волны в первой среде меньше, чем во второй.

Для дефектоскопии особый интерес представляет переход продольной волны из твердой среды (плексигласа) в металл через тонкий слой жидкости. Если отношение толщины $d_{ж}$ слоя жидкости к длине волны $\lambda_{ж}$ ультразвука в нем

$$\frac{d_{ж}}{\lambda_{ж}} \ll \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1 + \frac{\rho_2 C_{t_2}}{\rho_1 C_{t_1}}}{\frac{\rho_2 C_{t_2}}{\rho_{ж} C_{ж}} + \frac{\rho_{ж} C_{ж}}{\rho_1 C_{t_1}}}, \quad (15)$$

то коэффициенты отражения продольной $R_{l,l}$ и поперечной $R_{l,t}$ волн, а также коэффициенты прохождения (прозрачности) продольной $D_{l,l}$ и поперечной $D_{l,t}$ волн определяют по следующим соотношениям [62]:

$$R_{l,l} = \frac{(-Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2)^2}{(Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2)^2}; \quad (16)$$

$$R_{l,t} = \frac{4Z_1 W_1}{(Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2)^2}; \quad (17)$$

$$D_{l,l} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2)^2}; \quad (18)$$

$$D_{l,t} = \frac{4Z_1 W_2}{(Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2)^2}. \quad (19)$$

где

$$Z_1 = \frac{\rho_1 C_{t_1}}{\cos \beta} \cos^2 2\beta_t;$$

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{t_2}}{\cos \alpha_{t_2}} \cos^2 2\alpha;$$

$$W_1 = \frac{\rho_1 C_{t_1}}{\cos \beta_t} \sin^2 2\beta_t;$$

$$W_2 = \frac{\rho_2 C_{t_2}}{\cos \alpha} \sin^2 2\alpha.$$

Необходимо отметить, что коэффициенты прозрачности по энергии равны произведению коэффициентов прозрачности по амплитуде любой колебательной величины в прямом и обратном направлениях.

Коэффициенты отражения и преломления по энергии для случая падения продольной волны из жидкости на твердое тело получаем из выражений (16)–(19), полагая в них $W_1 = 0$.

На рис. 11 приведены расчетные зависимости коэффициентов отражения и прозрачности границы органическое стекло — сталь от угла падения продольной волны. Данные зависимости справедливы для случая падения на границу раздела идеально плоской волны. В практике дефектоскопии, где имеют место расходящиеся пучки, действительные зависимости коэффициентов отражения и прозрачности границ от угла падения волны могут заметно отличаться от расчетных, особенно при углах падения, близких к критическим.

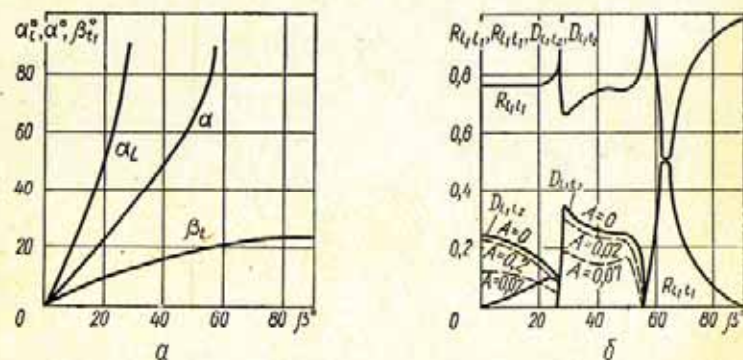


Рис. 11. Графики зависимости углов α_l , α , β_l (а) и коэффициентов отражения R_{l,l_1} и R_{l,l_2} и прозрачности D_{l,l_2} и D_{l,l_1} (по энергии) (б) при падении продольной волны под углом β на границу органическое стекло — слой масла — сталь (A — отношение толщины слоя трансформаторного масла к длине волны ультразвука в нем) [67].

На рис. 12 представлены экспериментальные кривые, характеризующие зависимость коэффициентов прозрачности для поперечной волны в стали и дюралюминии от угла падения продольной волны, излучаемой типовым источником.

При падении продольной волны под углом к поверхности листа в последнем может возникнуть пластинчатая волна. Чтобы возбудить в листе данной толщины δ пластинчатую волну определенной моды при частоте колебаний f , следует направить на лист продольную волну под углом

$$\beta = \arcsin \frac{C_{l_1}}{C_n},$$

где C_l — скорость распространения продольной волны в материале, граничащем с листом; C_n — скорость распространения пластинчатой волны заданной моды, определяемая в зависимости от величины δf по графикам, подобным приведенным на рис. 1.

На рис. 1 показаны углы падения продольной волны из воды, полистирола и плексигласа на стальной лист для возбуждения в нем нормальной волны соответствующей моды.

Трансформация упругой волны, наблюдаемая при отражении ее от границы металл — воздух, в частности, от внутренних дефектов или от поверхности изделия, иллюстрируется рис. 13, на котором приведены кривые зависимости амплитуды продольной и поперечной волн в стали, отраженных от поверхности, граничащей с воздухом. Из графиков следует, что при угле падения поперечной волны, равном $\approx 30^\circ$, около 90% энергии отражается в виде продольной волны и лишь 10% — в виде поперечной волны.

При углах падения $\beta \geq 34^\circ$ отражается только поперечная волна. Наименьший угол падения поперечной волны, при котором еще отсутствует отраженная продольная волна, называется третьим критическим углом и определяется соотношением

$$\beta_{кр_3} = \arcsin \frac{C_l}{C_t}. \quad (20)$$

Значение угла $\beta_{кр_3}$ соответствует минимальному значению угла ввода поперечной волны, при котором еще не возбуждается продольная волна.

Естественно, что изложенные выше соотношения справедливы для отражения ультразвуковых волн от зеркальных поверхностей. К зеркальным поверхностям можно отнести поверхности, у которых высота неровностей во

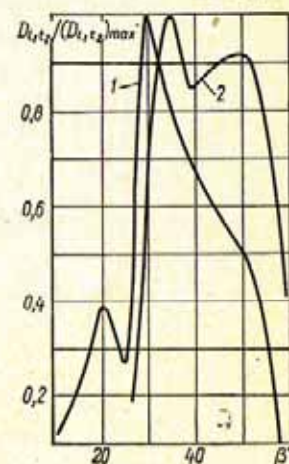


Рис. 12. Экспериментальные зависимости коэффициентов прозрачности по энергии для поперечной волны в стали 1 и дюралюминии 2 от угла падения β продольной волны в плексигласе ($a = 6$ мм, $f = 2,5$ МГц).

много раз меньше длины волны. Если поверхность раздела двух сред имеет неровности, размеры которых соизмеримы с длиной ультразвуковой волны, наблюдается диффузное отражение, при котором лучи рассеиваются в разные стороны под различными углами. Этим объясняется меньшая

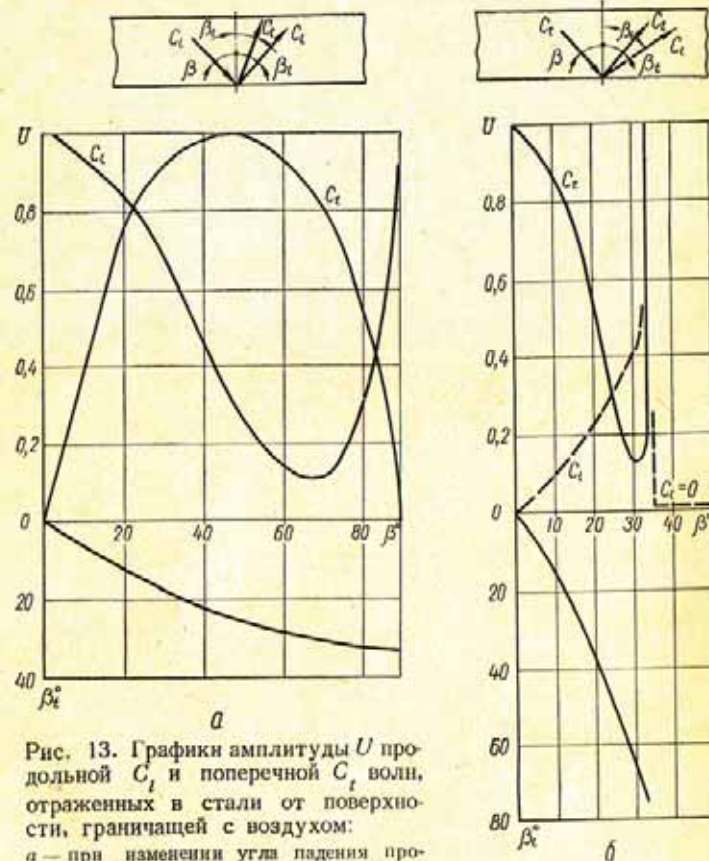


Рис. 13. Графики амплитуды U продольной C_l и поперечной C_t волн, отраженных в стали от поверхности, граничащей с воздухом: а — при изменении угла падения продольной волны C_l ; б — при изменении угла падения поперечной волны C_t .

амплитуда эхо-сигнала от неровной поверхности, чем эхо-сигнала от зеркальной при падении ультразвуковой волны перпендикулярно к границе раздела (рис. 14).

В то же время при падении ультразвукового луча под некоторым углом к границе раздела энергия волны, отра-

женной в направлении к излучателю, будет тем больше, чем значительнее неровности отражающей поверхности (рис. 14).

Большинство несплошностей, встречающихся в сварных соединениях (непровары, трещины, окисные пленки), имеют поверхности, вызывающие диффузное отражение распространяющихся в металле ультразвуковых волн, применяемых при дефектоскопии.

Таким образом, прозвучивая сварное соединение и исследуя процесс распространения ультразвуковых волн в нем, можно обнаружить внутренние дефекты.

Для удобства прозвучивания, а также во избежание механических повреждений и износа пьезоэлектрической пластины последнюю помещают в специальное устройство, называемое искателем. Искатели, предназначенные для ввода волны в направлении, перпендикулярном к поверхности контролируемого изделия, принято называть прямыми (или нормальными), а для ввода волны под некоторым углом — наклонными (или призматическими). В искателях, применяемых на практике, пьезоэлектрический преобразователь излучает продольную волну. Поэтому при установке прямого искателя на поверхность любой среды в последней будет распространяться продольная волна. При использовании наклонного искателя, в отличие от прямого, продольная волна будет распространяться только в жидкой среде или в твердой, аналогичной по акустическим свойствам материалу призмы. В любой другой твердой среде (в общем случае) будут возбуждены одновременно продольная и поперечная (в полубезграничной среде) или нормальная (в пластине) волны. Обычно угол падения волны β в наклонном искателе выбирают таким, чтобы в контролируемом изделии распространялась только поперечная волна ($\beta_{кр1} < \beta < \beta_{кр2}$).

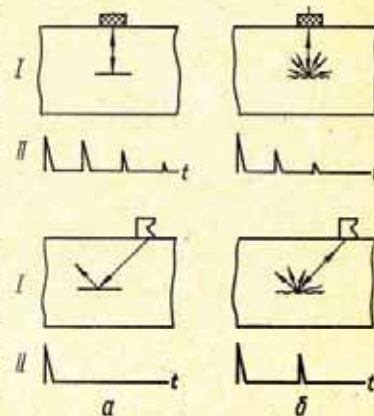


Рис. 14. Отражение при нормальном и наклонном падении волны на отражающую поверхность: а — зеркальное; б — диффузное; I — схемы распространения ультразвукового пучка; II — распределение во времени t ультразвуковых импульсов на преобразователе.

Ультразвуковые волны в зависимости от режима работы генератора электрического переменного напряжения можно излучать в контролируемое изделие непрерывно (рис. 15, а) или в виде высокочастотных импульсов заданной длительности τ (рис. 15, б, в). Длительность импульсов τ обычно отсчитывают на уровне 0,1 от максимальной величины.

Импульсы ультразвуковых колебаний, излучаемые в контролируемое изделие, принято называть зондирующими.

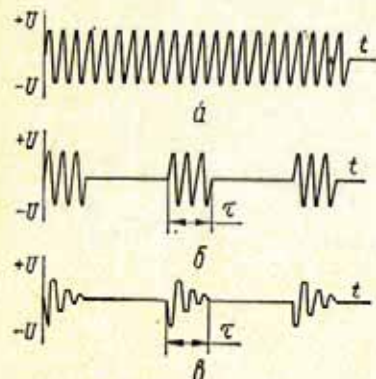


Рис. 15. Излучение:

а — непрерывное; б — в виде импульсов прямоугольной формы; в — в виде импульсов экспоненциальной формы.

Ультразвуковая волна не может быть введена в контролируемое изделие, если между ним и искателем имеется прослойка воздуха, т. е. если отсутствует акустический контакт. Акустический контакт обычно обеспечивают путем заполнения контактирующей средой пространства между плоскостью изделия (контактной поверхностью).

Различают два основных способа обеспечения акустического контакта: контактный и иммерсионный.

При иммерсионном методе в отличие от контактного толщина слоя $d_{ж}$ контактирующей среды больше половины длины волнового пакета ультразвукового импульса [163]:

$$d_{ж} \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{ж} \tau}{\cos \alpha_{ж}}, \quad (21)$$

где $C_{ж}$ и $\alpha_{ж}$ — скорость распространения и угол преломления продольной волны в контактирующей среде соответственно.

При иммерсионном способе практически исключается влияние толщины слоя контактирующей среды на амплитуду вводимой в изделие волны.

В качестве контактирующей среды используют минеральные масла, солидол, технический глицерин, воду, спирт и т. п.

При наличии акустического контакта искателя с изделием волна, введенная в изделие в виде зондирующих импульсов ультразвуковых колебаний, дойдя до внутренних несплошностей или до поверхностей, будет отражаться от последних под углом, равным углу падения волны на отражающую поверхность (рис. 16). Распространение ультразвуковой волны или ее многократных отражений между двумя поверхностями в изделии будут продолжаться до

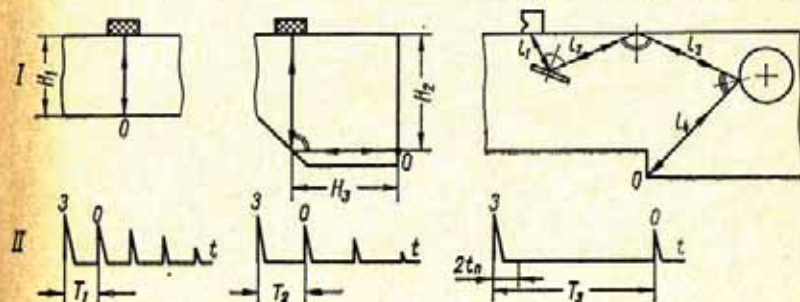


Рис. 16. Отражение ультразвуковой волны при распространении ее в контролируемом изделии:

I — схемы распространения ультразвукового луча; II — распределение во времени ультразвуковых импульсов на искателе (З — зондирующий импульс; О — эхо-импульс, отраженный от точки О).

полного затухания колебаний. Часть ультразвуковой энергии после отражения может вернуться на искатель в виде эхо-импульсов. Интервал времени T между зондирующим импульсом и эхо-импульсом, называемым также эхосигналом, определяется длиной пути r ультразвукового импульса в изделии:

для прямого искателя

$$T = \frac{2r}{C_{l_2}}; \quad (22)$$

для наклонного —

$$T = \frac{2r}{C_{l_2}} + 2t_n, \quad (23)$$

где C_{l_2} и C_{t_2} — скорость продольной и поперечной волн; r — путь, проходимый волной в материале от преобразователя до отражающей поверхности; t_n — время прохождения ультразвуковой волны через преломляющую призму искателя в одном направлении.

Для случаев, показанных на рис. 16,

$$T_2 = \frac{2(H_2 + H_3)}{C_{l_2}};$$

$$T_3 = \frac{2(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)}{C_{l_2}} + 2t_n.$$

3. МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Методы ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений основаны на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний в металле шва. При отсутствии несплошностей ультразвуковые колебания правильно выбранной частоты прямолинейно распространяются в наплавленном металле в виде расходящегося пучка.

На пути распространения колебаний в сварных швах могут встретиться дефекты в виде трещин, непроваров, газовых пор, шлака, силикатных, вольфрамовых и других скоплений. Из табл. 2 видно, что перечисленные дефекты в сварных соединениях из стали и дюралюминия вызывают значительное отражение ультразвуковой волны, нарушая тем самым нормальный процесс ее распространения. Таким образом, искажение процесса распространения ультразвуковых колебаний свидетельствует о наличии в шве внутренних дефектов.

Для анализа процесса прохождения ультразвуковых колебаний в контролируемых изделиях и соединениях применяют различные методы [160], которые отличаются друг от друга по признакам обнаружения дефекта.

При дефектоскопии сварных соединений используют три основных метода: теневой, зеркально-теновой и эхо-метод.

При теневом методе признаком обнаружения дефекта является уменьшение интенсивности (амплитуды) ультразвуковой волны, прошедшей через изделие от излучающего излучателя *И* к приемному *П* (рис. 17, а). Искатели располагаются на противоположных поверхностях изделия. Поэтому этот метод используют только при наличии двухстороннего доступа к изделию.

При зеркально-теновом методе признаком обнаружения дефекта является уменьшение интенсивности (амплитуды) отраженной от противоположной поверхности изделия ультразвуковой волны, излучаемой излучателем *И* и принимаемой излучателем *П* (рис. 17, б). Противоположную поверхность, зеркально отражающую ультразвук, называют донной поверхностью, а отраженный от нее импульс — донным импульсом.

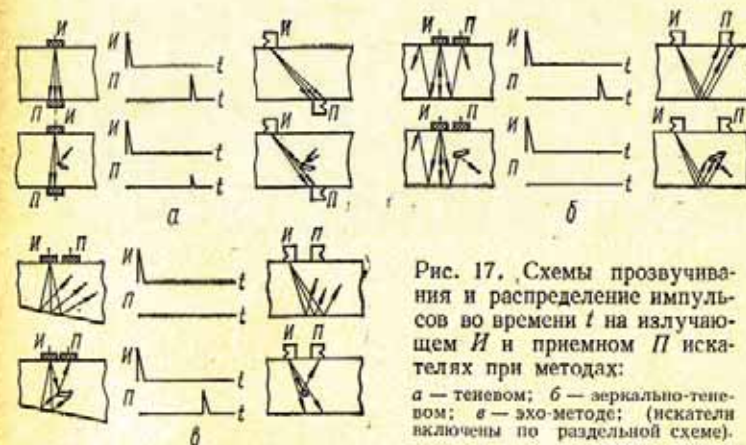


Рис. 17. Схемы прозвучивания и распределение импульсов во времени *t* на излучающем *И* и приемном *П* искателях при методах: а — теневом; б — зеркально-теновом; в — эхо-методе; (искатели включены по раздельной схеме).

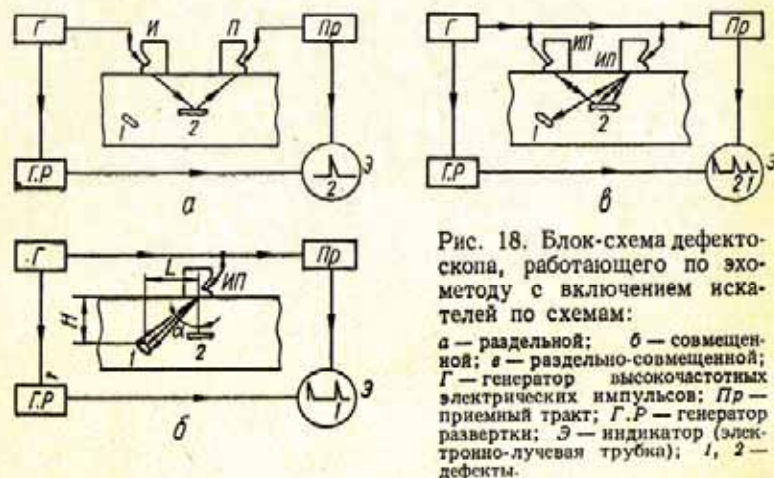
При эхо-методе признаком обнаружения дефекта является прием излучателем импульса, отраженного от самого дефекта (рис. 17, в).

Если о наличии дефекта судят как по появлению эхо-импульса от дефекта, так и по уменьшению донного импульса, то это значит, что контроль ведут одновременно по двум методам: эхо-методу и зеркально-теновому. Такое сочетание при контроле сварных соединений для краткости называют эхо-теновым методом.

При рассмотрении методов в каждом случае использовали два излучателя, один из которых выполнял функции излучения *И*, а другой — приема *П*. Такая схема включения излучателей называется раздельной. В то же время при импульсном излучении для зеркально-тенового и эхо-методов можно применять один излучатель *ИП*, включенный по совмещенной схеме, при которой один и тот же излучатель выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхо-импульсов.

Элементарные блок-схемы импульсных дефектоскопов, работающих по эхо-методу, с включением искателей по отдельной и совмещенной схемам, приведены на рис. 18, а, б.

В ряде случаев искатели включают по раздельно-совмещенной схеме, сочетающей в себе преимущества раздельной и совмещенной схем (рис. 18, в).

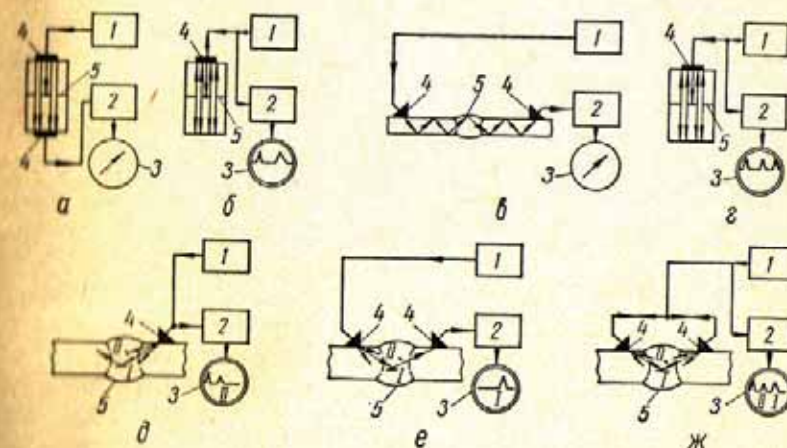


При раздельно-совмещенной схеме два искателя включены параллельно, благодаря чему каждый искатель в отдельности выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема их отражений, а также отражений зондирующих импульсов, излучаемых вторым искателем.

При совмещенной и раздельно-совмещенной схемах на вход приемного тракта, кроме эхо-сигналов от выявляемых дефектов поступает зондирующий импульс. Если дефект расположен в зоне под поверхностью так, что эхо-сигнал от него возвращается ранее, чем окончилось излучение зондирующего импульса, то дефект не будет обнаружен. Зону под поверхностью, на которой установлен искатель и дефекты в которой не могут быть выявлены эхо-методом, называют мертвой зоной.

Классификация используемых в настоящее время методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений в зависимости от характера излучения и схемы включения искателей рассмотрена в работе [23]. Принципиальные схемы этих методов приведены на рис. 19.

Как показывают исследования, теневой и зеркально-теневой методы ультразвуковой дефектоскопии довольно сложны для использования их в производственных условиях при контроле качества сварки. Показания и чувствительность этих методов зависят от ряда факторов: качества акустического контакта искателя с контролируемым объектом; взаимного расположения искателей; формы поверхности прозвучиваемой части шва.



Более совершенным является эхо-метод, основанный на прозвучивании металла шва импульсами ультразвуковых колебаний и регистрации отражений этих импульсов от дефектов. Большинство сварных соединений удобнее всего прозвучивать с помощью искателя, служащего как для

излучения, так и для приема ультразвуковых импульсов. При использовании призматического искателя, включенного по совмещенной схеме, отраженные от противоположной плоской поверхности металла колебания, как правило, уходят в сторону от искателя. Однако при наличии грубых неровностей на поверхности часть отраженных от них колебаний может вернуться обратно к искателю, вызвав возникновение эхо-импульсов, аналогичных эхо-импульсам от дефектов. Очевидно, что появление эхо-импульсов

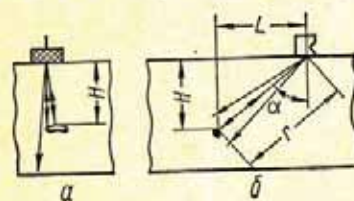


Рис. 20. Определение координат залегания дефекта при прозвучивании искателями: а — прямым; б — призматическим.

от поверхности может привести к ложному представлению о наличии внутренних дефектов, в действительности отсутствующих в контролируемом шве. Отличить ложные эхо-импульсы от импульсов, обусловленных наличием внутренних дефектов, можно путем определения координат отражающей поверхности. В результате исследований установлено [32], что наиболее удобным и надежным для контроля швов является эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии, при котором качество шва оценивают не только по появлению отраженного импульса, но и по расположению поверхности, вызвавшей это отражение. В связи с этим измерение координат отражающей поверхности является одной из основных операций при ультразвуковом контроле сварных соединений многих видов.

Очевидно, что при контроле изделий прямым искателем измеряют лишь глубину H расположения отражающей поверхности (рис. 20, а):

$$H = \frac{C_t t}{2}, \quad (24)$$

где C_t — скорость распространения продольной волны в контролируемом материале; t — время прохождения ультразвукового импульса от поверхности, на которой установлен искатель, до дефекта и обратно.

Определение координат залегания отражающей поверхности (глубины H и расстояния L от центра излучения искателя) при прозвучивании призматическим искателем

основывается на измерении длины пути r , проходимого импульсом в металле, и последующем пересчете этой величины в координаты H и L по известному углу ввода луча α (рис. 20, б).

Координаты залегания отражающей поверхности определяют по уравнениям

$$H = r \cos \alpha = \frac{C_t t}{2} \cos \alpha = \frac{C_t (T - 2t_n)}{2} \cos \alpha; \quad (25)$$

$$L = r \sin \alpha = \frac{C_t t}{2} \sin \alpha = \frac{C_t (T - 2t_n)}{2} \sin \alpha, \quad (26)$$

где C_t — скорость распространения поперечных ультразвуковых волн в исследуемом металле; α — угол ввода луча в металл; T — интервал времени между моментом излучения зондирующего и моментом приема отраженного импульсов.

Интервал T складывается из времени прохождения импульса в призме искателя $2t_n$ и в металле $t = T - 2t_n$. Из приведенных соотношений видно, что при известных величинах C_t , t_n и α определение координат залегания

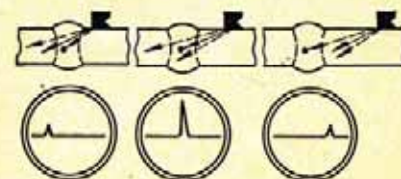


Рис. 21. Зависимость амплитуды эхо-сигнала, отраженного дефектом, от положения искателя.

дефекта при работе призматическими искателями, как и при использовании прямых искателей, сводится к измерению интервала времени T между моментом излучения зондирующего и моментом приема отраженного импульсов.

Для измерения интервала времени в современных дефектоскопах предусмотрены специальные г л у б и н о м е р ы.

Очевидно, что на шкале глубиномера могут быть нанесены и значения координат дефекта H и L для искателей с различными углами ввода луча. В этом случае отсчет координат H и L по шкалам глубиномера должен производиться в положении искателя, при котором отражающая поверхность (дефект) озвучивается под углом ввода. Это положение искателя соответствует максимальной величине отраженного импульса (рис. 21).

Дефектоскопы НИИ мостов ЛИИЖТ (УЗД-НИИМ-2, УЗД-НИИМ-3, УЗД-НИИМ-5) снабжены электронным глубиномером, позволяющим непосредственно определять

координаты H и L дефекта в стали и дюралюминии при контроле прямым и призматическими искателями с углами призмы 30, 40 и 50°.

В дефектоскопах ДУК-66П (ВНИИНК) предусмотрены сменные шкалы для искателей 0,40 и 50°.

Глубиномер дефектоскопа УДЦ-10 (ЦНИИТмаш) проградуирован для прямого искателя и призматического с углом призмы 40°.

В дефектоскопах УДМ-1М и УДМ-3 требуется перестройка глубиномера при переходе с одного типа искателя на другой.

Дефектоскоп УЗД-7Н, а также большинство дефектоскопов иностранных фирм позволяют лишь отсчитывать время прохождения ультразвукового импульса от пьезоэлектрической пластины до отражающей поверхности и обратно. При эксплуатации подобных дефектоскопов в сочетании с призматическими искателями для определения координат отражающей поверхности удобно пользоваться координатной линейкой. Принцип построения и конструкция координатных линеек рассмотрены в гл. III.

Глава II

ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА

Важнейшими узлами ультразвукового дефектоскопа являются искатели, предназначенные для излучения и приема ультразвука. Для преобразования электрических колебаний в акустические и обратно в современных дефектоскопах используется пьезоэлектрический эффект. Исключение составляют приборы, основанные на возбуждении в изделии вихревых токов, которые взаимодействуют с постоянным магнитным полем, в результате чего возникают механические колебания [124].

Современные ультразвуковые дефектоскопы комплектуются большим количеством искателей различных типов. С точки зрения особенностей процессов излучения и приема ультразвука все искатели могут быть разделены на четыре основные группы (рис. 22):

1. Нормальный (или прямой) контактный искатель (рис. 22, а), в котором пьезопреобразователь контактирует с изделием непосредственно или через тонкие промежуточные слои и излучает ультразвук перпендикулярно к поверхности изделия. На рис. 22, а искатель показан схематически. В действительности пьезопластина искателя обычно защищается от повреждения тонким слоем из какого-либо звукопроводящего материала — протектором. С обратной стороны к пьезопластине присоединяется демпфер, служащий для корректировки режимов излучения и приема. Более подробно конструкция нормального искателя рассмотрена в § 2.

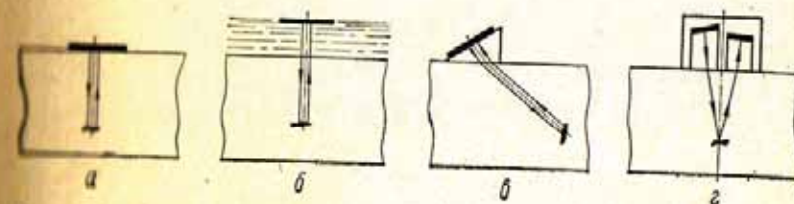


Рис. 22. Основные типы искателей импульсного ультразвукового дефектоскопа:

а — нормальный; б — нормальный с акустической задержкой (иммерсионный); в — наклонный; г — раздельно-совмещенный.

Нормальным искателем излучаются и принимаются продольные волны. В случае применения специальных срезов кристаллов, приклеиваемых к поверхности изделия, могут возбуждаться поперечные волны.

2. Нормальный искатель с акустической задержкой (рис. 22, б), в котором пьезоэлемент отделен от изделия толстым плоскопараллельным слоем звукопроводящего вещества — задержкой. Слой будем называть толстым или протяженным, если время пробега в нем ультразвука больше длительности ультразвукового импульса.

Часто роль задержки выполняет слой жидкости, например воды. Такой способ контроля, как указывалось выше, называют иммерсионным. Он обеспечивает высокую стабильность излучения и приема звука, даже если изделие имеет грубую неровную поверхность. Для контроля иммерсионным способом изделие погружают в резервуар с жидкостью, создают локальные ванны, обеспечивающие жидкостный акустический контакт для части поверхности изделия, или используют контакт через струю воды.

3. Наклонный искатель (рис. 22, в), в котором между пьезопреобразователем и изделием имеется призма из звукопроводящего материала. При контроле иммерсионным способом для образования жидкостной призмы достаточно наклонить ось искателя по отношению к поверхности изделия. При контроле контактным способом призму изготовляют из материала, скорость звука в котором значительно меньше, чем в изделии, например из плексигласа. Такие искатели называют призматическими. Для контроля сварных швов, как правило, применяют именно такие наклонные призматические искатели. Угол наклона призмы (угол падения луча) β обычно больше первого критического, чтобы в изделии распространялась только одна поперечная волна. Существуют, однако, искатели с небольшим углом наклона призмы, при котором в изделии возбуждаются в основном продольные волны, а поперечные имеют очень малую интенсивность. Разработаны также конструкции призматических искателей с переменным углом β .

4. Раздельно-совмещенный (РС) искатель (рис. 22, г). В отличие от всех рассмотренных искателей в нем для излучения и приема ультразвука используются разные пьезопластины. РС искатель состоит из двух наклонных искателей с малым углом β , объединенных в одном корпусе. Преимуществом такого искателя является малая мертвая зона (1—2 мм вместо 5—10 мм для нормального искателя).

По раздельной схеме (один искатель работает как излучатель, а другой — как приемник) могут быть включены два любых искателя, рассмотренных типов.

Выше были рассмотрены два способа акустической связи искателя с изделием: контактный и иммерсионный. Иногда выделяют как самостоятельный вариант контактного способа — способ щелевой или менисковый. В этом случае, как при контроле контактным способом, между искателем и изделием имеется тонкий слой жидкости. Однако минимальная толщина этого слоя задается специальным ограничителем, создающим между искателем и изделием зазор заданной величины. В связи с тем, что толщина жидкостного слоя соизмерима с длиной волны, расчет колебательной системы ведется так же, как при контактном способе контроля. В конструкции искателя предусматривается устройство для автоматической подачи жидкости (воды или масла) в этот зазор. Расход жидкости обычно невелик благодаря действию сил поверхностного натяжения.

Щелевой способ акустической связи может быть использован вместо контактного при контроле любым из рассмотренных выше искателей. Стабильность акустической связи при этом выше, чем при контроле контактным, но ниже, чем при контроле иммерсионным способом.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области разработки искателей и аппаратуры для бесконтактного ультразвукового контроля. При бесконтактном способе контроля для возбуждения и приема ультразвуковых волн используются подеромоторные силы взаимодействия вихревых токов, возбуждаемых в изделии, с магнитным полем. Обычно бесконтактный преобразователь имеет постоянный магнит и катушку индуктивности, в которой возбуждается переменный ток. Под действием этого тока в металле изделия индуцируются вихревые токи, а вокруг них — магнитные поля. Эти поля взаимодействуют с постоянным полем магнита, который располагается у изделия. В результате возникают переменные силы, действующие на частицы металла, и возбуждаются ультразвуковые волны с частотой, равной частоте тока в катушке.

Эффект приема ультразвуковых волн основан на возбуждении вихревых токов в изделии в результате перемещения частиц металла в поле постоянного магнита. Эти вихревые токи индуцируют ток той же частоты в катушке преобразователя [124].

1. ЭЛЕКТРО-АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

В электро-акустическом тракте дефектоскопа происходит преобразование электрического сигнала в акустический и обратно. В электро-акустический тракт входит пьезопреобразователь, примыкающие к нему тонкие слои и электрические колебательные контуры генератора и приемника дефектоскопа.

В качестве преобразователя чаще всего используют цирконат-титанат свинца (ЦТС), обладающий весьма высоким пьезоэффектом (табл. 3). Физические свойства ЦТС могут значительно меняться. Даже в пределах одной пластины имеются области с высокой и низкой чувствительностью. Титанат бария по сравнению с ЦТС обладает более низкой чувствительностью, меньшей стабильностью пьезосвойств и низкой рабочей температурой. Единственным

преимуществом титаната бария является более высокая скорость звука. Это позволяет несколько увеличить толщину пьезопластин (обычно они делаются полуволновыми), что существенно при работе на высоких частотах.

Таблица 3

Характеристики пьезоэлектрических материалов

Материал	Тип среза	Скорость звука C , 10^3 м/сек	Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	Акустическое сопротивление $Z = \rho C$, 10^6 кг/м ² ·сек	Диэлектрическая постоянная ϵ	Пьезоэлектрическая постоянная e , кулон/м ²	Допустимое механическое напряжение σ , 10^7 н/м ²	Допустимая температура t° , °C	Добротность в воздухе Q
Кварц	X	5,74	2,65	15,2	4,5	0,175	950	570	$5 \cdot 10^4$
	Y	3,90	2,65	10,4	4,5	0,175	950	570	$5 \cdot 10^4$
Турмалин	Z	7,15	3,10	22,2	7,5	0,32	—	—	—
Сульфат лития	Y	5,46	2,06	11,2	10,3	0,9	150	75	10^3
Сегнетова соль	L	3,08	1,77	5,46	70	1,8	140	45	10^3
Титанат бария	Вдоль направления поляризации	5,6	5,4	30,2	1200	14	750	110	400
Цирконат-титанат свинца	То же	5	7,3	36,5	1500	18	600	330	400
Метаниобат свинца	» »	2,76	5,8	16	255	4,83	—	550	11

Преимуществами кварца являются высокая стабильность пьезоэлектрических свойств и способность работать при высоких температурах. В зависимости от направления среза по отношению к осям кристалла пластина кварца по-разному деформируется в электрическом поле. В дефектоскопии применяется пластина X-среза, испытывающая расширение и

сжатие по толщине, и Y-среза, испытывающая деформацию сдвига, что позволяет получать поперечные волны.

На рис. 23 показана общая схема электро-акустического тракта дефектоскопа. Пьезопреобразователь 2 нагружен с одной стороны на изделие 4 (т. е. излучает в него ультразвук), а с другой — на демпфер 1. В иммерсионных и наклонных искателях акустической нагрузкой является иммерсионная жидкость или призма искателя, т. е. ближайшая к искателю протяженная среда. Часто акустический контакт пьезопреобразователя со средой осуществляется не непосредственно, а через промежуточные тонкие слои: протектор, масло, слой клея и т. д. На рис. 23 показан один промежуточный слой 3.

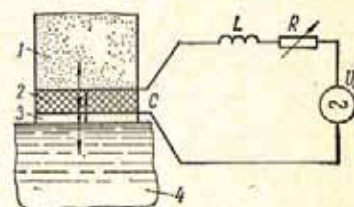


Рис. 23. Схема электроакустического тракта дефектоскопа.

Пьезопреобразователь электрически связан с генератором U_0 и колебательным контуром. На данной схеме показан случай последовательного соединения пьезопреобразователя, генератора и контура. В контур входит сопротивление R и индуктивность L ; емкостью контура C служит сам пьезопреобразователь. Когда искатель работает в режиме приема, используется тот же колебательный контур, но генератор U_0 замыкается накоротко.

При расчете электро-акустического тракта ставится задача достижения оптимального сочетания трех основных характеристик: чувствительности, полосы пропускания и стабильности акустического контакта.

Чувствительность при излучении ν определяется как отношение максимальных амплитуд излученного акустического сигнала P_0 и электрического сигнала генератора U_0 :

$$\nu = \frac{P_0}{U_0}. \quad (27)$$

Чувствительность при приеме ν' — отношение максимальных амплитуд электрического сигнала на входе усилителя дефектоскопа U' и акустического сигнала падающей на искатель волны P' :

$$\nu' = \frac{U'}{P'}. \quad (28)$$

Произведение $\nu\nu'$ определяет общую чувствительность искателя:

$$\nu\nu' = \frac{P_0 U'}{P' U_0} \quad (29)$$

Чувствительность искателя используется при вычислении общего ослабления ультразвука в электро-акустическом и акустическом трактах дефектоскопа:

$$U' = U_0 \nu\nu' \varphi, \quad (30)$$

где $\varphi = \frac{P'}{P_0}$ — ослабление звука в акустическом тракте.

Полоса пропускания искателя определяется кривой зависимости чувствительности от частоты. Приближенно ее можно характеризовать величиной, принятой в радиотехнике,

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}, \quad (31)$$

где f_0 — резонансная частота, в данном случае собственная частота пьезоэлектрической ненагруженной пластины; f_1 и f_2 — частоты (меньше и больше f_0), на которых чувствительность уменьшается до 0,7 от максимальной.

Чем шире полоса пропускания искателя, тем меньшее искажение претерпевают импульсы в процессе преобразования электрических колебаний в акустические и обратно. Для достижения максимальной разрешающей способности и минимальной мертвой зоны стремятся формировать возможно короткие импульсы. Если ширина полосы пропускания недостаточна, импульсы растянутся, что приведет к ухудшению разрешающей способности и увеличению мертвой зоны. Минимально допустимое значение $\frac{\Delta f}{f_0}$ равно 0,2, однако для повышения разрешающей способности желательно увеличение $\frac{\Delta f}{f_0}$ до 0,4—0,5.

Стабильность акустического контакта необходимо учитывать только при расчете режима колебаний пьезопреобразователя нормального искателя. В других типах искателей, показанных на рис. 22, между искателем и изделием расположена протяженная среда, поэтому улучшение или ухудшение передачи ультразвука из этой среды в изделие не отражается на колебательном режиме пьезопластины. Для нормального искателя, наоборот, изделие является частью нагрузки, а толщина слоя контактной жидкости определяет силу связи с этой нагрузкой. Чтобы обеспечить стабильность акусти-

ческого контакта, нужно свести к минимуму влияние толщины слоя контактной жидкости на режим колебаний пьезопластины.

На рис. 24 и 25 приведены результаты расчетов некоторых вариантов работы пьезопреобразователей, наиболее

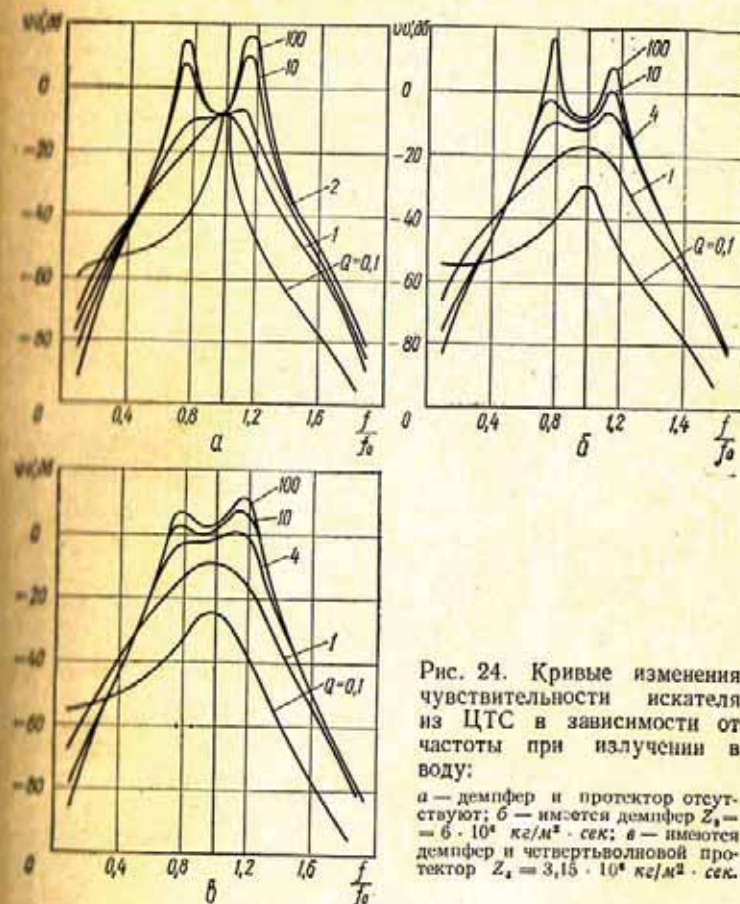


Рис. 24. Кривые изменения чувствительности искателя из ЦТС в зависимости от частоты при излучении в воду:

а — демпфер и протектор отсутствуют; б — имеется демпфер $Z_2 = 6 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$; в — имеются демпфер и четвертьволновой протектор $Z_2 = 3,15 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$.

важных для контроля сварных соединений: излучение ультразвука пластиной ЦТС в воду и плексиглас при наличии демпфера и промежуточного слоя и без них. Потери энергии на затухание в пьезоматериале и протекторе не учитывались. На рисунках показано изменение общей чувствительности $\nu\nu'$ в зависимости от частоты. За единицу принята резонан-

сная частота полуволновой пьезопластины, совпадающая с резонансной частотой электрического контура $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Параметром семейства кривых является добротность электрического контура

$$Q = \frac{1}{2\pi f_1 CR} \quad (32)$$

Если добротность меньше 1, максимальная чувствительность достигается на резонансной частоте и растет с уве-

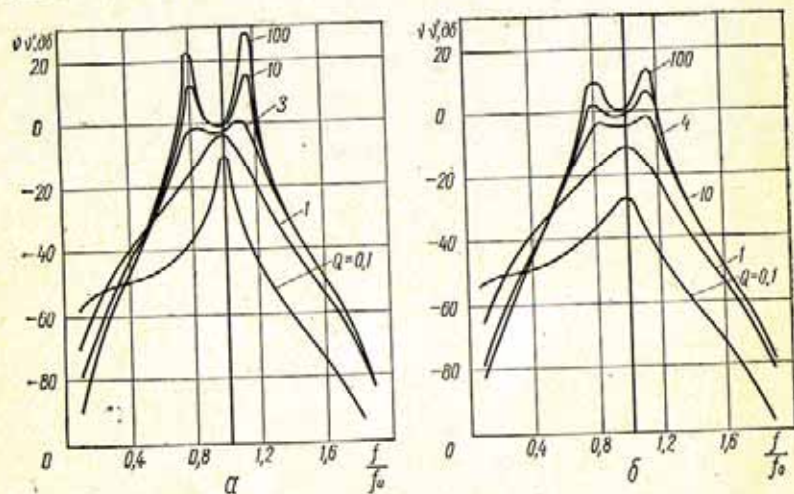


Рис. 25. Кривые изменения чувствительности искателя из ЦТС в зависимости от частоты при излучении в плексиглас:
а — демпфер и протектор отсутствуют; б — имеется демпфер с $Z_d = 6 \cdot 10^4 \text{ кз/м}^2 \cdot \text{сек}$.

личением Q . При увеличении добротности более 2—4 чувствительность на резонансной частоте практически не повышается и здесь образуется минимум. Это объясняется действием вторичных пьезоэффектов: когда пьезопреобразователь излучает ультразвук, он в то же время работает как генератор электрических колебаний, включенный навстречу основному генератору. В процессе приема звука пьезопреобразователь одновременно излучает обратно часть принятой энергии. При определенной добротности электрического контура эти эффекты сравниваются с первичными, и дальнейшее повышение добротности не вызывает возрастания чувствительности.

На частотах, отличающихся от резонансной, максимальная чувствительность достигается при больших значениях Q . Это приводит к расширению частотной полосы искателя, а при дальнейшем повышении Q — даже к появлению минимума на кривой в области $f/f_0 = 1$ и двух максимумов на частотах f/f_0 примерно равных 0,8 и 1,2. Добротность, при которой достигается максимальное расширение полосы частот, но боковые максимумы еще не образуются, соответствует оптимальным условиям работы искателя.

При сравнении трех вариантов конструкции иммерсионного искателя, приведенных на рис. 24, видно, что введение демпфера увеличивает полосу пропускания на 30% и уменьшает чувствительность примерно в 2 раза (см. кривые $Q = 2$ и $Q = 1$). Очень полезно применение согласующего протектора, который обеспечивает максимальное прохождение ультразвука из пьезопластины в изделие. Это достигается, когда четвертьволновой протектор изготовлен из материала с акустическим импедансом

$$Z_4 = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (33)$$

где Z_1 и Z_2 — акустические импедансы пьезопластины и среды, в которую производится излучение.

Это условие удовлетворяется, если протектор изготовить из эпоксидной смолы. Для такого искателя (рис. 24, б) при добротности контура $Q = 4$ достигается наибольшая полоса пропускания $f/f_0 = 0,5$, а чувствительность близка к единице.

В наклонных искателях, где излучение производится в плексигласовую призму (рис. 25), демпфирование пьезопреобразователя приводит к расширению полосы частотной лишь на 6% (см. кривые $Q = 3$ и $Q = 4$). Поэтому в плексигласовых призматических искателях можно использовать преобразователи без демпфера.

Для искателей нормального типа высокая стабильность акустического контакта имеет большое значение. Исследования [108] показали, что для обеспечения стабильной чувствительности, слабовисящей от толщины слоя контактной жидкости, следует создать условия согласования между демпфером искателя и слоем контактной жидкости. Согласование приводит к тому, что не вошедшая в изделие ультразвуковая волна отводится в демпфер. В результате

в контактном жидком слое не возникает многократных отражений ультразвуковых волн, интерференция которых является главной причиной неустойчивости акустического контакта. Условия согласования выполняются, если искатель снабдить четвертьволновым протектором, а материалы демпфера и протектора подобрать такими, чтобы выполнялось условие

$$Z_4 = \sqrt{Z_ж Z_3},$$

где Z_3 , Z_4 и $Z_ж$ — акустические импедансы материалов демпфера, протектора и контактной жидкости.

Кроме обеспечения условий согласования, материал протектора нормального искателя должен обладать хорошей износостойкостью и смачиваемостью.

2. КОНСТРУКЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ИСКАТЕЛЕЙ

На рис. 26 показана конструкция нескольких нормальных искателей контактного типа, предназначенных для работы по совмещенной схеме. В отечественных искателях

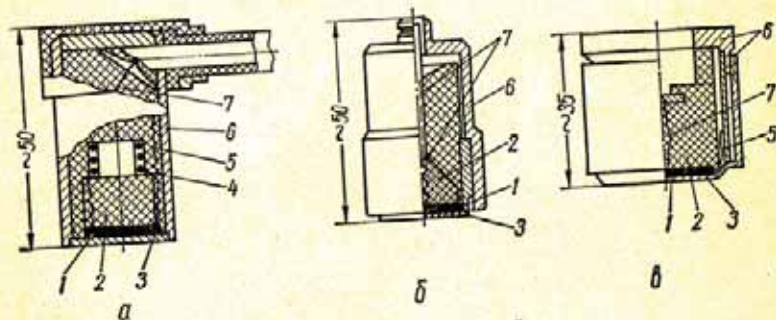


Рис. 26. Конструкция нормальных искателей: а — к дефектоскопу ДУК-66; б — типа ИЦ-1 (ЦНИИТмаш); в — типа Q4S (фирма «Крауткремер»); 1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — протектор; 4 — катушка индуктивности; 5, 7 — соединяющие проводники; 6 — корпус.

(рис. 26, а и б) пьезопластина 1 изготовлена из ЦТС. В искателях фирмы Крауткремер (рис. 26, в) пьезопластину чаще изготавливают из кварца (искатели серии Q), хотя иногда применяют титанат бария (искатели серии B) [181]. Диаметр пластины определяет направленность поля искателя. В искателях советских дефектоскопов отношение

диаметра к длине волны в стали $\frac{2a}{\lambda}$ колеблется от 2,5 до 8. За границей обычно применяются искатели большего диаметра ($\frac{2a}{\lambda} = 4 \div 20$). Толщина пьезопластины d_1 должна быть равна половине длины волны:

$$d_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{C_1}{2f_0},$$

где C_1 — скорость звука в пьезоматериале.

На обе стороны пьезопластины наносят серебряные электроды, которые системой проводников соединяются с кабелем, а через него — с дефектоскопом. Внешняя оплетка кабеля и наружная сторона пьезопластины обычно соединяется с корпусом искателя 6. В искателе к дефектоскопу ДУК-66 (рис. 26, а) катушка индуктивности для настройки на резонансную частоту размещена непосредственно в искателе. Такая система позволяет добиться наиболее высокой чувствительности. В искателе типа Q4S (рис. 26, в) катушка индуктивности монтируется в разъеме кабеля, подсоединяемого к искателю. Искатель ИЦ-1 предназначен для работы с дефектоскопом, в котором катушки индуктивности помещены в приборе.

Пьезопластина приклеивается к демпферу. Чтобы ультразвуковые колебания, отраженные от задней поверхности демпфера, не вызывали помех, демпфер делается из звукогасящего материала — текстолита, эбонита или эпоксидной смолы. Для обеспечения высокой разрешающей способности акустическое сопротивление Z_3 демпфера желательно увеличить. Для этого в материал демпфера вводят наполнитель из металлического порошка или другого материала. Например, в искателе ИЦ-1 демпфер изготавливают из эпоксидной смолы, но в часть его, прилегающую к пьезопластине, вводят порошок вольфрама в весовой пропорции 1:5. Это повышает Z_3 до $7 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$. При контроле изделий большой толщины, когда разрешающая способность не имеет существенного значения, а повышение чувствительности весьма желательно, применяют демпфер с малым акустическим сопротивлением Z_3 .

Протектор искателя должен обладать высокой износостойкостью, а также обеспечивать высокую чувствительность искателя и стабильность акустического контакта его с изделием. Протектор искателя к дефектоскопу ДУК-66

(рис. 26, а) изготовленный из металлокерамики, хорошо удовлетворяет лишь первым двум условиям. Весьма высокую стабильность акустического контакта имеет искатель ИЦ-1, протектор которого изготовлен из эпоксидной смолы с металлическим (предпочтительно бериллиевым) наполнителем или из лигнофоля [10]. Этот протектор соответствует условиям согласования, изложенным в § 1. В искателе типа Q4S (рис. 26, в) протектор сделан из эластичного материала типа полиуретана. Это дает возможность протектору деформироваться и облегать неровности поверхности изделия, что также способствует стабильности акустического контакта.

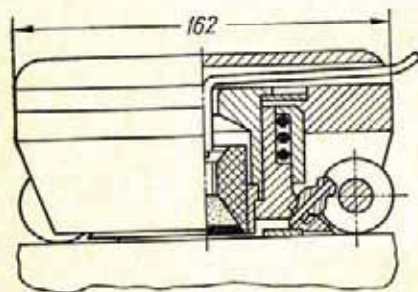


Рис. 27. Искатель типа ИЦ-23 со щелевым контактом на катящейся платформе.

Протектор обычно делается очень тонким (0,1—0,2 мм), чтобы обеспечить быстрое гашение многократных отражений в нем ультразвука. Если протектор изготовлен из звукогасящего материала, то толщина его может быть увеличена до 0,5—0,7 мм.

На рис. 27 и 28 показаны более сложные конструкции искателей щелевого и иммерсионного типа, применяемые для контроля изделий с грубой поверхностью. Корпус щелевого искателя (рис. 27) катится на роликах по поверхности изделия. Искательная головка перемещается в корпусе с помощью телескопического устройства и прижимается к поверхности изделия пружиной. Металлическая оправка головки

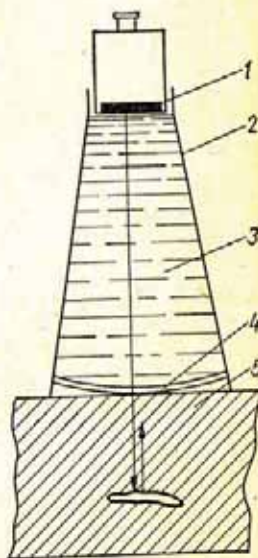


Рис. 28. Иммерсионный искатель типа ИЦ-9 с локальной ванной:

1 — пьезопластина; 2 — корпус; 3 — иммерсионная жидкость (вода); 4 — резиновая мембрана; 5 — изделие.

обеспечивает образование тонкого зазора между пьезопластинкой, закрытой четвертьволновым протектором, и изделием. Такой искатель позволяет осуществлять контроль горячекатаных изделий без обработки поверхности. Корпус эластичного искателя (рис. 28) образует локальную иммерсионную ванну, заполненную водой. Дном ванны является резиновая мембрана. Благодаря эластичности мембраны осуществляется хороший акустический контакт даже с весьма грубой поверхностью изделия, например с поверхностью литья после удаления грубых заусенцев. Головка 1 иммерсионного искателя (рис. 28) имеет такое же устройство, как в контактном искателе ИЦ-1. Отличается она только повышенным акустическим сопротивлением демпфера ($Z_3 = 7 \div 12 \cdot 10^6$). Протектор изготовлен из эпоксидной смолы и имеет толщину, равную четверти длины волны.

3. КОНСТРУКЦИЯ НАКЛОННЫХ ИСКАТЕЛЕЙ

На рис. 29 показаны два варианта конструкции наклонных искателей, получивших наиболее широкое распространение.

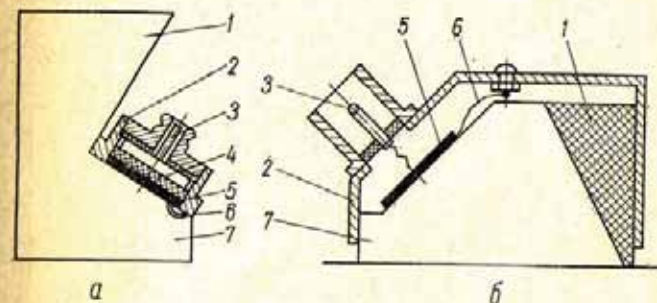


Рис. 29. Наклонные искатели:

а — типа ИЦ («дефектоскопу УДМ-1М»); б — типа WB (фирма «Крауткремер»); 1 — ловушка; 2 — корпус; 3, 6 — соединяющие проводники; 4 — демпфер; 5 — пьезопластина; 7 — призма.

Основной деталью, отличающей наклонный искатель от нормального, является призма 7 [8]. Пьезоэлемент излучает в призму продольные волны, которые на границе призмы с изделием испытывают преломление и трансформацию. Не вошедшая в изделие часть ультразвуковой энергии попадает

в ловушку и гасится в ней. В искателе типа ИЦ (рис. 29, а) ловушкой служит верхняя часть призмы, а в искателе типа WB (рис. 29, б) — передняя часть.

Демпфер в наклонных искателях либо совсем отсутствует (рис. 29, б), либо изготавливается из материала с малым акустическим сопротивлением. Например, в искателе типа ИЦ (рис. 29, а) он изготовлен из асбестового картона и выполняет функцию звукопроницаемой прокладки между пьезопреобразователем и втулкой 3, которая прижимает пьезопреобразователь к призме; через эту втулку осуществляется электрический контакт.

Пьезопластину наклонного искателя выполняют полуволновой. Часто ей придают не круглую, а квадратную или прямоугольную форму. Такая форма выгодна тем, что увеличивается интенсивность излучения, генерируемого нижней частью пластины, которое имеет самый короткий путь в призме, а следовательно, меньше всего ослабляется ею. Пьезопластина прижимается к призме через слой масла (рис. 29, а) или приклеивается к ней (рис. 29, б).

Таблица 4

Параметры призматических искателей типа ИЦ

Угол падения волны (угол призмы) β , град	Угол расхождения поперечной волны (по данным эксперимента) α , град		Размеры, мм, искателя на частоту									
			1,8 МГц					2,5 МГц				
	Дюралюминий	Сталь	2a	a	b	c	r ₁	2a	a	b	c	r ₁
30	40	39	18	22	55	38	17	12	13	35	27	11
40	48	50	18	24	55	40	13	12	15	35	27	10
50	62	65	18	30	55	45	15	12	20	35	33	12

Призму искателя изготавливают чаще всего из плексигласа. Угол падения луча или преломляющий угол β (табл. 4) выбирают в интервале между первым и вторым критическими углами.

При выборе высоты B и длины L призмы следует учитывать, что отраженные от поверхности призмы — изделие ультразвуковые волны должны попадать в ловушку, а не на пьезопластину. Поэтому стрелу искателя n (табл. 4), т. е. расстояние от точки ввода до передней грани призмы, выбирают достаточно большим, чтобы луч от верхней части

пьезопластины не падал на двугранный угол A , так как при этом он отражается назад к пьезопластине. Средний путь ультразвука в призме $R = OO'$ устанавливают таким, чтобы излучение нижней части пьезопластины (L) после отражения (L') от нижней грани призмы не попадало на верхнюю часть пьезопластины. Желательно также, чтобы на верхнюю часть не попадала поперечная волна T' , возникающая при отражении, хотя она дает сигнал небольшой интенсивности. В табл. 4 приведены параметры наклонных искателей типа ИЦ, удовлетворяющие указанным требованиям.

Плексиглас является очень хорошим материалом для изготовления призмы, так как обладает достаточным коэффициентом затухания для гашения ультразвуковых волн в ловушке и в то же время не сильно ослабляет ультразвуковые волны на коротком участке пути от пьезоэлемента до изделия. Для улучшения гашения ультразвуковых волн в ловушке часто применяют специальные меры, например, грани ее делают ребристыми или в ловушке сверлят много мелких отверстий. В искателе типа WB (рис. 29, б) ловушка выполнена из материала с повышенным затуханием ультразвука.

Плексиглас отличается также хорошей смачиваемостью, что обеспечивает достаточно высокое качество акустического контакта даже при работе по грубой поверхности. Однако недостатком плексигласа является плохая устойчивость при истирании. Для повышения износостойкости искателя нижнюю часть призмы помещают в обойму из закаленной стали. При контроле такая обойма выполняет роль салазок, на которых призма скользит по поверхности изделия. Наклонные искатели изготавливают также с протектором из износостойчивого материала, например ситала. Однако при этом качество акустического контакта резко ухудшается. Более перспективным является искатель со скользящим эластичным протектором (рис. 30).

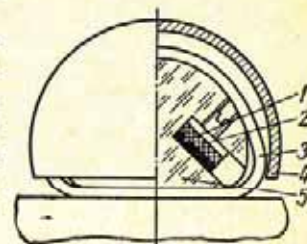


Рис. 30. Искатель типа ИЦ-15 со скользящим протектором:

1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — скользящий протектор; 4 — корпус; 5 — призма.

Плексиглас отличается также хорошей смачиваемостью, что обеспечивает достаточно высокое качество акустического контакта даже при работе по грубой поверхности. Однако недостатком плексигласа является плохая устойчивость при истирании. Для повышения износостойкости искателя нижнюю часть призмы помещают в обойму из закаленной стали. При контроле такая обойма выполняет роль салазок, на которых призма скользит по поверхности изделия. Наклонные искатели изготавливают также с протектором из износостойчивого материала, например ситала. Однако при этом качество акустического контакта резко ухудшается. Более перспективным является искатель со скользящим эластичным протектором (рис. 30).

Наклонные искатели (рис. 29) работают на частотах 1,5—2,5 МГц. С понижением частоты габариты наклонных искателей существенно увеличиваются (табл. 4). Это необходимо для сохранения высокой направленности излучения и гашения в ловушке призмы отраженной от границы раздела ультразвуковой энергии. До настоящего времени так и не удалось создать компактный, удобный для работы призматический искатель с одной приемно-излучающей пьезоэлектрической пластиной на частоту 1 МГц и менее. Для контроля сварных соединений на частотах порядка 1 МГц

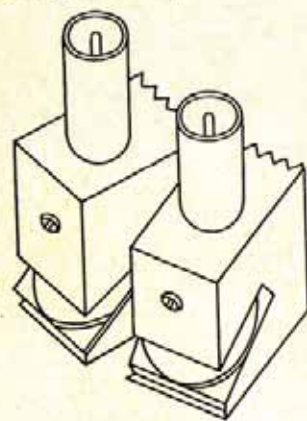


Рис. 31. Искатель конструкции ЛЭТИ с разделением излучающей и приемной призмы.

может быть использован искатель с двумя акустически разделенными пьезоэлектрическими пластинами и призмами (передающей и приемной), расположенными под определенными углами (рис. 31).

Искатели, предназначенные для работы на частотах порядка 5 МГц, имеют небольшие размеры. Это необходимо с целью сокращения пути r_1 ультразвука в плексигласовой призме, так как высокочастотные колебания очень сильно поглощаются плексигласом. В то же время повышение частоты позволяет уменьшить размер пьезопластины и устраняет необходимость в большой ловушке искателя, в результате высокочастотные искатели полу-

чаются весьма малогабаритными. В некоторых специальных случаях применяют искатели с углом призмы меньше первого критического. Если угол падения не превышает 10° , поперечная волна в стали имеет небольшую интенсивность и контроль ведется продольными волнами. Призмы с небольшими углами преломления применяют в раздельно-совмещенных искателях и в искателях для контроля труднодоступных сварных соединений, у которых почти отсутствует ровная поверхность рядом с напавленным металлом. Применять такие искатели целесообразно и для контроля сварных швов большой толщины, так как при этом сокращается путь ультразвука в изделии. Необходимость прозвучивания одного и того же сварного соединения под различными углами требует приме-

нения нескольких искателей с фиксированным углом ввода луча, что усложняет процесс контроля. Избежать смены искателей в процессе контроля можно при использовании наклонного искателя с регулируемым углом ввода луча. На рис. 32 приведены основные типы искателей с переменным углом. В искателе, показанном на рис. 32, а, угол ввода изменяется путем взаимного вращения

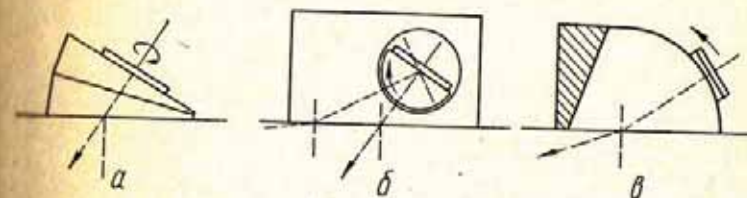


Рис. 32. Основные типы искателей с переменным углом наклона.

двух круговых клиньев. Такой искатель не имеет ловушки и используется при работе по раздельной схеме. В искателе, приведенном на рис. 32, б, пьезоэлемент размещен на внутреннем вращающемся полуцилиндре. Недостаток этого искателя состоит в том, что при изменении угла падения меняется путь ультразвука в призме и положение точки ввода. Этот недостаток устранен в искателе (рис. 32, в), в котором пьезоэлемент перемещается по поверхности полуцилиндра. Однако в таком искателе очень велик путь ультразвука в призме, что сильно ослабляет его чувствительность.

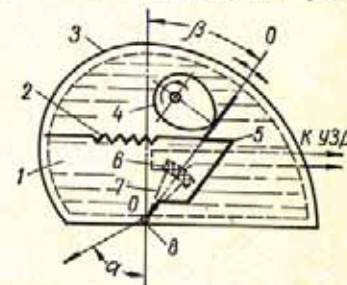


Рис. 33. Искатель с автоматическим изменением угла падения.

Перечисленные недостатки устранены в искателе с автоматическим изменением угла падения (рис. 33) [44], где ось поворота пьезоэлемента совпадает с точкой ввода, так же, как в искателе, показанном на рис. 32, в, а повышение чувствительности достигается путем замены призмы из плексигласа локальной иммерсионной ванной.

Искатель состоит из корпуса 3, выполненного из плексигласа и заполненного проводящей ультразвуком жидкостью 1.

Внутри корпуса расположен пьезоэлектрический излучатель 6, укрепленный на поворотной планке 7.

Угол β падения ультразвукового луча изменяется при повороте планки 7 с излучателем вокруг оси 8, которая совмещена с точкой ввода. С внешней стороны искателя расположена стрелка 5, укрепленная на оси 8 и поворачивающаяся вместе с планкой 7, а также кулачок 4, вращаемый от электродвигателя или заводной пружины. Витая пружина 2 обеспечивает постоянный прижим стрелки 5 к кулачку 4.

Кулачок в процессе вращения изменяет величину угла наклона стрелки 5 (угла β падения ультразвукового луча), что приводит к непрерывному автоматическому изменению величины угла α ввода ультразвукового луча, т. е. к его качающемуся движению. За половину оборота кулачка угол падения и угол ввода ультразвукового луча изменяются от минимального до максимального значения.

Механизм с кулачком специального профиля обеспечивает такой закон изменения угла β падения ультразвукового луча, при котором скорость изменения угла α ввода луча в контролируемый материал при данной заполняющей искатель жидкостной среде остается постоянной, т. е. выполняется условие

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d}{dt} \arcsin \left(\frac{C_m}{C_{ж}} \sin \beta \right) = \text{const}, \quad (34)$$

где t — время; C_m , $C_{ж}$ — скорость распространения ультразвука в контролируемом материале и в среде, заполняющей искатель, соответственно.

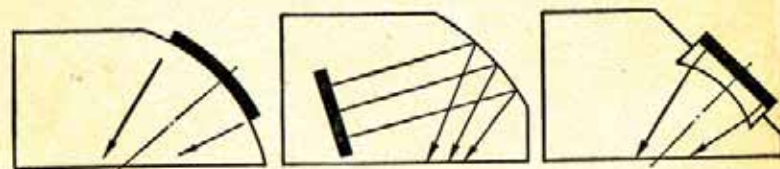


Рис. 34. Основные типы наклонных фокусирующих искателей.

Для улучшения направленности излучения применяют фокусировку ультразвука. Разработаны конструкции искателей дефектоскопов с фокусировкой с помощью искривленной пьезопластины, рефлектора и собирающей линзы (рис. 34). В связи с большой длиной волны ультразвука

по сравнению со световой волной получение эффекта фокусировки ультразвука требует применения пьезопреобразователей большого размера (30—50 мм). Но даже в этом случае максимальная глубина расположения фокального пятна под поверхностью изделия оказывается небольшой. Значительный пробег ультразвука в призме, характерный для всех искателей, показанных на рис. 34, еще больше сокращает фокусное расстояние. Поэтому

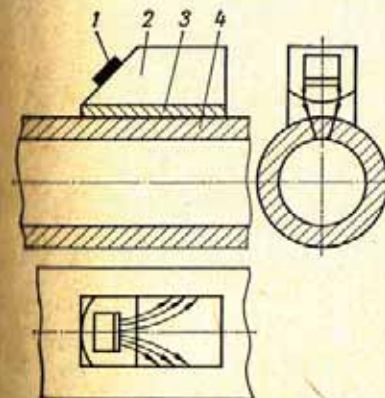


Рис. 35. Фокусирующий искатель типа ИЦ-3Б:

1 — пьезопластина; 2 — призма; 3 — линза-протектор; 4 — изделие (труба).

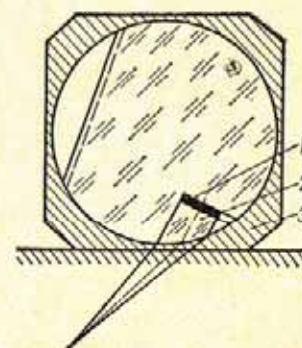


Рис. 36. Фокусирующий искатель типа ИЦ-13 с переменным углом падения луча:

1 — пьезопластина; 2 — призма; 3 — обойма.

практическое применение получили только искатели, фокусирующая линза у которых расположена на границе призмы с изделием [71]. Она одновременно выполняет роль протектора, защищающего призму от износа. Так, искатель типа ИЦ-3Б (рис. 35) имеет протектор в виде цилиндрической линзы. Протектор изготовлен из алюминия, скорость поперечных волн в котором больше, чем скорость продольных волн в плексигласе, поэтому вогнутая форма протектора соответствует собирающей линзе. Многократные отражения ультразвука в протекторе приводят к концентрации не вошедшей в изделие энергии у боковых граней призмы и протектора, где она гасится.

Искатель ИЦ-13 (рис. 36) имеет сферическую фокусировку. Призма в форме сферического слоя может вращаться внутри обоймы, которая одновременно служит линзой и протектором. Поэтому такой искатель имеет переменный

угол ввода ультразвуковых колебаний. Наружные грани обоймы имеют разную кривизну, что позволяет использовать этот искатель при контроле плоских изделий и труб различного диаметра. Недостатком искателей типов ИЦ-3Б и ИЦ-13 с металлическим фокусирующим протектором является ухудшение стабильности акустического контакта по сравнению с обычными плексигласовыми искателями.

Очень часто сложные задачи по контролю тех или иных изделий могут быть решены путем создания или модификации искателей без изменения самого дефектоскопа. Излагаемые ниже краткие сведения по технологии изготовления и сборки искателей помогут при проведении подобных работ.

Подгонка пьезопластин по форме и толщине. Часто необходимо разрезать большую пьезопластину на несколько кусков или придать ей пужную конфигурацию. Пластины из пьезокерамики можно резать ножом из твердой стали. Положив пластину на ровную твердую плиту, делают ножом риску на ее поверхности и в конце реза у края пластины надавливают ножом посильнее. Пластины из кварца режут алмазом как стекло.

Если пьезопластина имеет толщину больше требуемой, ее можно перешлифовать. Для этого смесью воска и канифоли несколько пластин приклеивают к плоской оправке и шлифуют на чугунной доводочной плите. В качестве абразивного вещества применяют порошок карбида бора с водой.

Нанесение электродов на поверхности пьезопластин. Электроды на поверхности пьезокерамики наносят вжиганием. Для этого пластину моют в растворе соды или в спирте. Затем ее сушат в муфельной печи при температуре до 600°C в течение двух часов. После этого серебряную пасту № 2 кисточкой наносят на поверхность пластины очень тонким слоем. Пасте дают полностью высохнуть при температуре $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$, а затем пластину обжигают в муфельной печи в течение двух часов при температуре $800\text{--}840^{\circ}\text{C}$. Нагревают и охлаждают пластину вместе с печью. Затем наносят второй слой пасты и пластину вторично сушат и обжигают тем же методом.

Поляризация пьезопластин. Пластина ЦТС или титаната бария, нагретая при серебрении, теряет пьезосвойства. Для их восстановления пластину следует поляризовать.

Поляризация производится в ванночке, наполненной силиконовой жидкостью № 5 или трансформаторным маслом. На дно ванны помещают металлический электрод. Второй (обычно пружинящий) электрод подводят к верхнему электроду пластины.

Пластины из ЦТС поляризуются в электрическом поле напряжением $3\text{--}4\text{ кВ}$ на 1 мм толщины при температуре 140°C в течение двух часов, после чего их охлаждают также под напряжением. При этом следует опасаться возгорания масла и следить, чтобы пластина не пробила. О пробое будет свидетельствовать резкое уменьшение напряжения. Пластины титаната бария поляризуют при комнатной температуре под напряжением $1,5\text{ кВ}$ на 1 мм .

Припайка электрических контактов. Пайка электрических контактов к электродам пьезопластины должна производиться легкоплавким припоем так, чтобы эта операция не вызывала располяризации пьезопластин. Рекомендуется припой, в состав которого входит 9,5% олова, 45,2% свинца и 45,3% висмута; температура плавления его 70°C .

Склейка и заливка искателей. Пьезопластину с призмой, а также призму с протектором склеивают полимерными клеями. Хорошие результаты дает компаунд марки К-153. Перед склейкой в компаунд добавляют 8—12% отвердителя и перемешивают при температуре не выше 35°C . Перед склейкой поверхности деталей тщательно очищают бензином и спиртом, а затем сушат. Склеенные детали сжимают под давлением $0,6\text{--}1\text{ кг/см}^2$ и выдерживают в течение 24 ч при температуре $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$. Склеивать следует с помощью приспособлений, обеспечивающих их удобную сборку, фиксацию и сжатие с требуемым усилием.

Компаунд К-153 с отвердителем (эпоксидная смола) в чистом виде или с соответствующими порошковыми наполнителями используется также для изготовления протектора и демпфера нормальных искателей и для заливки пустых пространств искателей (см. рис. 26, а, 35). Размеры частиц наполнителя должны быть не более $0,2\text{--}0,3\text{ мм}$. Смешанную массу заливают в форму и выдерживают в течение 12 суток при температуре 20°C , после чего подвергают механической обработке. Через протектор проходят ультразвуковые волны, поэтому важно удалить из него пузырьки воздуха, возникающие в процессе приготовления массы. Для этого рекомендуется механическое удаление верхнего слоя образующейся массы.

АППАРАТУРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аппаратура для ультразвукового контроля качества сварных соединений представляет собой комплекс приборов и устройств, предназначенных для выявления внутренних дефектов (включений) в сварных швах и исследования структуры металла.

Всю аппаратуру можно разделить на следующие основные группы: ультразвуковые дефектоскопы; ультразвуковые анализаторы структуры; комплекты эталонов и тест-образцов для поверки и настройки приборов; координатные линейки и шаблоны для определения места расположения отражающих поверхностей, размеров дефектов, типа искателей, пределов их перемещения и т. п.; вспомогательные приспособления.

Ниже рассмотрены принципы построения аппаратуры, применяемой в настоящее время для ручного контроля сварных соединений.

Основные узлы дефектоскопов и анализаторов структуры идентичны. В ряде случаев для контроля структуры можно использовать дефектоскопы. Большинство ультразвуковых дефектоскопов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, универсальны и предназначаются для контроля различных заготовок и изделий.

Специфика ультразвукового контроля сварных соединений требует разработки более совершенных специализированных дефектоскопов. Практика эксплуатации различных дефектоскопов позволила определить основные требования к аппаратуре для ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДЕФЕКТОСКОПАМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ

Основными характеристиками, определяющими эксплуатационные данные дефектоскопа, являются его чувствительность, система индикации дефектов, система селекции, точность и конструкция глубиномера, величина

мертвой зоны, разрешающая способность, максимальная глубина контроля, портативность и система питания.

Чувствительность дефектоскопа должна быть достаточной для выявления недопустимых внутренних дефектов в сварных соединениях. Очевидно, что излишне большая чувствительность может привести к регистрации эхо-сигналов от мелких включений и даже от структурных изменений, не являющихся дефектами сварки. Для выбора оптимальных условий контроля в дефектоскопе следует предусмотреть возможность плавной регулировки чувствительности в широких пределах, не менее 60 дБ.

При прочих равных условиях чувствительность дефектоскопа определяется частотой ультразвуковых колебаний, амплитудой электрического высокочастотного импульса, возбуждающего пьезоэлектрическую пластину, и коэффициентом усиления приемного тракта. Оптимальная частота определяется типом, размерами и материалом контролируемого соединения. Практика показала, что для производственного контроля качества сварных соединений достаточно иметь дефектоскоп с одной — тремя рабочими частотами в диапазоне 1,5—5 МГц, а регулировку чувствительности производить путем ослабления амплитуды сигналов на входе приемного тракта с помощью прокалиброванного аттенюатора. В настоящее время, применяя частоты 1,8; 2,5 и 5 МГц, удается осуществлять дефектоскопию и толщинометрию большинства сварных соединений. Для оценки структуры металла необходимо использовать более высокие частоты (до 30 МГц).

Согласно рекомендаций по ультразвуковому контролю сварных швов, действующих в Англии [122], дефектоскопы должны иметь не менее трех частот в диапазоне 1—6 МГц, обеспечивать при минимальной чувствительности выявление донной плоскости в стали на расстоянии 100 мм и обладать при этом резервом по чувствительности в 40—60 дБ.

Система индикации дефектов. Под индикатором понимают устройство, преобразующее электрические эхо-импульсы в видимые или слышимые сигналы и позволяющее оценивать амплитуду эхо-сигналов и координаты отражающей поверхности (дефекта).

В практике ультразвуковой дефектоскопии встречаются индикаторы следующих видов: 1) осциллографические; 2) звуковые; 3) оптические; 4) стрелочные.

Очевидно, что применение индикатора того или иного вида определяется задачами и условиями контроля. Наибольшее распространение получили осциллографические индикаторы (электронно-лучевые трубки).

Однако при контроле сварных соединений, кроме электронно-лучевой трубки, необходимо иметь дополнительные звуковой и оптический (световой) индикаторы, освобождающие оператора от необходимости одновременного наблюдения за перемещаемым искателем и за экраном трубки. Оптические индикаторы необходимы в том случае, когда не может быть использован звуковой, например в цехах с сильным шумом. Дополнительные индикаторы не только облегчают работу оператора, но и повышают надежность контроля.

Таким образом, в ультразвуковых дефектоскопах для контроля сварных соединений необходимо предусматривать осциллографический, звуковой и оптический индикаторы. В ряде случаев в дефектоскопах узкого назначения целесообразно вместо осциллографических индикаторов применять стрелочные. При этом стрелочные индикаторы могут быть использованы как для оценки амплитуды эхосигналов, так и для определения координат отражающих поверхностей [47, 50].

Система селекции эхо-сигналов. При контроле сварных соединений весьма вероятно возвращение на искатель ультразвуковых сигналов, отраженных от неровностей поверхности металла и шва, а также от уступов и краев соединения. Таким образом, при включении искателей по совмещенной или раздельно-совмещенной схеме на вход приемного тракта могут поступать зондирующий импульс, импульсы, отраженные от дефектов, и импульсы, отраженные от поверхности (рис. 37).

Если в дефектоскопе не предусмотрено никаких специальных селектирующих устройств, то на экране электронно-лучевой трубки наблюдаются, кроме импульсов, обусловленных наличием дефектов, зондирующий импульс и импульсы, отраженные от поверхностей соединения (рис. 37, IV). Для получения наибольшей разрешающей способности длительность развертки устанавливают возможно меньшей, но достаточной, чтобы воспроизвести на ней эхо-сигналы от возможных дефектов. Однако даже при этом длина рабочего участка линии развертки, т. е. участка, на котором ожидается появление импульсов от

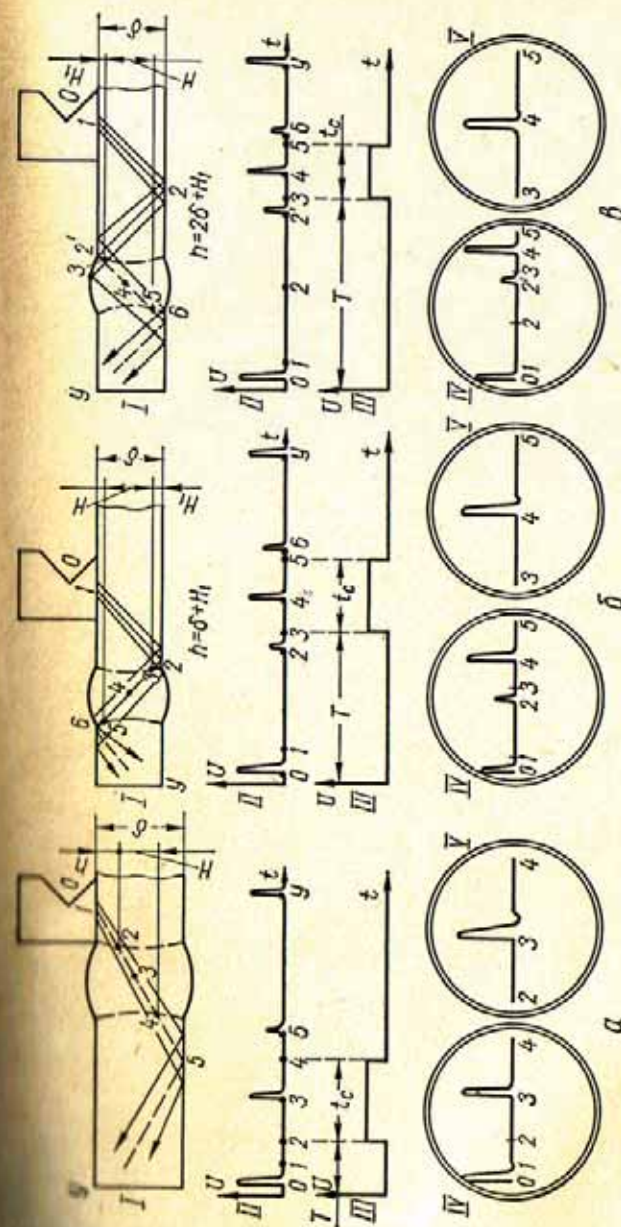


Рис. 37. Временная селекция эхо-сигналов при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений:
а — прозвучивание прямым лучом; б — прозвучивание однократно отраженным лучом; в — прозвучивание двукратно отраженным лучом; I — схема прозвучивания; II — временная диаграмма сигнала на выходе детектора приемного тракта; III — временная диаграмма селектирующего импульса; IV — экран осциллографического индикатора дефектоскопа без системы «лупы времени» (электронной лупы); V — экран осциллографического индикатора дефектоскопа с «лупой времени».

дефектов, будет составлять незначительную часть от общей длины развертки.

На рис. 37, б, в видно, что при прозвучивании стыкового сварного шва однократно отраженным лучом величина рабочего участка развертки меньше половины ее длины, а при прозвучивании двукратно отраженным лучом — составляет всего лишь одну треть. Неполное использование длины развертки для индикации дефектов, а также возможность возникновения на ней большого количества импульсов, отраженных от поверхности, затрудняет расшифровку осциллограммы и снижает надежность контроля.

Эти недостатки обычно применяемой системы осциллографической индикации могут быть устранены, если использовать предложенный автором метод контроля швов «по слоям» со схемой «лупы времени» в генераторах развертки. Для контроля швов по слоям длительность развертки устанавливают равной двойному времени прохождения ультразвуком контролируемого участка наплавленного металла шва, а начало развертки сдвигают по отношению к зондирующему импульсу на время прохождения ультразвуком расстояния от пьезоэлектрической пластины до начала контролируемого участка и обратно. При этом на экране трубки «рассматривается» лишь та часть пути ультразвукового импульса, которая проходит через контролируемый участок шва (рис. 37, I, V). Вследствие этого импульсы на экране трубки будут возникать только при обнаружении дефектов, залегающих в контролируемом участке.

Чтобы дополнительные звуковой и оптический индикаторы срабатывали только от эхо-сигналов, вызванных дефектами, на выход приемного тракта не должны проникать зондирующий импульс и импульсы, возникающие в результате отражения ультразвука от поверхности соединения. С этой целью в дефектоскопах используют систему селекции по времени поступающих на вход приемника сигналов, заключающуюся в том, что приемник в своем обычном состоянии «закрит» и «открывается» лишь на время, в течение которого ожидаются эхо-сигналы от возможных дефектов, залегающих в контролируемом участке.

Время открытого состояния приемника определяется длительностью специально генерируемого в дефектоскопе селективного (стробирующего) импульса. Очевидно, что длительность t_c селективного импульса

обуславливает толщину H контролируемого слоя, а интервал времени T между моментом излучения зондирующего импульса и моментом начала селективного импульса — глубину h залегания контролируемого слоя. Величины t_c , H , T и h при прозвучивании призматическими искателями связаны между собой соотношениями

$$t_c = \frac{2H}{C_l} \sec \alpha \text{ и } T = \frac{2h}{C_l} \sec \alpha + 2t_n, \quad (35)$$

где t_c — длительность селективного импульса; T — время сдвига начала селективного импульса относительно зондирующего; H — толщина контролируемого участка; h — глубина залегания начала контролируемого участка; C_l — скорость поперечной волны в контролируемом металле; α — угол ввода луча; t_n — время прохождения ультразвукового импульса через призму искателя.

Итак, в ультразвуковых дефектоскопах для контроля сварных соединений целесообразно применять метод контроля по слоям с системой временной селекции эхо-сигналов и «лупой времени».

Для выделения полезных эхо-сигналов от помех, совпадающих с ними во времени, в дефектоскопах должна быть предусмотрена амплитудная селекция, т. е. отсечка (ограничение) сигналов по минимуму. В процессе эксплуатации весьма важно знать относительный уровень отсечки [54]:

$$A = \frac{\Delta U}{U_{\max}}, \quad (36)$$

где ΔU — минимальная амплитуда эхо-сигнала на входе приемного тракта, соответствующая порогу отсечки;

$U_{\max}$ — амплитуда эхо-сигнала на входе приемного тракта, соответствующая определенной величине этого сигнала на индикаторе дефектоскопа.

Относительный уровень отсечки может быть легко определен, если на входе приемного тракта дефектоскопа имеется прокалиброванный аттенюатор. При отсутствии аттенюатора в паспорте дефектоскопа необходимо указывать величину эхо-сигнала на индикаторе и положение ручки регулировки порога ограничения, обычно называемой «ручкой отсечки», соответствующие относительному уровню отсечки $A \approx 0,5$.

Глубиномер со шкалами для непосредственного отсчета координат дефектов при работе призматическими искателями с различными углами падения ультразвуковой волны является неотъемлемой частью дефектоскопа, предназначенного для проверки качества сварных швов. Принцип построения глубиномера должен обеспечивать высокую точность измерения. Процесс измерения при этом должен быть непосредственным, простым и быстрым, а также не вносить никаких изменений в режим работы дефектоскопа.

Мертвая зона определяется минимальной глубиной расположения дефекта, четко выявляемого всеми индикаторами дефектоскопа. Величина мертвой зоны зависит от длительности зондирующего импульса τ , времени восстановления τ_y , коэффициента усиления приемного тракта после воздействия зондирующего импульса и, в некоторых случаях, от конструкции искателя.

Действительно, для отдельной регистрации эхосигнала от дефекта и зондирующего импульса необходимо, чтобы время T от момента излучения зондирующего импульса и до момента возвращения эхосигнала было больше времени $(\tau + \tau_y)$.

Время T связано с глубиной расположения дефекта соотношением

$$T = \frac{2H}{C_l} \quad (37)$$

для прямого искателя и

$$T = \frac{2H \sec \alpha}{C_l} + 2t_n \quad (38)$$

для призматического, где H — глубина расположения дефекта; C_l и C_t — скорости продольной и поперечной ультразвуковых волн; α — угол ввода ультразвуковых колебаний; t_n — время прохождения импульса через призму.

Приравняв время T к длительности $(\tau + \tau_y)$, получаем минимальную величину мертвой зоны

$$M_{\min} = \frac{(\tau + \tau_y) C_l}{2} \quad (39)$$

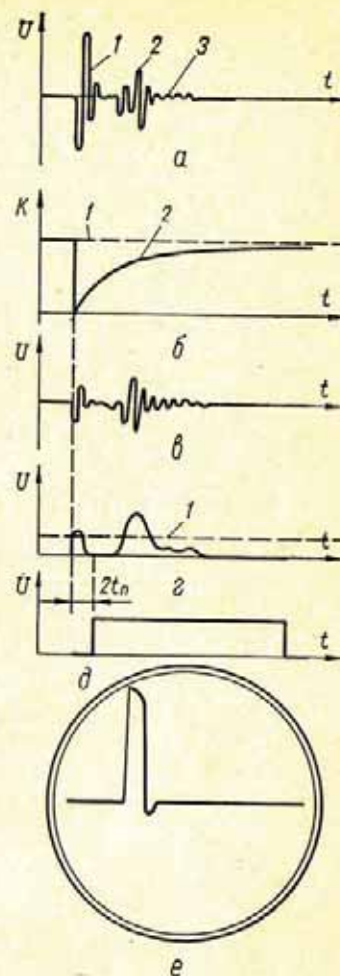
для прямых искателей и

$$M_{\min} = \frac{(\tau + \tau_y - 2t_n) C_l}{2} \cos \alpha \quad (40)$$

для призматических искателей.

Рис. 38. Уменьшение мертвой зоны дефектоскопа, обусловленной многократными отражениями ультразвука в призме искателя:

а — напряжение на выходе приемника (1 — зондирующий импульс; 2 — импульс от дефекта; 3 — эхо-импульсы на призме); б — изменение коэффициента усиления во времени (1 — коэффициент усиления без коррекций; 2 — коэффициент усиления с коррекцией); в — напряжение на выходе усилителя высокой частоты; г — напряжение на выходе детектора (1 — порог ограничения шумов); д — расположение во времени селектирующего импульса, определяющего время работы видеоусилителя; е — вид осциллограммы на экране дефектоскопа.



Из выражений (39) и (40) видно, что сокращение длительности τ и τ_y уменьшает величину мертвой зоны. Длительность зондирующего импульса τ может быть уменьшена путем увеличения частоты колебаний при сокращении числа циклов колебаний или использования фазовой компенсации [160]. Для сокращения периода восстановления τ_y на вход приемного тракта включают цепочку, шунтирующую зондирующий импульс, или заправляют приемник на время действия зондирующего импульса.

При $\tau + \tau_y < 2t_n$, что имеет место в практике, мертвая зона при работе призматическими искателями могла бы отсутствовать, если бы ультразвуковые колебания после многократных отражений в призме полностью выдохлись и не возвращались на пьезоэлектрическую пластину. Эхо-сигналы, появляющиеся после многократных отражений зондирующего импульса в призме искателя, делают невозможной регистрацию эхо-сигналов от дефектов, расположенных близко от поверхности, создавая тем самым мертвую зону величиной 3—10 мм.

При контроле некоторых сварных соединений и особенно наплавленных деталей мертвая зона не должна превышать 1—4 мм. Величина мертвой зоны, обусловленной многократными отражениями ультразвука в призме искателя, может быть значительно снижена путем введения в приемный тракт системы коррекции во времени коэффициента усиления, ограничения по минимуму и селекции по времени поступающих на вход сигналов. Принцип работы такой системы показан на рис. 38.

Коррекцию во времени коэффициента усиления приемного тракта следует подбирать так, чтобы в процессе излучения зондирующего импульса усилитель был заперт и его коэффициент усиления восстанавливался к моменту полного затухания реверберационных шумов в призме искателя. Закон изменения коэффициента усиления во времени от нулевого до заданного номинального значения определяется порогом ограничения, а также уровнем и длительностью реверберационных шумов призм различных искателей; в дефектоскопах должна быть предусмотрена плавная регулировка характера изменения во времени коэффициента усиления приемного тракта.

Указанные меры весьма эффективны и позволяют при необходимости полностью ликвидировать мертвую зону при работе наклонными искателями.

В качестве системы временной коррекции усиления (ВКУ) приемного тракта может быть использована система временной регулировки чувствительности дефектоскопа (ВРЧ).

Система ВРЧ в отличие от системы ВКУ, используемой только для уменьшения мертвой зоны, предназначена для обеспечения постоянства чувствительности контроля изделий независимо от глубины расположения дефекта. Поэтому система ВРЧ должна корректировать коэффициент усиления приемника в течение всего периода возможного приема эхо-сигналов, причем коррекция должна выполняться с учетом дифракции и затухания ультразвука в контролируемом изделии.

Разрешающая способность дефектоскопа определяется минимальным временем T_p (мксек) между эхо-сигналами, отраженными от двух поверхностей, расположенных одна за другой по направлению распространения ультразвуковой волны, и различимыми на экране осциллографического индикатора. При правильно выбранной длительности

развертки разрешающая способность полностью обуславливается длительностью τ_b эхо-сигналов на выходе приемного тракта. Длительность эхо-сигналов τ_b может превышать длительность τ зондирующих импульсов вследствие искажений последних в приемном тракте дефектоскопа. Если в дефектоскопе предусмотрены меры, устраняющие подобные искажения, то разрешающая способность T_p определяется только длительностью τ зондирующих импульсов и в лучшем случае составляет $T_{pmin} = \tau$.

При контроле сварных соединений разрешающая способность в 2—4 мксек является достаточной, чтобы в большинстве случаев отличать одиночные дефекты от их скоплений и отделять (селектировать) эхо-сигналы, обусловленные дефектами, от эхо-сигналов, отраженных от неровностей поверхности шва.

Максимальная глубина прозвучивания обычно характеризуется максимальным расстоянием, на котором посредством всех индикаторов может быть зарегистрирован донный эхо-сигнал.

При контроле сварных соединений обычно применяют призматические искатели с углами падения волны от 30 до 55°. Прозвучивание швов большой толщины производят искателями с меньшим углом падения волны. Поэтому дальность действия дефектоскопов, предназначенных для контроля сварных соединений, целесообразнее определять как максимальную глубину, на которой при работе искателем с углом $\beta = 30^\circ$ всеми индикаторами надежно обнаруживается донный эхо-сигнал. Обычно максимальная глубина прозвучивания ограничивается не чувствительностью дефектоскопа, а максимальной длительностью селектирующего импульса.

На современном уровне развития сварочной техники осуществлять ультразвуковой контроль сварных соединений толщиной более 0,7 м практически не приходится. Поэтому вполне достаточно, чтобы максимальная глубина прозвучивания дефектоскопа с искателем 30° составляла примерно 0,7 м.

Естественно, что максимальная глубина прозвучивания не определяет действительные возможности прибора при контроле конкретных сварных соединений [67].

Портативность и система питания. Труднодоступное расположение сварных соединений, необходимость перемещения с прибором по решетчатым конструкциям

и на большой высоте ограничивают габариты и вес дефектоскопа. Поэтому целесообразно создавать дефектоскопы на транзисторах и микросхемах со встроенными в корпус прибора аккумуляторными батареями. В ряде случаев удобно применять двухблочные или одно-, двухблочные конструкции, в которых блок питания с преобразователем может быть отделен от самого дефектоскопа.

Для ультразвукового контроля на заводах и в полевых условиях необходимо, чтобы дефектоскопы могли работать как от электрической сети, так и от автономного источника тока, например от аккумуляторных батарей.

Первые дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-2, наиболее полно удовлетворяющие перечисленным требованиям, разработаны в НИИ мостов ЛИИЖТ в 1953 г. [23].

2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СОВРЕМЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

Технические возможности, габариты и надежность работы дефектоскопа во многом определяются его функциональной схемой. Импульсные ультразвуковые дефектоскопы, использующие один и тот же принцип работы, в большинстве своем основаны на различных функциональных схемах.

Функциональная схема, позволяющая создать компактный дефектоскоп с минимальным числом радиоэлементов и удовлетворяющий перечисленным выше требованиям, приведена на рис. 39 [43]. Выходы каскадов обозначены арабскими цифрами.

Дефектоскоп, собранный по данной схеме, позволяет вести контроль от поверхности на необходимую глубину («Контроль от поверхности») или контролировать определенный участок (слой) заданной величины («Контроль по слоям»), расположенный практически на любой глубине от поверхности. Индикация дефектов осуществляется по загоранию лампочки, появлению звука в наушниках и импульсы на экране.

Величина мертвой зоны при контроле сведена к минимуму благодаря введению селекции по времени и ограничению по минимуму эхо-сигналов, а также коррекции коэффициента усиления усилителя высокой частоты. Учитывая различие в размерах искателей, а также разброс коэффи-

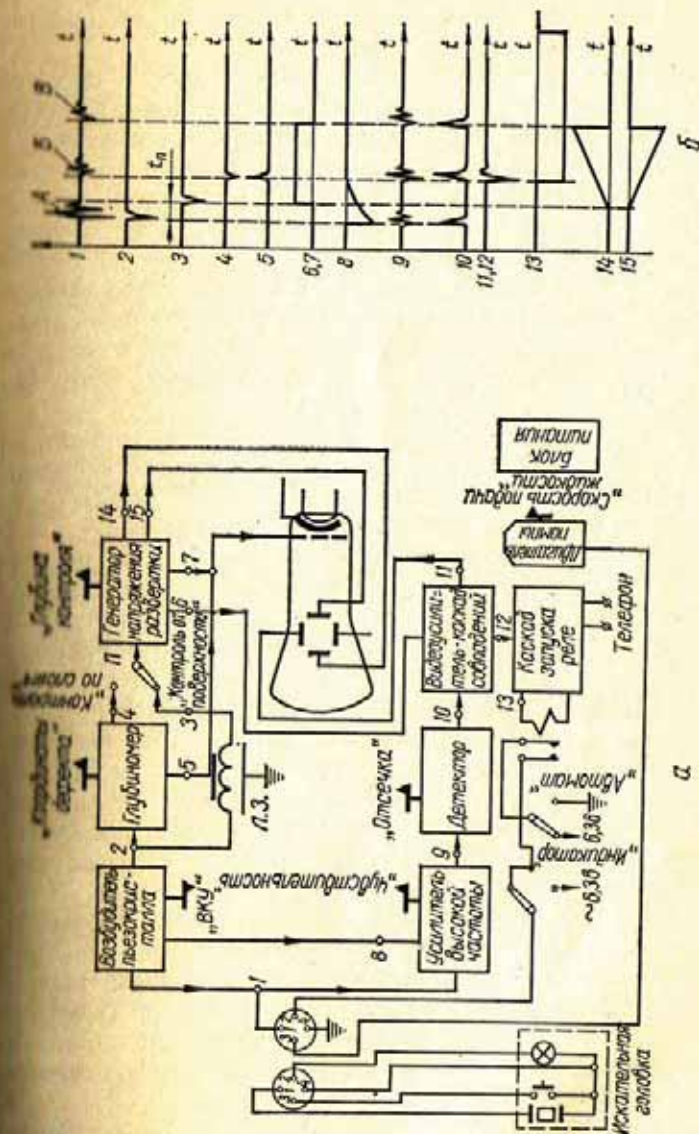


Рис. 39. Функциональная схема ультразвукового дефектоскопа для контроля сварных соединений (а) и формы импульсов на выходе различных каскадов (б): А — зондирующий импульс; Б — импульс от неровности на поверхности шва.

коэффициента затухания материала призмы и степени демпфирования пьезоэлемента в дефектоскопе предусмотрена плавная регулировка (ручка ВКУ) характера изменения во времени коэффициента усиления приемника.

Измерение координат отражающей поверхности производится с помощью глубиномера, проградуированного в миллиметрах для искателей с различными углами ввода луча.

Селекция во времени поступающих на вход приемника сигналов осуществляется в каскаде совпадений. Время открытого состояния каскада совпадений, а следовательно, и величина контролируемого участка определяется длительностью селектирующего импульса, подаваемого на каскад совпадений из генератора напряжения развертки. Расположение контролируемого слоя (участка) в металле зависит от сдвига во времени селектирующего импульса по отношению к зондирующему.

Селектирующий импульс, снимаемый с генератора напряжения развертки, используется также для подсвета линии развертки. Это обеспечивает работу осциллографического индикатора по схеме «лупы времени».

При работе дефектоскопа в режиме «Контроль от поверхности» запуск генератора напряжения развертки генератора стробимпульса) производится синхронизирующими импульсами, снимаемыми с возбудителя пьезокристалла (генератора радиопульсов) и прошедшими устройство задержки Л. З. Вследствие этого импульс подсвета и стробимпульс оказываются сдвинутыми во времени по отношению к зондирующему импульсу на время задержки. Очевидно, что время задержки должно быть не меньше длительности зондирующего импульса и не больше времени $2t_n$ прохождения ультразвукового импульса в призме искателя. При контроле изделий по слоям запуск генератора развертки производится с задержкой на необходимое время T , определяемое глубиной залегания контролируемого слоя. Запуск генератора в этом случае производится импульсом, поступающим из глубиномера (тумблер П в положении «Контроль по слоям»). При этом по шкале глубиномера устанавливаются координаты расположения начала контролируемого слоя.

Данная функциональная схема позволяет с помощью того же глубиномера устанавливать величину контролируемого слоя без специальной шкалы в генераторе селектирующих импульсов (генераторе напряжения развертки).

Очевидно, что введение дополнительной шкалы с механизмом вращения усложнило бы конструкцию дефектоскопа и привело бы к увеличению его габаритов.

Электромеханический индикатор (реле) обеспечивает возможность автоматизации контроля и регистрации результатов.

В дефектоскопе предусмотрена подача контактирующей жидкости к искателю и работа на переменном и постоянном токе. Индикаторная лампочка может переключаться в режим непрерывного горения для освещения при работе в затемненных местах.

Характерной особенностью данной схемы является выполнение нескольких функций одним каскадом. Так, например, возбудитель пьезокристалла предназначается для генерирования высокочастотных импульсов электрического напряжения, импульсов синхронизации и напряжения экспоненциальной формы, служащего для коррекции коэффициента усиления приемника во времени. Генератор напряжения развертки, помимо своего основного назначения, выполняет также роль генератора стробирующих импульсов. Каскад видеосушителя используется одновременно для селекции эхо-сигналов. С помощью глубиномера производится измерение координат дефектов, определение величины контролируемого слоя, а также расположение его на необходимой глубине при контроле по слоям.

Рассмотренная схема с некоторыми упрощениями впервые была осуществлена в 1953 г. в дефектоскопе УЗД-НИИМ-2 и положена в основу ультразвуковых дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5. Эффективность данной схемы подтверждается тем, что дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5, обладающие большими возможностями при контроле сварных соединений и смонтированные из типовых радиоэлементов, имеют меньшие габариты, вес и число радиоэлементов, чем другие приборы аналогичного назначения.

3. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Современные ультразвуковые дефектоскопы состоят из пяти основных узлов: возбудителя пьезоэлектрического преобразователя, приемного тракта, глубиномера, системы селекции и системы индикации. Электри-

ческие схемы этих узлов аналогичны широко применяемым в радиотехнике [11, 129]. В настоящем разделе рассмотрены принципиальные особенности построения данных узлов и некоторые практически используемые схемы.

Возбудитель пьезопреобразователя. Как уже упоминалось, получение ультразвуковых колебаний при дефектоскопии основано на преобразовании электрических импульсов в ультразвуковые с помощью пьезоэлектрических преобразователей, обладающих значительной емкостью (500—3000 пф). В связи с этим для возбуждения

ультраульковых колебаний удобно использовать генераторы с ударным возбуждением контура, в котором в качестве емкости используется пьезоэлектрическая пластина.

Принцип работы такого генератора (рис. 40) состоит в следующем. При включении постоянного напряжения E_0 конденсатор C_1 заряжается до некоторого напряжения U_0 , определяемого постоянной времени цепи заряда $\tau_{зар}$ ($\tau_{зар} \approx R_0 C_1$)* и временем, прошедшим от включения до замы-

кания ключа K . При замыкании ключа K конденсатор C_1 разряжается на контур через внутреннее сопротивление ключа R_k в течение некоторого времени $t_{зам}$. Затем ключ

вновь размыкается. Постоянная времени $\tau_{разр} \approx \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R_k$ и обычно значительно меньше $\tau_{зар}$.

Величина внутреннего сопротивления ключа при его замыкании уменьшается в течение какого-то времени $t_{уст}$ до $R_k = R_{k0}$ (рис. 40, б).

При разряде в контуре возникают затухающие электрические колебания с частотой $f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}$. (Емкость C_2 складывается из емкости пьезоэлектрической пластины, емкости кабеля, подключающего искатель к дефектоскопу, и

* Влиянием индуктивности L на заряд емкости C_1 пренебрегаем, так как постоянная времени заряда достаточно велика.

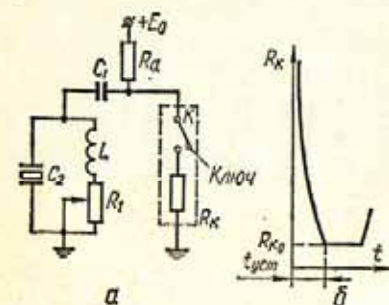


Рис. 40. Принципиальная схема генератора ультразвуковых импульсов (а) и график изменения внутреннего сопротивления ключа (б).

емкости монтажа). Вследствие этого в пьезоэлектрической пластине возбуждается импульс ультразвуковых колебаний.

Скорость затухания колебаний, а следовательно, и длительность зондирующих импульсов определяются добротностью контура и может регулироваться сопротивлением R_1 . Амплитуда и длительность колебаний, т. е. мощность импульса, при прочих равных условиях зависят от количества энергии, запасенной в емкости C_2 при разряде конденсатора C_1 , и от скорости разряда, т. е. от силы «удара». Поэтому для получения наибольшей мощности импульса следует подбирать оптимальные величины накопительной емкости C_{1opt} и времени замыкания ключа $t_{замopt}$. Оптимальные значения этих величин зависят от частоты возбуждаемых колебаний, емкости пьезоэлектрической пластины, типа ключа и могут быть определены опытным путем.

В качестве ключа в генераторах ультразвуковых дефектоскопов могут быть использованы механические прерыватели, вакуумные импульсные триоды, газонаполненные приборы (тиратроны и разрядники), переключающие диоды, тиристоры и т. п.

Внутреннее сопротивление прерывателя и триода достаточно мало. Поэтому амплитуда генерируемого импульса с увеличением накопительной емкости вначале резко растет, а далее, начиная с некоторой величины C_{1opt} (рис. 41), остается практически неизменной. В то же время амплитуда возбуждаемых колебаний весьма сильно зависит от длительности замкнутого состояния прерывателя или триода. Оптимальное значение длительности τ замкнутого состояния обуславливается частотой f_0 генерируемых колебаний.

Время открытого состояния тиратрона в отличие от триода невозможно регулировать изменением напряжения на его сетках, так как после замыкания тиратрона сетки теряют свои управляющие свойства. Погасить, т. е. разомкнуть тиратрон, можно только путем уменьшения напряжения на аноде до определенной величины, называемой напряжением погасания.

Время, в течение которого напряжение на аноде тиратрона падает до величины напряжения погасания, т. е. время открытого состояния тиратрона, определяется величиной накопительной емкости C_1 . В связи с этим амплитуда импульса, возбуждаемого генератором на тиратроне (или разрядни-

ке), зависит от величины накопительной емкости (рис. 42). Каждому типу тиратрона (разрядника) при определенной резонансной частоте контура соответствует свое оптимальное значение разрядной емкости, обеспечивающей генерирование ультразвуковых импульсов максимальной мощности.

Как отмечалось в предшествующем разделе, длительность зондирующего импульса определяет разрешающую способность, а в ряде случаев и мертвую зону дефектоскопа. Для уменьшения длительности зондирующих импульсов может быть использован способ, основанный на подавлении части

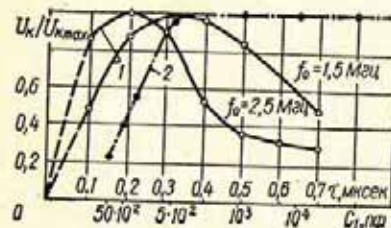


Рис. 41. Экспериментальные зависимости амплитуды U_k генерируемых импульсов в ударном контуре, возбуждаемом триодом, от длительности τ синхронизирующих импульсов при накопительной емкости $C_1 = 1000$ пф (1) и величины накопительной емкости (2).

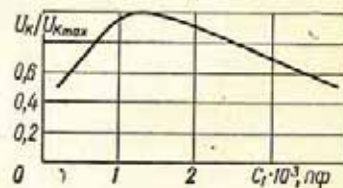


Рис. 42. Экспериментальная зависимость амплитуды генерируемых импульсов в ударном контуре, возбуждаемом тиратроном, от величины накопительной емкости C_1 .

зондирующего импульса вторым импульсом, аналогичным зондирующему, но обратным по фазе [160.] Этот импульс, поданный на преобразователь, как бы вторично возбуждает его через время, равное заданному числу полупериодов. Образующиеся при этом свободные колебания в преобразователе, накладываясь друг на друга, взаимно вычитаются и, таким образом, получается короткий акустический сигнал. Однако реализация такого способа наталкивается на серьезные технические трудности [129] и осложняет эксплуатацию прибора.

Менее эффективным, но достаточно простым способом сокращения длительности зондирующих импульсов является снижение добротности контура после первого полупериода колебаний с помощью шунтирующего диода [21].

Недостатком генераторов с ударным контуром является весьма широкий спектр возбуждаемого электрического им-

пульса. Более узкий спектр имеют высокочастотные импульсы прямоугольной и колоколообразной формы. Генераторы таких импульсов существенно сложнее генераторов ударного действия. Поэтому их применяют в приборах, к которым не предъявляется ограничений по габаритам и потребляемой мощности, например в установках для автоматического контроля [105].

Импульс, возникающий на аноде ключа генератора, удобно использовать для синхронизации работы остальных каскадов дефектоскопа, а также для получения импульса экспоненциальной формы, служащего для изменения во времени коэффициента усиления приемника [32].

Приемный тракт дефектоскопа предназначен для усиления импульсов электрических колебаний, возникающих на пьезоэлектрической пластине искателя при возвращении эхо-импульсов от дефектов. Сигнал на выходе приемника должен быть такой величины, чтобы обеспечивалось устойчивое срабатывание индикаторов. При использовании в качестве индикатора осциллографической трубки максимальная величина выходного сигнала может не превышать значения, при котором изображение импульса от дефекта укладывается в видимой части экрана, т. е.

$$U_{\text{вых max}} \approx \frac{D}{2S},$$

где D — рабочий диаметр экрана, мм; S — чувствительность трубки, мм/в.

Естественно, что на индикаторы не должны проникать сигналы шума, вызванные реверберацией ультразвука в металле и имеющие обычно значительно меньшую амплитуду, чем полезный эхо-сигнал от дефекта. Для этого в приемном тракте должен быть предусмотрен ограничитель, отсекающий шумы, т. е. сигналы, имеющие малую амплитуду. Идентифицированная амплитудная характеристика, удовлетворяющая перечисленным требованиям, и наиболее распространенная скелетная схема приемного тракта приведены на рис. 43.

Приемный тракт должен обеспечить прием и усиление эхо-сигналов на заданной частоте, представляющих собой короткие высокочастотные импульсы. Длительность импульсов определяется выражением

$$\tau_c = \tau + \frac{2l}{c}, \quad (41)$$

где τ_c — длительность эхо-сигнала; τ — длительность зондирующего импульса; l — разность расстояний от пьезоэлектрической пластины до дальней и ближней границ отражающей поверхности; C — скорость ультразвуковой волны.

При озвучивании одиночных небольших дефектов или дефектов плоских, расположенных перпендикулярно лучу, длительность эхо-сигналов близка к длительности зондирующих импульсов.

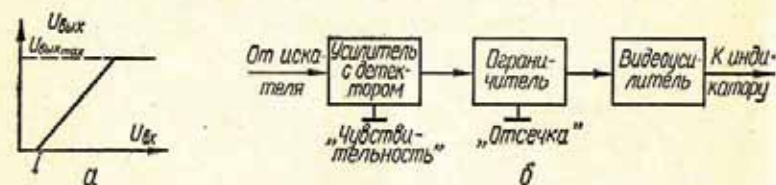


Рис. 43. Идеализированная амплитудная характеристика (а) и скелетная схема (б) приемника ультразвукового дефектоскопа для контроля сварных соединений:
 l — порог ограничения шумов.

Искажения формы сигналов в процессе усиления должны быть достаточно малы. При этом в первую очередь необходимо обеспечить малое время нарастания и спада напряжения сигнала на выходе приемника.

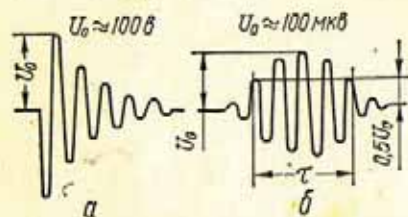


Рис. 44. Осциллограммы напряжений на пьезоэлектрической пластине искателя при возбуждении зондирующего импульса (а) и возвращении эхо-сигнала (б).

Время нарастания сигнала в усилителе обратно пропорционально полосе пропускания. Поэтому полосу пропускания обычно выбирают возможно меньшей, при которой искажения сигнала усилителем не выходят за пределы допустимых значений.

Величина минимально допустимой полосы зависит от формы огибающей и

импульса практически без искажений, определяют по формуле

$$\Delta f = \frac{1}{\tau}, \quad (42)$$

где Δf — полоса пропускания приемного тракта на уровне 0,7; τ — активная длительность импульса, т. е. длительность импульса на уровне 0,5.

Коэффициент усиления K приемного тракта должен быть достаточным для того, чтобы довести напряжение наиболее слабых эхо-сигналов от дефектов до величины, достаточной для регистрации с помощью индикаторов.

Амплитуда эхо-сигналов от дефектов малой величины составляет в зависимости от мощности зондирующего импульса 20—200 мкВ. При такой величине входного сигнала необходимый коэффициент усиления приемного тракта

$$K \approx \frac{U_{\text{вых min}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{\frac{1}{5} U_{\text{вых max}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{\frac{1}{5} \cdot 170}{(20 \div 200) \cdot 10^{-6}} \approx (0,2 \div 2) \cdot 10^6,$$

где $U_{\text{вых min}}$ — минимальная величина выходного сигнала, при котором изображение импульса на экране трубки составляет $1/5$ диаметра экрана; $U_{\text{вх}}$ — величина сигнала на входе приемника.

При включении искателей по совмещенной схеме на вход усилителя, кроме эхо-сигналов малой величины, поступают зондирующие импульсы, амплитуда которых измеряется иногда сотнями вольт. Прохождение мощных импульсов вызывает заряд переходных емкостей между каскадами и запирает усилитель на некоторое время. Поэтому должны быть приняты все необходимые меры для предотвращения перегрузки усилителя и быстрого восстановления его усиления. Это необходимо для обнаружения дефектов, расположенных на малой глубине, а также для выявления небольших дефектов, находящихся в непосредственной близости от дефекта значительных размеров.

Перегрузка усилителя из-за воздействия зондирующего импульса может быть значительно снижена, если между искателем и входом приемника поставить цепочку (рис. 45) из сопротивления или индуктивности и двух

диодов. Эта цепочка шунтирует сигналы большой величины, т. е. зондирующие импульсы, и без ослабления передает на вход приемника слабые сигналы, т. е. эхо-сигналы от дефектов.

Весьма эффективным способом уменьшения перегрузки приемного тракта является также метод коррекции усиления УВЧ во времени путем изменения напряжения во входном каскаде усилителя.

Для уменьшения времени восстановления усилителя в случае его перегрузки в приемном тракте обычно приме-

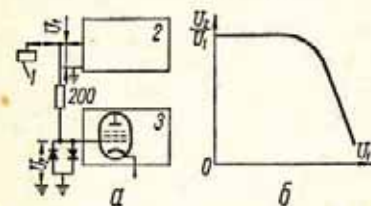


Рис. 45. Схема включения цепочки, предотвращающей проникновение зондирующего импульса на вход приемника (а) и ее передаточная характеристика (б): 1 — искатель; 2 — генератор электрических импульсов; 3 — приемник.

редачи напряжения при наименьших искажениях импульса.

Видеоусилитель обычно выполняют по реостатной схеме с корректирующей индуктивностью; предназначен он для усиления продетектированных импульсов.

Весьма целесообразно использовать видеоусилитель как каскад совпадений для селекции во времени поступающих на вход приемника сигналов.

Ограничение сигналов по минимуму осуществляется при детектировании эхо-сигналов или после него в видеоусилителях. Приемный тракт современных дефектоскопов выполняется как на радиолампах, так и на транзисторах.

Глубиномер. Основное назначение глубиномера — определение координат отражающей поверхности. В дефектоскопе, функциональная схема которого приведена на рис. 39, глубиномер используется также при регулировке величины контролируемого слоя и расположении его на заданной глубине при контроле изделия по участкам.

В основу работы глубиномера дефектоскопа положено измерение интервала времени между моментом излучения зондирующего и приема отраженного импульсов.

Интервал времени может быть грубо оценен по расположению отраженного импульса на экране трубки. Более точно интервал времени определяют путем сравнения его величины с длительностью периодических колебаний по «неподвижным» меткам времени либо со временем задержки зондирующего импульса в специальном устройстве с помощью «перемещаемой» метки времени.

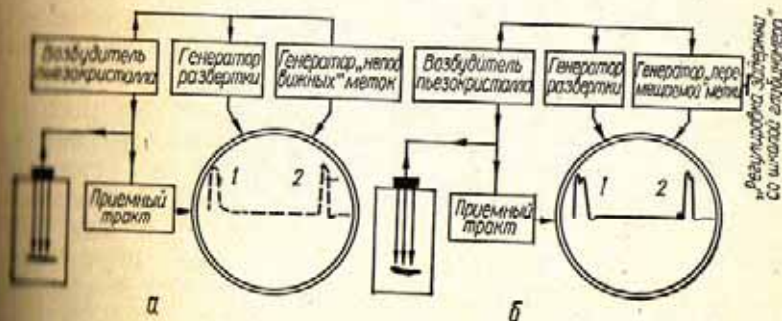


Рис. 46. Блок-схема дефектоскопа с генератором: а — «неподвижных» меток; б — «перемещаемой» метки; 1 — зондирующий импульс; 2 — импульс от дефекта.

В первом случае на линии развертки воспроизводится серия «неподвижных» меток, вырабатываемых специальным генератором (рис. 46, а). По периоду колебаний генератора меток и по числу меток между зондирующим и отраженным импульсами определяют интервал времени. Этот метод неудобен тем, что требует особой внимательности, а также значительной затраты времени на измерение интервала времени и пересчет его в интересующие оператора координаты отражающей поверхности.

Во втором случае время измеряется по «перемещаемой» метке, воспроизводимой также на развертке трубки (рис. 46, б). Перемещаемая метка может сдвигаться во времени по отношению к зондирующему импульсу на необходимую величину, отсчитываемую по шкале генератора метки. При совмещении метки на развертке с импульсом, отраженным от дефекта, временной сдвиг

метки приравняется временному сдвигу эхо-импульса, чем и устанавливается значение определяемого интервала времени. Для непосредственного отсчета координат

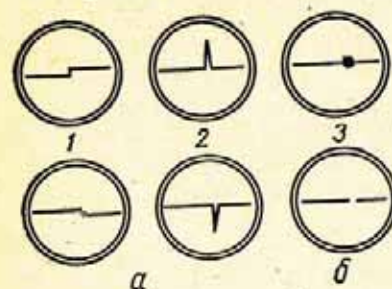


Рис. 47. Перемещаемые метки, обусловленные:

а — отклонением луча электронно-лучевой трубки; б — изменением яркости луча.

получать высокую точность совмещения ее с передним фронтом импульса. В качестве генератора перемещаемой метки могут быть использованы устройства задерж-

отражающей поверхности шкала генератора метки градуируется не только в микро-секундах, но и в миллиметрах глубины и расстояния отражающей поверхности от искателя [32].

Перемещаемая метка (рис. 47) может представлять собой ступеньку 1, выброс 2 (импульс) или точку 3 (яркую или темную). Метка в виде яркой точки хорошо различима на развертке, не искажает формы импульса и позволяет

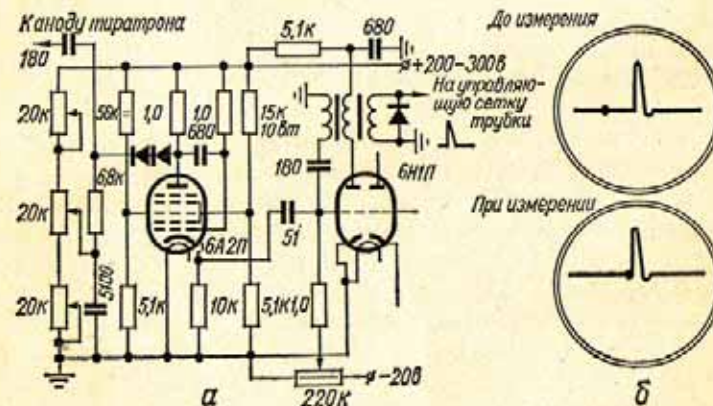


Рис. 48. Схема глубиномера (а) и экран (б) дефектоскопа УЗД-НИИМ-2.

ки: ультразвуковая линия; ждущий генератор импульса регулируемой длительности; линия из индуктивно-емкостных ячеек.

Глубиномеры с ультразвуковой линией задержки весьма сложны по конструкции и в эксплуатации, имеют

значительные габариты и поэтому не могут быть рекомендованы для применения в современных дефектоскопах. Более целесообразным является использование в качестве устройства задержки генераторов импульсов регулируемой длительности. На рис. 48 показана схема электронного глубиномера, впервые примененного в дефектоскопе УЗД-НИИМ-2 [23]. Электронный глубиномер позволяет получать необходимую точность отсчета, имеет равномерную шкалу, что упрощает процесс

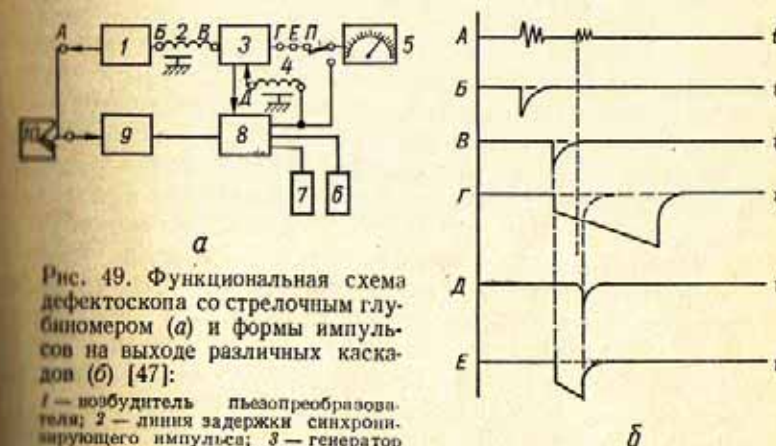


Рис. 49. Функциональная схема дефектоскопа со стрелочным глубиномером (а) и формы импульсов на выходе различных каскадов (б) [47]:

1 — возбуждатель пьезопреобразователя; 2 — линия задержки синхронизирующего импульса; 3 — генератор селектирующих импульсов; 4 — линия задержки эхо-сигналов; 5 — амплитудный вольтметр; 6 и 7 — звуковой и световой индикаторы; 8 — селектирующий каскад (каскад совпадения); 9 — усилитель с детектором; 10 — искатель.

его изготовления и настройки, а также не требует стабилизации источника питания. В настоящее время все отечественные дефектоскопы в отличие от зарубежных снабжены электронными глубиномерами с перемещаемой меткой.

Весьма перспективными, особенно для работы в полевых условиях при большой освещенности, являются глубиномеры со стрелочным прибором.

Для определения координат выявленных дефектов по стрелочному прибору необходимо вначале преобразовать интервал времени распространения ультразвукового импульса в металле до дефекта в электрическое напряжение и затем измерить это напряжение с помощью стрелочного вольтметра. Принцип построения дефектоскопа со стрелочным

глубиномером поясняется рис. 49 [47]. В дефектоскопе со стрелочным глубиномером, как и в дефектоскопе с электронно-лучевой трубкой, генератор селективирующих импульсов 3 запускается через линию задержки 2, благодаря чему начало селективирующих импульсов сдвинуто по отношению к зондирующим на время прохождения ультразвука в призме искателя. Для упрощения конструкции дефектоскопа генератор селективирующих импульсов может быть собран по схеме ждущего генератора, например фантастрона, генерирующего одновременно селективирующий импульс прямоугольной формы и пилообразный импульс, амплитуда которого пропорциональна его длительности. Амплитуда пилообразного импульса измеряется амплитудным вольтметром 5 (переключатель П в верхнем положении), шкалы которого проградуированы в микросекундах и в линейных значениях координат дефекта. В связи с этим в обычном состоянии при включенном дефектоскопе глубиномер указывает максимальную глубину прозвучивания, установленную ручкой в генераторе селективирующих импульсов. Эхо-сигналы от дефекта воспринимаются искателем 10, поступают на вход усилителя 9, усиливаются до необходимой величины, детектируются и подаются на селективирующий каскад (каскад совпадений) 8. С выхода этого каскада эхо-сигналы от дефекта поступают на звуковой 6 и световой 7 индикаторы и через линию задержки 4 — на генератор селективирующих импульсов, срывая работу последнего. В связи с этим в момент обнаружения дефекта стрелка прибора отклонится и укажет координаты выявленного дефекта. Линия задержки 4 обеспечивает надежное прохождение эхо-сигналов от дефекта через каскад совпадений. Если переключатель П установить в нижнее положение, то с помощью вольтметра 5 можно оценивать также и амплитуду эхо-сигналов от дефекта.

Рассмотренная функциональная схема использована при создании первых ультразвуковых дефектоскопов со стрелочными глубиномерами УЗД-НИИМ-9 [32] и УЗД-НИИМ-6М [50].

Следует отметить, что при построении шкал любых глубиномеров не следует разбивать измеряемый интервал на слишком большое число делений. Вполне достаточно, чтобы число делений N на шкале с пределом измерений D составляло [90]:

$$N = \frac{D}{0,5\sigma}, \quad (43)$$

где σ — среднеквадратическая погрешность метода измерения координат (см. гл. VI).

Индикаторы. Как указывалось, в дефектоскопах для регистрации дефектов применяют осциллографические, электромеханические, звуковые, оптические и стрелочные индикаторы.

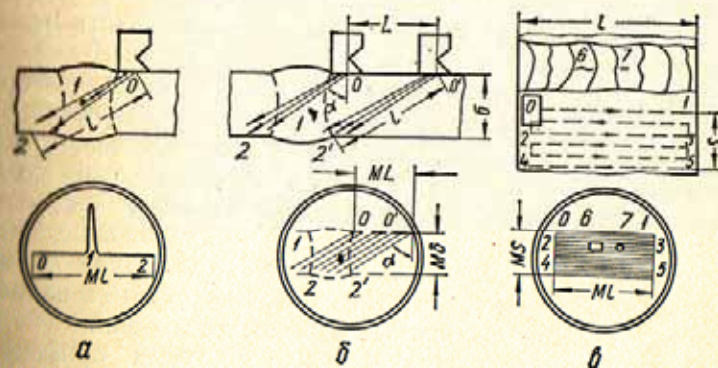


Рис. 50. Осциллографические индикаторы: а — типа А; б — типа В; в — типа С; М — масштаб изображения.

По типу применяемой развертки различают осциллографические индикаторы: с прямой разверткой по дальности (тип А); с разверткой «дальность — расстояние искателя от шва» (тип В); с разверткой «положение искателя по длине шва — расстояние искателя от шва» (тип С).

В индикаторах типа А (рис. 50, а) электронный луч под действием напряжения развертки, подаваемого на горизонтально отклоняющие пластины, описывает на экране трубки прямую линию (линию развертки). Напряжение видеосигналов, подаваемое с выхода приемника на вертикально отклоняющие пластины, используется для отклонения луча, в результате чего на линии развертки появляются пики, местоположение которых позволяет судить о расстоянии до отражающих поверхностей. Следует отметить, что степень линейности развертки индикаторов типа А в дефектоскопах, имеющих глубиномер с перемещаемой меткой, не играет существенной роли.

В индикаторах типа В (рис. 50, б) линия развертки ориентирована под углом α , соответствующим углу ввода ультразвукового луча в шов; линия развертки смещается в горизонтальном направлении синхронно с перемещением искателя перпендикулярно шву. Горизонтальное смещение развертки осуществляется под воздействием напряжения, вырабатываемого датчиком положения искателя. Видео-сигналы с выхода приемника используются для модуляции яркости электронного луча, благодаря чему на экране появляются точки, резко отличающиеся по яркости, указывающие координаты расположения дефектов, выявляемых в контролируемом сечении.

В индикаторах типа С так же, как и в индикаторах типа В, осуществляется яркостная отметка принятых эхо-сигналов. Конец электронного луча прочерчивает растр под воздействием напряжений двух датчиков: один датчик вырабатывает напряжение, пропорциональное смещению искателя по длине шва, а другой — напряжение, пропорциональное расстоянию от точки ввода луча до шва (рис. 50, в). По индикатору типа С можно судить о наличии дефектов и расположении их в плане соединения.

В дефектоскопах для ручного контроля применяют индикаторы типа А. Индикаторы типа В и С могут быть использованы при механизированном и автоматическом контроле (см. гл. XII).

Электромеханические, звуковые и оптические индикаторы представляют собой электронные реле, нагрузкой которых является соответственно электромеханическое реле, звуковой или световой сигнализатор [32, 129]. Эту группу индикаторов часто называют «автоматические сигнализаторы дефектов» или сокращенно «АСД».

В качестве электронного реле используют триггеры, ждущие генераторы импульсов, ключевые схемы с пиковым детектором и т. п. Электронное реле, включаемое в дефектоскопах на выходе селектирующей системы, запускается эхо-сигналами, поступающими одновременно и на осциллографический, и на стрелочный индикаторы. Для настройки чувствительности электромеханического, звукового и светового индикаторов в дефектоскопах предусматривают специальный регулятор, именуемый обычно «Чувствительность АСД».

Автоматические сигнализаторы дефектов в отличие от осциллографического обладают большей инерцион-

ностью. Это значит, что данные индикаторы срабатывают только через определенное время t_n , в течение которого на вход электронного реле поступали сигналы с выхода селектирующей системы, и продолжают работать в течение некоторого времени t_n после окончания поступления этих сигналов.

При заданной частоте излучения зондирующих импульсов F инерционность удобно характеризовать числом N импульсов, необходимых для срабатывания индикатора. Очевидно, что

$$N = t_n F. \quad (44)$$

При большой инерционности могут быть пропущены некоторые дефекты, так как индикаторы не успеют сработать за время выявления дефекта при перемещении искателя.

В дальнейшем условимся характеризовать инерционность индикатора минимальным числом N импульсов, при поступлении которых на вход индикатора он срабатывает. Необходимо, чтобы инерционность индикатора не зависела от амплитуды и формы эхо-сигналов. Для этого на вход индикатора следует подавать предварительно нормализованные по амплитуде и длительности эхо-сигналы. Нормализация эхо-сигналов может быть легко осуществлена введением между селектирующей системой и индикатором каскада нормализации, выполненного по схеме ждущего генератора импульсов, например по схеме блокинг-генератора.

Длительность t_n должна быть достаточной, чтобы оператор был в состоянии воспринять сигналы индикатора при обнаружении дефектов малой протяженности, но и не слишком большой, чтобы можно было по сигналам индикатора отличать рядом расположенные дефекты.

Система селекции сигналов. При наличии в приемном тракте дефектоскопа каскада совпадений величина и местоположение слоя, подвергаемого контролю, обуславливаются параметрами стробимпульса. В качестве стробимпульса удобно использовать импульс подсвета, вырабатываемый генератором развертки дефектоскопа.

В дефектоскопах для проверки качества швов должны быть предусмотрены два режима работы:

1) контроль изделия (шва) на определенную глубину, начиная от поверхности, на которой установлен искатель («Контроль от поверхности»);

2) контроль изделия (шва) на любом участке его толщины («Контроль по слоям»).

Чтобы в режиме «Контроль от поверхности» при работе призматическими искателями на индикаторы не проникал посылочный импульс, запуск генератора селективирующего импульса (генератора развертки) должен производиться синхронизирующими импульсами, снимаемыми с генератора ультразвуковых колебаний и прошедшими устройство задержки. Наиболее целесообразным с точки зрения стабильности работы и габаритов является выполнение устройства задержки в виде линии из нескольких индуктивно-емкостных ячеек.

При контроле изделий по слоям запуск генератора селективирующего импульса (генератора развертки) должен производиться с задержкой на время, определяемое глубиной расположения контролируемого слоя. В этом случае для запуска генератора целесообразно использовать импульс глубиномера, по шкале которого всегда можно определить глубину расположения контролируемого участка.

4. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ

Первыми ультразвуковыми дефектоскопами, использованными в отечественной промышленности для контроля качества сварных соединений, были дефектоскопы УЗД-7, разработанные ЦНИИТмаш в 1950—1953 гг. [9].

В 1953—1954 гг. НИИ мостов ЛИИЖТ была обособлена функциональная схема специализированных ультразвуковых дефектоскопов для контроля качества сварных соединений и созданы их первые образцы — дефектоскопы УЗД-НИИМ-2 [23, 26]. Дефектоскоп УЗД-НИИМ-2, блок-схема которого приведена на рис. 51, работает на частоте 2,5 Мгц. Индикация дефектов производится посредством телефонных наушников и электроно-лучевой трубки; в дефектоскопе предусмотрена возможность рассматривать на экране как всю толщину контролируемого шва («Контроль от поверхности»), так и по отдельным выбираемым участкам («Контроль по слоям»); величина участка регулируется в пределах от 10 до 50 мм. Благодаря наличию электро-механического индикатора (реле), срабатывающего при

обнаружении дефектов, прибор позволяет ввести в процесс контроля элементы автоматизации (отметку дефектного места на изделии, регистрацию документа и т. п.).

В дефектоскопе имеется электронный глубиномер со шкалами непосредственного отсчета глубины залегания дефектов при работе наклонными искателями с различными углами ввода луча. Прибор двухблочный. Питается дефектоскоп от блока питания, подключаемого к сети переменного тока. Вес дефектоскопа 6 кг, габариты 340 × 230 × 200 мм.

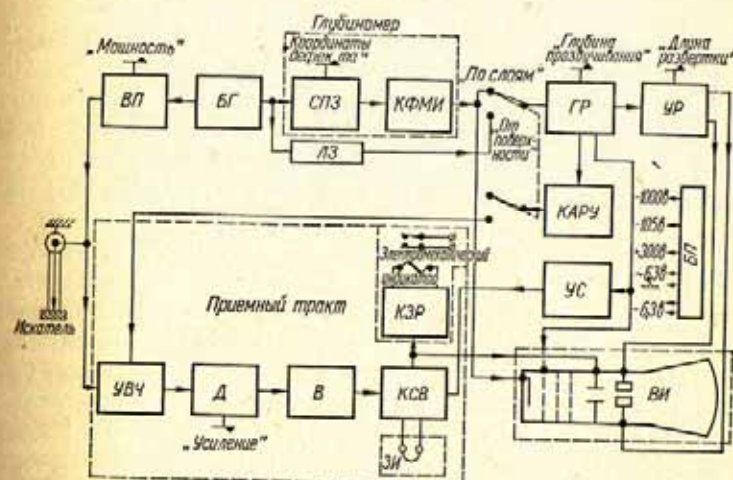


Рис. 51. Блок-схема ультразвукового дефектоскопа УЗД-НИИМ-2.

ВП — возбудитель пьезокристалла; БГ — блокинг-генератор; СПЗ — схема переменной задержки; ЛЗ — линия задержки; КФМИ — каскад формирования маркерного импульса; ГР — генератор развертки; УР — усилитель развертки; КАРУ — каскад автоматической регулировки усиления; БП — блок питания; УС — усилитель стробимпульса; ВИ — визуальный индикатор; КЗР — каскад запуска реле; КСВ — каскад совпадения видеоусилителя; ЗИ — звуковой индикатор; Д — детектор; УВЧ — усилитель высокой частоты; В — видеоусилитель.

Дефектоскопы УЗД-НИИМ-2, не имеющие автономного питания и обладающие все еще значительными габаритами, были неудобны для контроля сварных соединений, расположенных на высоте и в труднодоступных местах и не могли быть использованы в полевых условиях. В связи с этим в 1955—1956 гг. на базе дефектоскопа УЗД-НИИМ-2 разработан двухблочный дефектоскоп УЗД-НИИМ-3 [26]. Вес этого дефектоскопа около 4 кг, габариты 270 × 250 ×

80 мм. При работе дефектоскоп располагают на груди оператора с помощью специальных ремней.

Габариты, вес и потребляемая мощность дефектоскопа УЗД-НИИМ-3 снижены по сравнению с УЗД-НИИМ-2 за счет исключения дополнительных индикаторов (звукового и электромеханического). Индикация наличия дефекта производится по импульсам, возникающим на экране трубки.

По чувствительности, измерению глубины и контролю по слоям УЗД-НИИМ-3 не отличается от УЗД-НИИМ-2.

Питается прибор от сети переменного тока или аккумуляторной батареи напряжением 12 в.

Используя принципиальные и конструктивные решения, положенные в основу приборов УЗД-НИИМ-2 и УЗД-НИИМ-3, в 1957—1964 гг. был разработан ряд специализированных дефектоскопов для контроля сварных швов (УЗД-НИИМ-5, УЗД-НИИМ-6, УЗД-НИИМ-9, УЗД-НИИМ-10). Опытно-конструкторская разработка дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 (ДУК-11ИМ, ДУК-13ИМ) и УЗД-НИИМ-6М выполнена ВНИИНК.

В 1964—1967 гг. ЦНИИТмаш создает дефектоскопы УЗД-13 для послойного контроля, первые отечественные дефектоскопы на транзисторах УДЦ-21Т и приставки к дефектоскопам для измерения амплитуды эхо-сигналов ИД-1 и ИД-2. В этот же период в СССР и за рубежом были разработаны универсальные ультразвуковые дефектоскопы [160, 181] и дефектоскопы узкого назначения [87]. Из этих дефектоскопов в Советском Союзе для контроля качества сварных соединений нашли применение приборы УДМ-1М и ДУК-66П конструкции ВНИИНК.

Рассмотрим более подробно специализированные дефектоскопы, а также универсальные приборы УДМ-1М и ДУК-66П, используемые для дефектоскопии сварных соединений.

Ультразвуковые дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5 [45, 48]. Ультразвуковые дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5 охватывают группу приборов (УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60, ДУК-11ИМ и ДУК-13ИМ), выполненных по единой функциональной схеме (см. рис. 39) и отличающихся только электрическими схемами и конструктивным исполнением.

Приборы работают на частотах 1,8 и 2,5 Мгц. Индикация дефектов производится по импульсам, возникающим на экране электронно-лучевой трубки, загоранию лампочки, расположенной на искателе, а также по появлению звука в телефонных наушниках. Световой и звуковой

индикаторы повышают надежность контроля. В дефектоскопах ДУК-13ИМ в целях снижения потребляемой мощности световой индикатор отсутствует.

Чувствительность дефектоскопов регулируется в широких пределах и обеспечивает выявление дефектов в стали с эквивалентной площадью 2—3 мм² на глубине до 100 мм. Плавная регулировка коэффициента усиления приемного тракта во времени улучшает возможность обнаружения дефектов, расположенных на малой глубине. Мертвая зона приборов при работе с дополнительными индикаторами не превышает 8 мм для искателей с углом призмы 30 и 40° и 3 мм для искателей с углом призмы 50°.

Для определения координат дефектов, а также для измерения толщины изделий в дефектоскопе имеется электронный глубиномер с восемью шкалами: четыре — для измерения глубины при работе прямым искателем и наклонными с углами падения луча 30, 40 и 50°, тремя — для измерения расстояния отражающей поверхности от центра излучения искателя с теми же углами и одной — для измерения времени прохождения ультразвукового импульса от пьезоэлектрической пластины искателя до отражающей поверхности и обратно.

Для определения места расположения отражающей поверхности, вращая ручку глубиномера, подводят яркую точку на линии развертки к началу импульса и по шкалам, соответствующим применяемому типу искателя, отсчитывают координаты отражающей поверхности.

Наличие электронной лупы позволяет вести контроль толщины изделий по слоям. Величина контролируемого слоя регулируется в пределах от 8 до 500 мм. Расположенную на искателе лампочку можно использовать как для индикации обнаруженных дефектов, так и для освещения при работе в затемненных местах; в последнем случае в качестве дополнительного индикатора применяют телефонные наушники.

Прибор УЗД-НИИМ-5А состоит из дефектоскопа и выпрямителя, которые могут быть состыкованы в один

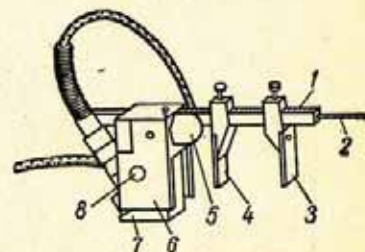


Рис. 52. Головка для контроля сварных швов.

блок или соединены 15-метровым кабелем питания. Габариты дефектоскопа $290 \times 210 \times 200$ мм, вес около 6 кг; габариты блока питания $210 \times 200 \times 120$ мм, вес около 5,5 кг. Питается прибор от сети переменного тока напряжением 36, 127 или 220 в, а также от аккумуляторной батареи напряжением 12 в.

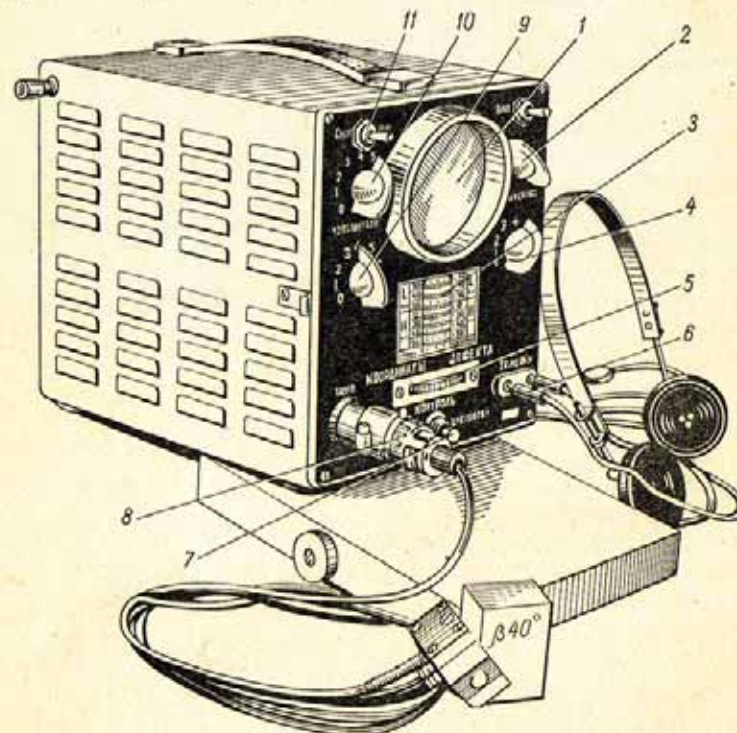


Рис. 53. Ультразвуковой дефектоскоп типа УЗД-НИИМ-5 (УЗД-60):

1 — экран; 2 — ручка «Глубина контроля», регулирующая величину контролируемого слоя; 3 — шкала глубиномера с линзой; 4 — ручка регулировки длины развертки; 5 — ручка «Координаты дефекта»; 6 — гнезда для включения телефонных наушников; 7 — тумблер для установки одного из следующих режимов контроля: «Контроль от поверхности» или «Контроль по слоям»; 8 — разъем для подключения кабеля искателя; 9 — ручка регулировки характера изменения чувствительности во времени; 10 — ручка регулировки чувствительности (аттенуатор на входе приемника); 11 — тумблер для перевода лампочки, расположенной у искателя, из режима индикатора в режим непрерывного горения.

В приборе УЗД-НИИМ-5А предусмотрена специальная помпа с двигателем, которая подает к искателю контактирующую жидкость (масло, технический глицерин).

заливаемую в бачок, размещенный в дефектоскопе. К нему придается специальная головка для контроля стыковых и угловых сварных швов. Головка (рис. 52) состоит из корпуса 6, в котором устанавливается искатель 7, винта 8, крепящего искатель в корпусе, лампочки с фарой 5, линейки 1 с миллиметровыми делениями, ограничителей 3, 4 и штока 2. В корпусе головки сделаны отверстия для подвода контактирующей жидкости под искатель и установлена кнопка включения двигателя помпы.

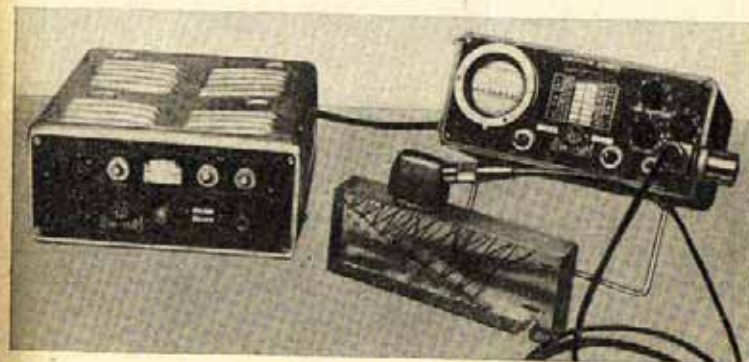


Рис. 54. Ультразвуковой дефектоскоп ДУК-13ИМ.

Дефектоскопы УЗД-59, УЗД-60 и ДУК-11ИМ, не differing по расположению органов управления на лицевой панели, представляют собой одноблочные приборы (рис. 53). Вес их около 10 кг.

Дефектоскоп ДУК-13ИМ (рис. 54) отличается от рассмотренных отсутствием индикаторной лампочки. Габариты дефектоскопа $270 \times 230 \times 110$ мм, вес около 4 кг. В зависимости от условий работы он может устанавливаться в горизонтальном положении на откидной ножке или укрепляться ремнями на груди оператора.

Прибор работает от сети переменного тока напряжением 220 или 36 в, а также от аккумуляторной батареи напряжением 12 в. При работе от сети дефектоскоп подключается к блоку питания. Этот же блок питания рассчитан на подзарядку аккумуляторных батарей, прилагаемых к дефектоскопу.

Дефектоскопы УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60 и ДУК-11ИМ собраны на электронных лампах пальчиковой

серии по аналогичным электрическим схемам (рис. 55), дефектоскоп ДУК-13ИМ — в основном на полупроводниковых элементах с использованием электронных ламп стержневой конструкции (рис. 56).

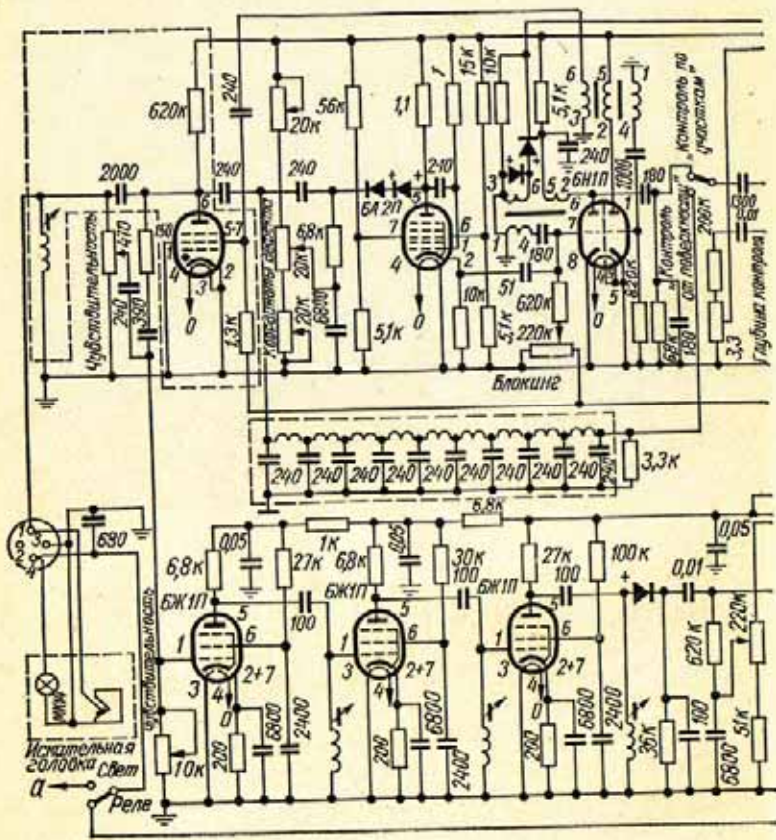


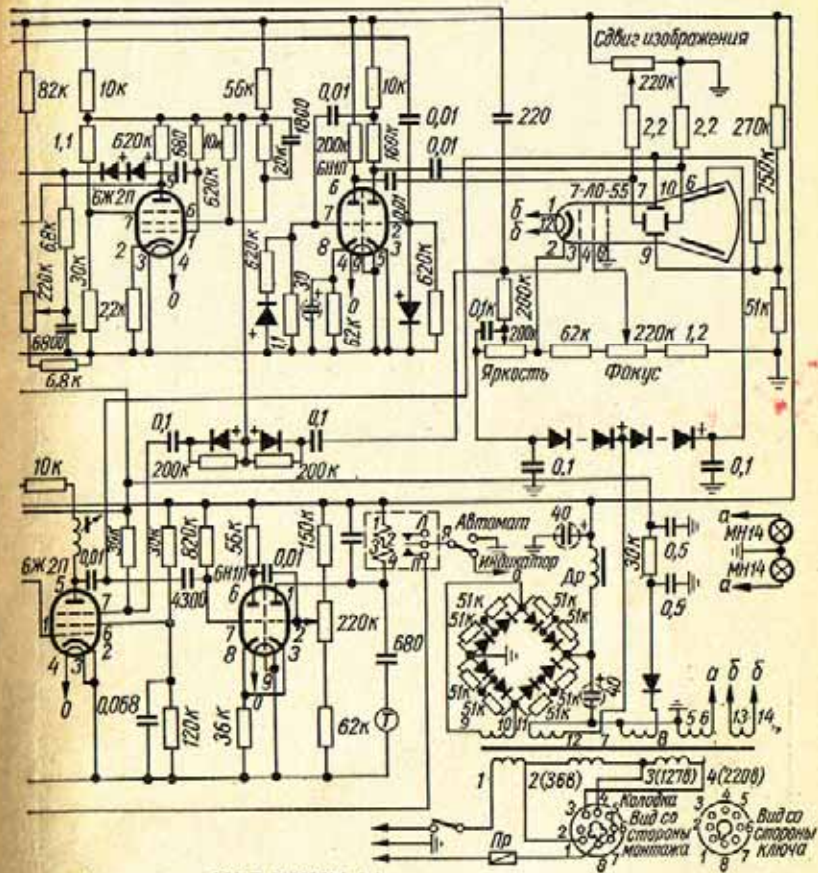
Рис. 55. Электрическая схема

Основными узлами дефектоскопов являются: искатель, возбудитель пьезопреобразователя, усилитель высокой частоты с детектором, видеоусилитель-каскад совпадений, генератор напряжения развертки, глубиномер, осциллографический индикатор, дополнительные индикаторы, блок питания.

Возбудитель пьезопреобразователя предназначен для

90

генерирования высокочастотных электрических импульсов, импульсов синхронизации и напряжения экспоненциальной формы, используемого для коррекции коэффициента усиления приемного тракта во времени.



дефектоскопа УЗД-НИИМ-5А.

Возбудители пьезопреобразователей в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 собраны по схеме генератора с контуром ударного возбуждения на тиратроне (УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60, ДУК-11ИМ) или полупроводниковом диоде (ДУК-13ИМ).

Усилитель высокой частоты (УВЧ) в дефектоскопах на электронных лампах представляет собой трехкаскадный

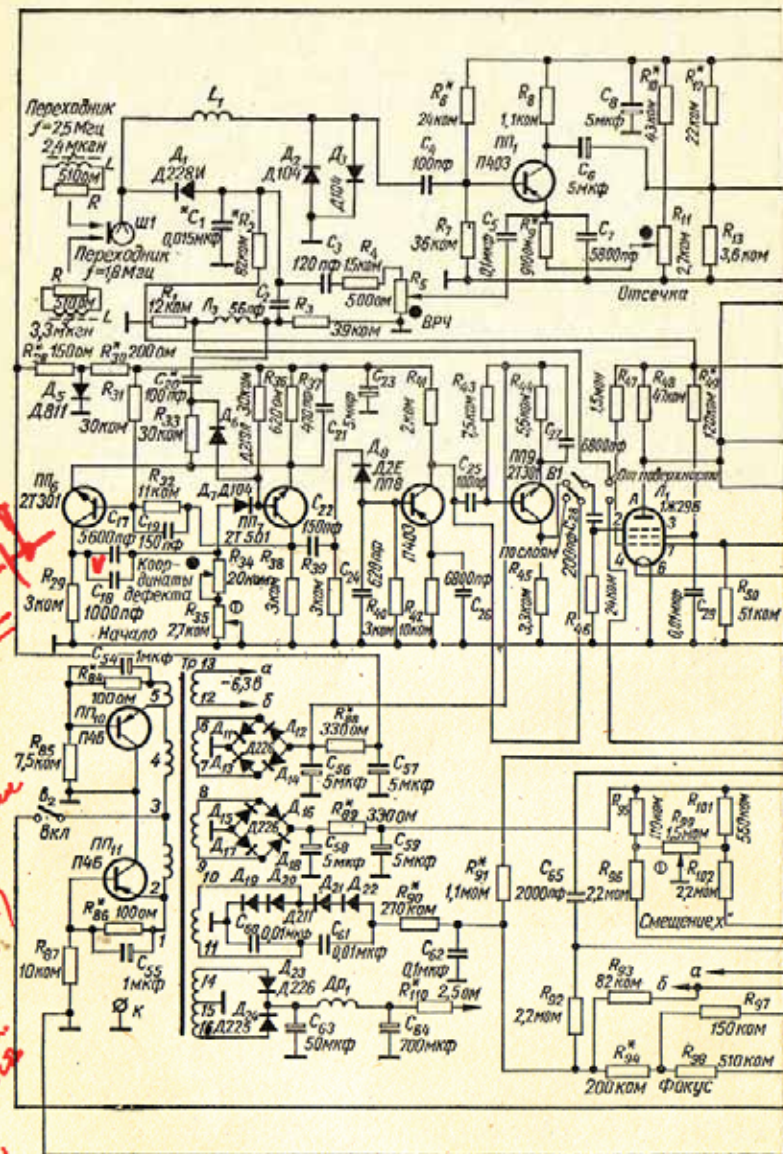
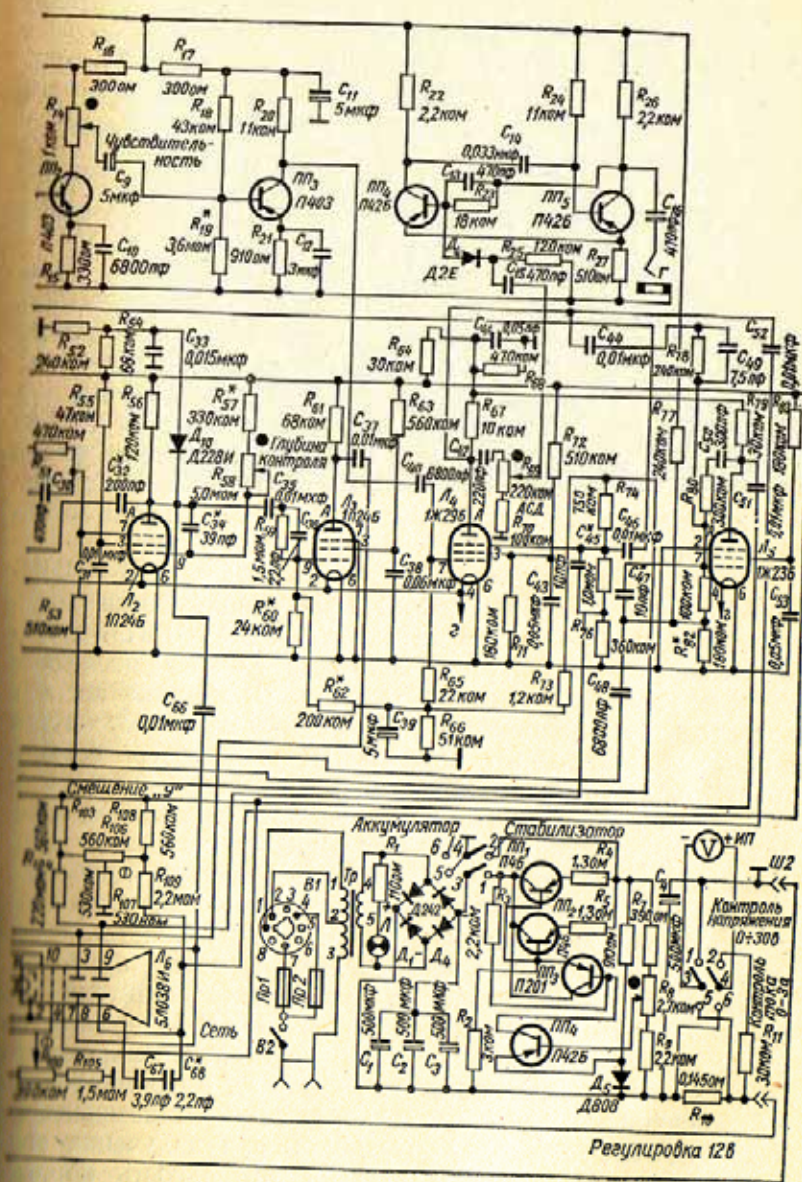


Рис. 56. Электрическая схема



дефектоскопа ДУК-13ИМ.

широкополосный резонансный усилитель на пентодах 6Ж1П с общей полосой пропускания $2\Delta f \approx 0,5 \text{ МГц}$ и коэффициентом усиления 30—60 тысяч. Для достижения наибольшего усиления в качестве емкостей резонансных контуров используются емкость монтажа, входная и выходная емкости ламп. Индуктивности контуров включены в сеточную, а не в анодную цепь ламп с целью ускорения процесса восстановления усиления после воздействия зондирующего импульса и эхо-сигналов большой амплитуды.

В дефектоскопе ДУК-13ИМ усилитель собран на транзисторах ПП1-ПП3 типа П403 по схеме на сопротивлениях с емкостной связью. Коэффициент усиления УВЧ более 2000. Усилитель имеет широкую полосу пропускания. Это позволяет производить контроль материалов на частотах 1,8—2,5 МГц без переключения и перестройки усилителя. Для предохранения первого транзистора от пробоя при подаче на его базу зондирующих импульсов с амплитудой до 150 в на входе УВЧ имеется ограничительная цепочка.

В качестве видеодетектора в дефектоскопах УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60 и ДУК-11ИМ используются полупроводниковые диоды. В дефектоскопе ДУК-13ИМ детектирование осуществляется непосредственно в последнем каскаде усилителя высокой частоты. В этом же каскаде производится ограничение сигналов по минимуму путем подачи отрицательного напряжения на эмиттер первого транзистора. Ограничение сигналов в остальных дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 выполняется в видеоусилителях. Оси потенциометров регулировки порога ограничения выведены под шлиц на боковые панели приборов.

Амплитуда протектированных сигналов регулируется с помощью потенциометров «Чувствительность», оси которых расположена на передней панели приборов.

Коррекция коэффициента усиления усилителя во времени в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 достигается путем подачи в первые каскады усилителей запирающего напряжения экспоненциальной формы, формируемого RC-цепочкой из перепада напряжения, возникающего в возбудителе пьезопреобразователя при излучении зондирующего импульса. Амплитуда и длительность корректирующего напряжения могут регулироваться с помощью ручки временной регулировки чувствительности (ВРЧ), выведенной на переднюю панель приборов.

Видеоусилитель — каскад совпадений собраны по реостатной схеме на пентодах и предназначены для временной селекции эхо-сигналов, поступающих с детектора, и усиления их до величины, достаточной для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки и срабатывания дополнительных индикаторов.

На управляющую и пентодную сетки ламп (6Ж2П в УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60, ДУК-11ИМ и 1Ж29Б в ДУК-13ИМ) поданы отрицательные напряжения, каждое в отдельности запирающие лампу по анодному току. В связи с этим из поступающих на управляющую сетку лампы видеоимпульсов усиливаются и подаются на индикаторы лишь те импульсы, которые совпали во времени с поданным на пентодную сетку селектирующим импульсом (стробимпульсом). В качестве стробимпульса в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 используется импульс подсвета развертки осциллографического индикатора, вырабатываемый генератором напряжения развертки.

Усиленные импульсы отрицательной полярности с анода лампы видеоусилителя поступают на нижнюю вертикально отклоняющую пластину электронно-лучевой трубки и на каскад дополнительных индикаторов. В связи с тем, что каскад совпадений на лампе 1Ж29Б не обеспечивает достаточного усиления, в дефектоскопе ДУК-13ИМ предусмотрен дополнительный видеоусилитель. Импульсы положительной полярности с выхода этого усилителя подаются на верхнюю вертикально отклоняющую пластину.

Генератор напряжения развертки в дефектоскопах УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59 и УЗД-60 отличается по схеме от генератора дефектоскопа ДУК-11ИМ и ДУК-13ИМ. В дефектоскопах УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59 и УЗД-60 он состоит из генератора линейно падающего напряжения, собранного по схеме фантастроны на лампе 6Ж2П, и парафазного усилителя пилообразного напряжения на лампе 6Н1П.

Генерируемые фантастроном импульсы используются также в качестве стробимпульса и импульса подсвета развертки. Напряжения на электродах лампы фантастроны выбраны так, что в своем обычном состоянии лампа закрыта по анодному току. Запуск фантастроны производится импульсами отрицательной полярности, подаваемыми через диоды и конденсатор на управляющую сетку лампы. При этом фантастроном генерируются импульсы,

длительность которых при прочих равных условиях пропорциональна напряжению на аноде в момент запуска фантастрона. Напряжение на аноде в период между импульсами почти равно напряжению на ползунке потенциометра 220 ком, который и служит для регулировки длительности импульсов, определяющих собою глубину контролируемого участка. Ось этого потенциометра выведена на переднюю панель с надписью «Глубина контроля». Импульс положительной полярности, снимаемый с экранной сетки фантастрона, подается на пентодную сетку лампы совпадений в качестве стробимпульса и на управляющую сетку электронно-лучевой трубки в качестве импульса подсвета развертки. Пилообразный импульс отрицательной полярности подается на парафазный усилитель. Усиленное напряжение, снимаемое с анода двойного триода 6Н1П, используется для получения развертки на экране трубки.

В связи с тем, что при перестройке глубины контроля, т. е. при изменении длительности генерируемых фантастроном импульсов, меняется амплитуда пилообразного импульса, в дефектоскопах введена ручка «Масштаб» для регулировки длины развертки на экране.

В дефектоскопе ДУК-11ИМ вместо фантастрона применен санатрон на лампах 6Ж2П и 6Ж9П с катодным повторителем на лампе 6Н1П. Аналогичная схема использована в дефектоскопе ДУК-13ИМ, где электронные лампы пальчиковой серии заменены лампами 1Ж29Б и 1П27Б стержневой конструкции. Амплитуда пилообразного импульса, генерируемого санатроном, остается постоянной при изменении длительности. Это позволило исключить в дефектоскопах ДУК-11ИМ и ДУК-13ИМ ручку регулировки длины развертки.

Чтобы в режиме «Контроль от поверхности» при работе призматическими искателями на индикаторы не проникал зондирующий импульс, запуск генератора развертки (стробимпульса) производится синхронизирующими импульсами, снимаемыми с анода тиратрона или диода в возбудителе пьезопреобразователя и прошедшими через линию задержки. Время задержки в линии соответствует времени распространения ультразвукового импульса в призме типового искателя и составляет примерно 8 мксек.

При контроле изделий по слоям запуск генератора развертки производится с задержкой на необходимое

время, определяемое глубиной залегания контролируемого участка. Запуск генератора в этом случае осуществляется импульсом, поступающим из глубиномера (тумблер в положении «Контроль по слоям»).

Глубиномер в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 предназначен для определения координат отражающей поверхности (дефекта), для измерения толщины контролируемого участка, устанавливаемого ручкой «Глубина контроля», а также для расположения контролируемого участка на заданной глубине при контроле изделия по слоям.

В качестве устройств переменной задержки в ламповых дефектоскопах применен фантастрон на пентоде 6А2П (УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60) или 6Ж2П (ДУК-11ИМ). Запуск фантастрона осуществляется синхронизирующим импульсом, формируемым в момент излучения зондирующего импульса. При запуске фантастрона вырабатывает на катоде лампы прямоугольный импульс отрицательной полярности. Длительность этого импульса связана почти идеальной линейной зависимостью с величиной напряжения на ползунке потенциометра (20 ком). На оси потенциометра укреплен барабан со шкалой. Поворот барабана осуществляется с помощью ручки «Координаты дефекта», выведенной на переднюю панель прибора.

Импульс с катода фантастрона через дифференцирующую цепочку подается на управляющую сетку лампы блокинг-генератора. Лампа блокинг-генератора заперта по анодному току отрицательным напряжением на управляющей сетке, снимаемым с потенциометра «блокинг». Положительный выброс продифференцированного импульса фантастрона запускает блокинг-генератор, в результате чего на аноде лампы формируется отрицательный импульс, используемый для запуска генератора развертки при контроле изделий по слоям.

Положительный импульс блокинг-генератора (маркерный импульс), формируемый в дополнительной обмотке трансформатора, подается на электронно-лучевую трубку, вызывая появление маркерной метки на развертке при работе в режиме «Контроль от поверхности». Очевидно, что положение метки на развертке определяется длительностью импульса фантастрона, регулируемой потенциометром «Координаты дефекта». При совмещении маркерной метки с передним фронтом импульса, отраженного от дефекта, длительность импульса фантастрона равна

времени прохождения зондирующего импульса от пьезоэлектрической пластины до отражающей поверхности и обратно. Шкалы барабана, расположенного на оси потенциометра «Координаты дефекта», проградуированы в мксек для измерения времени распространения ультразвукового импульса, а также в мм для непосредственного отсчета координат отражающих поверхностей (дефектов) при контроле искателями с различным углом ввода луча.

Глубиномер дефектоскопа ДУК-13ИМ отличается от рассмотренного лишь тем, что устройство задержки в нем выполнено по схеме ждущего мультивибратора на транзисторах 2Т301, а для получения маркерной метки используется вместо блокинг-генератора дифференцирующая цепочка с двумя усилителями на транзисторах П403 и 2Т301.

В приборах УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, УЗД-60 маркерный импульс подается на управляющую сетку электронно-лучевой трубки, вызывая появление на развертке яркой маркерной точки; в дефектоскопах ДУК-11ИМ и ДУК-13ИМ этот импульс подается на вертикально-отклоняющие пластины трубки, в результате чего на развертке возникает маркерный пик.

При включении тумблера в положение «Контроль по слоям» начало развертки совпадает по времени с маркерным импульсом. В этом случае показания шкал глубиномера соответствуют глубине расположения начала контролируемого слоя. Для определения координат отражающей поверхности в режиме «Контроль по слоям» следует, вращая ось потенциометра «Координаты дефекта», подвести передний фронт отраженного импульса к началу развертки и отсчитать показания по шкале, соответствующей применяемому типу искателя.

Дополнительными индикаторами в приборах на электронных лампах являются телефонные наушники и лампочка накаливания, включаемая под напряжение контактами реле. Обмотка реле входит в анодную цепь нормально замкнутого триода (лампа 6Н1П). При подаче отрицательного импульса с анода видеоусилителя триод открывается на некоторое время и через обмотку реле течет ток. Время открытого состояния триода подобрано таким образом, чтобы средний ток, протекающий через обмотку, обеспечивал устойчивое срабатывание реле. Минимальная величина видеопульса, вызывающего срабатывание

мультивибратора, регулируется потенциометром (220 ком). Импульсы в цепи реле используются также для получения звукового сигнала в телефонных наушниках. Контакты реле могут управлять каким-либо механизмом при автоматизированном контроле. Переключение функций реле осуществляется тумблером, имеющим положения «Автомат» и «Индикатор».

В дефектоскопе ДУК-13ИМ в качестве дополнительного индикатора предусмотрены только телефонные наушники, включаемые в цепь генератора напряжения звуковой частоты, который выполнен по схеме ждущего мультивибратора с эмиттерной связью на транзисторах П24Б. Уровень срабатывания мультивибратора регулируется с помощью потенциометра (220 ком). Ручка регулировки чувствительности дополнительных индикаторов в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 выведена на боковую или заднюю панель приборов. Чувствительность устанавливается такой, чтобы дополнительные индикаторы срабатывали при величине эхо-сигнала на экране трубки 5 мм и более.

Основными органами управления дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 являются: ручка «Глубина прозвучивания» для выбора толщины контролируемого слоя; тумблер выбора режима контроля «Контроль от поверхности» — «Контроль по слоям»; ручка «Координаты дефекта» для определения координат отражающей поверхности (дефекта), измерения величины слоя, установленного ручкой «Глубина прозвучивания», и для расположения его на заданной глубине; ручка «Чувствительность» для регулировки минимальной величины дефекта, регистрируемого прибором; ручка «ВРЧ» (временная регулировка чувствительности) для регулировки величины мертвой зоны.

Сравнительно небольшое число органов управления, наличие дополнительных индикаторов, возможность контроля швов по слоям и непосредственного отсчета координат расположения дефектов, малый вес и портативность приборов выгодно отличают дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5 от других дефектоскопов аналогичного назначения.

Дефектоскопы УДМ-1М и УДМ-3 (рис. 57) позволяют вести контроль на частотах 0,6; 0,8; 1,8; 2,5 и 5,0 Мгц. Чувствительность и мертвая зона приборов УДМ при работе наклонными искателями на частоте ультразвука 1,8 и 2,5 Мгц аналогичны чувствительности и мертвой зоне

дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5. Электронный глубиномер с перемещаемой ступенькой имеет шкалу, проградуированную в единицах расстояния (в сантиметрах). При ступенчатом изменении длительности развертки одновременно меняется цена делений шкалы глубиномера. Шкала глубиномера может быть использована для отсчета глубины H расположения дефекта либо расстояния L от дефекта до центра излучения наклонного искателя. Однако для этого следует предварительно настроить глубиномер по тест-образцу с отражателями. Настройка производится с помощью ручек, размещенных в окне боковой стенки. При использовании нескольких искателей для контроля шва в практике ограничиваются настройкой глубиномера на измерение координат прямым искателем. В этом случае координаты H и L для наклонного искателя с данным углом ввода луча определяют с помощью координатной линейки по показаниям глубиномера для прямого искателя. Индикация дефектов осуществляется по появлению эхо-сигналов на

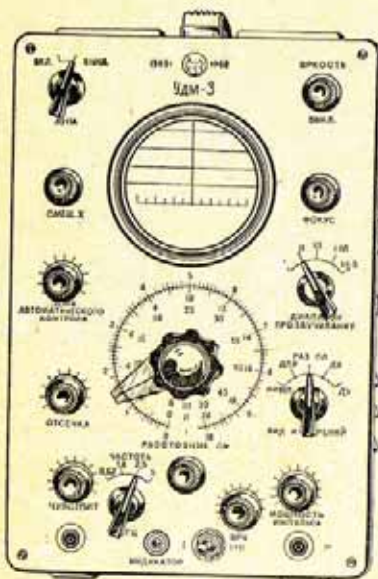


Рис. 57. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-3.

экране электронно-лучевой трубки и по загоранию лампочки, расположенной у искателя. Дефектоскоп рассчитан на работу в режиме «От поверхности». Длительность развертки регулируется ступенчато и плавно в диапазоне от 6 до 500 мксек, обеспечивая прозвучивание изделий толщиной до 1,5 м. Кроме основной системы развертки, дефектоскоп имеет задержанную развертку типа «электронная лупа». Однако длительность задержанной развертки постоянна и составляет 30—50 мксек. Временное положение задержанной развертки определяется положением ручки глубиномера «Расстояние». В связи с тем, что сигналы на осциллографический индикатор поступают без предварительной временной селекции, на экране электронно-лучевой

трубки при включении искателя по совмещенной или раздельно-совмещенной схеме виден зондирующий импульс. На дополнительный индикатор, условно называемый автоматическим сигнализатором дефектов, эхо-сигналы поступают с выхода системы временной селекции. Временная селекция производится с помощью каскада совпадений. Длительность селектирующего импульса регулируется ручкой «Зона автоматического контроля», а временное положение — ручкой глубиномера. Селектирующий импульс подается также на вертикально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, образуя на развертке «пьедестал». Регулируя длину и положение «пьедестала» на развертке, легко выбирать зону контроля, при обнаружении дефектов в которой будет срабатывать автоматический сигнализатор дефектов, т. е. зажигаться индикаторная лампочка. Передний фронт «пьедестала» используется в дефектоскопе в качестве маркерной метки глубиномера.

В приборах УДМ можно приближенно количественно сравнивать амплитуды эхо-сигналов. Для этого с помощью переключателя «Вид измерений» глубиномер включают в схему усилителя. В этом случае при вращении ручки глубиномера по часовой стрелке происходит ослабление амплитуды эхо-сигналов. Для сравнения амплитуд нескольких сигналов необходимо поочередно их ослаблять таким образом, чтобы их величина на экране имела некоторое постоянное значение. При этом чем больше амплитуда измеряемого сигнала, тем на большее число делений будет повернута ручка «Расстояние». Для большей точности измерений необходимо шкалу глубиномера предварительно отградуировать в относительных единицах или децибелах и производить измерения амплитуд эхо-сигналов, расположенных вне зоны действия временной регулировки чувствительности.

Основными органами управления дефектоскопов, выведенными на переднюю панель прибора, являются (рис. 57): переключатель «Вид измерений» для установки режима работы глубиномера; переключатель «Диапазон прозвучивания» для выбора толщины контролируемого участка под поверхностью; переключатель «Частота» для настройки прибора на заданную рабочую частоту; ручка «Расстояние» для измерения координат дефектов и оценки амплитуд эхо-сигналов; ручка «Мощность» для регулировки амплитуды зондирующих импульсов; ручка

«Чувствительность» для регулировки амплитуды сигналов на входе приемного тракта; ручка «Отсечка» для регулировки порога ограничения сигналов по минимуму; ручка «ВРЧ» для регулировки характера изменения коэффициента усиления приемника во времени; ручка «Зона автоматического контроля» для регулировки длительности селектирующего импульса.

Чувствительность приборов УДМ регулируется четырьмя ручками — «Мощность», «Чувствительность»,

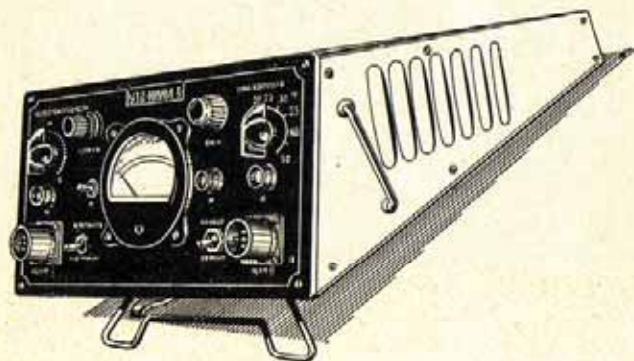


Рис. 58. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-9.

«Отсечка» и «ВРЧ». Приборы УДМ-1М и УДМ-3 отличаются друг от друга схемами некоторых каскадов и типом электронно-лучевой трубки. Габариты приборов $423 \times 335 \times 220$ мм, вес около 14 кг, питается прибор от сети переменного тока.

Дефектоскоп УЗД-13 разработан для контроля стыковых сварных соединений большой толщины (0,3—1 м). В этом случае приходится прибегать к методу послойного контроля (см. гл. VIII).

Для контроля каждого слоя должна быть установлена соответствующая чувствительность, тем большая, чем глубже расположен выбранный слой. В связи с этим в дефектоскопе сделан переключатель задержки развертки, благодаря которому развертка на экране соответствует контролируемому слою. Одновременно тем же переключателем устанавливается чувствительность, необходимая для контроля этого слоя. Несущая частота 1,2 и 1,8 МГц, прибор одноблочный, вес 12 кг, габариты $420 \times 350 \times 180$ мм, питается от сети переменного тока.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-9 предназначен для контроля сварных заклепок (рис. 58). Однако он может быть применен и для дефектоскопии стыковых швов толщиной от 25 до 50 мм.

В дефектоскопе вместо электронно-лучевой трубки использован стрелочный индикатор обнаружения дефектов, который одновременно является указателем координат

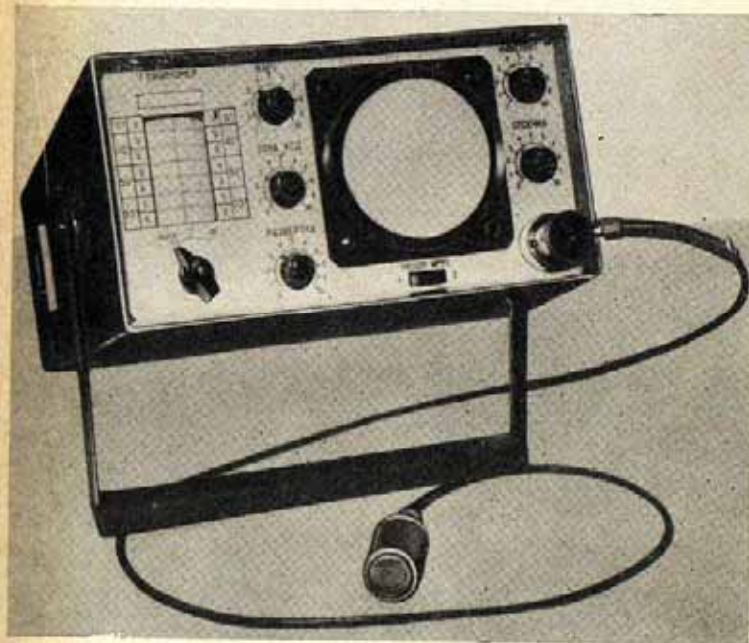


Рис. 59. Ультразвуковой дефектоскоп УДЦ-21Т.

нат выявленных дефектов. Измерение координат производится автоматически. В обычном состоянии стрелочный индикатор, включенный в режим глубиномера, указывает величину контролируемого участка. При обнаружении дефекта стрелка отклоняется и указывает глубину расположения дефекта. Если тумблер «Координаты — амплитуда» установить в положение «Амплитуда», то стрелочный прибор будет измерять в условных единицах величину эхо-сигнала на выходе приемного тракта. Кроме стрелочного, в дефектоскопе предусмотрены звуковой и световой индикаторы. Частота ультразвука 2,5 МГц,

прибор одноблочный, габариты $260 \times 370 \times 140$ мм, вес 6 кг, питается от сети переменного тока.

Дефектоскоп УДЦ-21Т (рис. 59) является первым отечественным ультразвуковым дефектоскопом, выполненным полностью на полупроводниках. Частота ультразвука от 1,8 до 5,5 Мгц. Индикация дефектов производится по экрану электронно-лучевой трубки и звуковому индикатору.

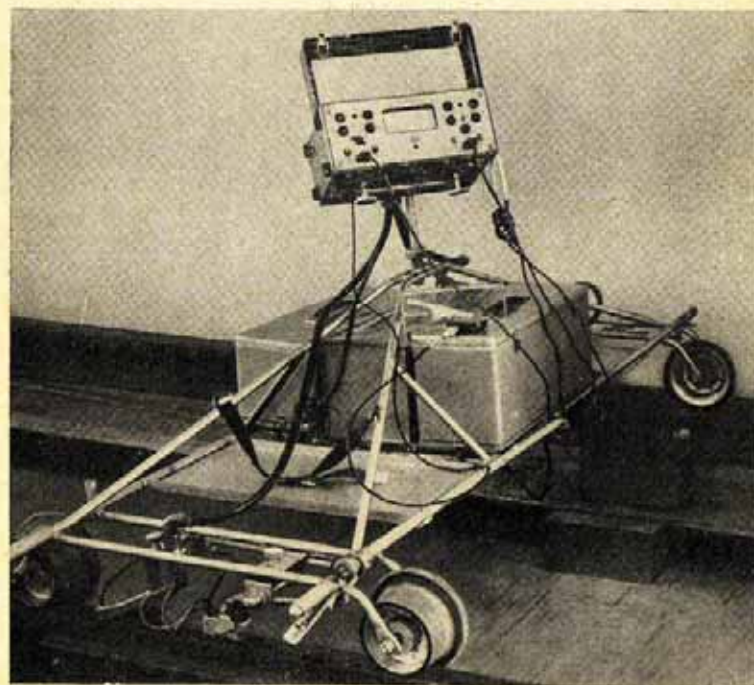


Рис. 60. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-6М.

Шкала электронного глубиномера проградуирована в миллиметрах глубины расположения дефекта и расстояния от него до центра излучения искателей с углом падения волны 0, 40, 50 и 53°. Дефектоскоп позволяет вести контроль швов от поверхности, а также по слоям. Прибор одноблочный. Питается от сети переменного тока или от аккумуляторной батареи. Аккумуляторная батарея размещается в корпусе прибора, что весьма удобно при контроле сварных соединений как в заводских, так и в полевых

условиях. Габариты дефектоскопа $370 \times 225 \times 120$ мм, вес вместе с аккумуляторной батареей около 6 кг.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-6М (рис. 60) разработан для контроля рельсов, свариваемых передвижными рельсосварочными агрегатами. Однако эти приборы широко применяют и для контроля эксплуатируемых рельсов [50].

При сварке рельсов в пути необходимо вначале проверить качество рельсов, подлежащих сварке, а затем качество сваренных стыков. В связи с этим в дефектоскопе предусмотрено два режима работы: сплошной контроль для дефектоскопии обеих рельсовых нитей по всей длине и ручной контроль для дефектоскопии сварных стыков и отдельных сечений рельсов. В приборе, установленном на тележке, имеется два канала, работающих по зеркально-теневому методу прямыми искателями (по одному каналу на каждую нить), и один канал, работающий по эхо-методу наклонными искателями. Частота ультразвука во всех каналах 2,5 Мгц. Шейка рельса и продолжение ее в головку и подошву контролируются зеркально-теньевым методом прямым искателем, а головка рельса — эхо-методом с помощью наклонного искателя, развернутого относительно продольной оси рельса на угол примерно 35°. В каналах зеркально-теневого метода впервые применены контроль по второму донному импульсу и безэталонная настройка чувствительности по имитатору дефектов (см. гл. V, VI). Для выявления трещин, развивающихся от болтовых отверстий, параллельно основному пьезопреобразователю подключается дополнительный, расположенный от основного на расстоянии, несколько большем диаметра болтового отверстия (рис. 61). Два преобразователя образуют как бы ультразвуковой калибр, позволяющий исключить возникновение ложных сигналов при прохождении искателя над бездефектными болтовыми отверстиями [28]. Дополнительный преобразователь включается кнопкой, расположенной на ручке тележки.

В основу канала эхо-метода положены функциональные схемы дефектоскопов УЗД-НИИМ-5 и УЗД-НИИМ-9. При сплошном контроле рельсов на вход этого канала подключаются два одинаковых наклонных искателя, которыми одновременно прозвучиваются головки двух рельсовых нитей.

Таким образом, при перемещении дефектоскопа каналы прямых и наклонных искателей непрерывно контро-

лируют шейку и продолжения ее в головку и подошву, а также боковую часть головки рельсов обеих нитей. О наличии дефектов судят по появлению звука в телефонных наушниках. Звук высокого тона соответствует обнаружению дефекта прямым искателем, а низкого тона — наклонным.

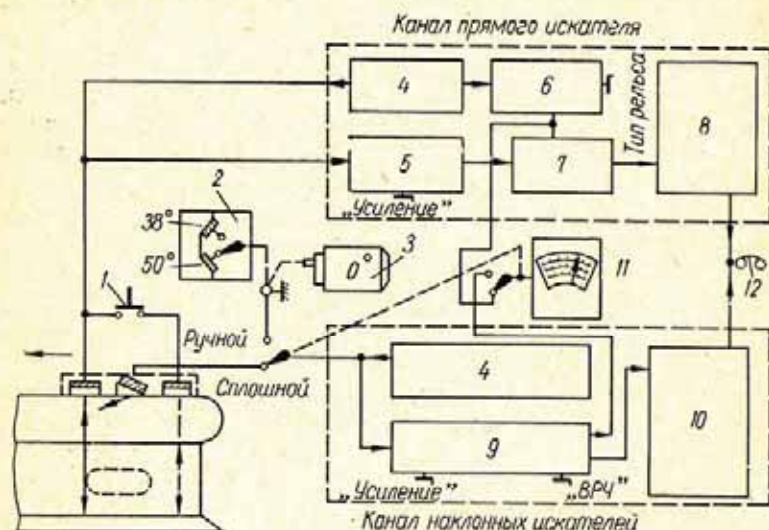


Рис. 61. Функциональная схема дефектоскопа УЗД-НИИМ-6М (на одну нить):

1 — кнопка для включения дополнительного пьезопреобразователя при контроле болтовых стыков; 2, 3 — соответственно комбинированный и прямой искатель для ручного контроля; 4 — генератор ультразвуковых колебаний; 5 — устройство безэталонной настройки чувствительности и усилитель; 6 — генератор селективирующих импульсов; 7 — каскад антисовпадений; 8 — ждущий генератор напряжения звуковой частоты высокого тока; 9 — приемно-селективирующий тракт; 10 — ждущий генератор напряжения звуковой частоты низкого тона; 11 — стрелочный индикатор; 12 — телефонные наушники.

Проверка сварных стыков, а также вторичный контроль отдельных участков рельсов выполняются при помощи комбинированного искателя, подключаемого к каналу наклонных.

При ручной проверке рельсов координаты поверхности, отразившей ультразвук, измеряют по стрелочному индикатору, шкалы которого проградуированы в миллиметрах. Применение стрелочного глубиномера вместо электронно-лучевой трубки позволяет упростить работу с дефектоскопом в пути и повысить надежность контроля.

Стрелочный индикатор предназначен также для проверки и регулировки напряжения питания прибора и для настройки дефектоскопа на контроль рельсов различного типа по первому или второму донному импульсу.

Выбор УЗД-НИИМ-6М выполнен на транзисторах и рассчитан на работу в полевых условиях при температуре от -20 до $+50^{\circ}\text{C}$. Питается прибор от аккумуляторной батареи напряжением 13—16 в.

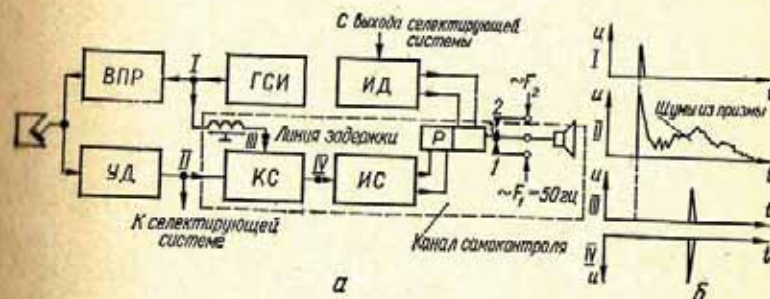


Рис. 62. Функциональная схема канала самоконтроля ультразвукового дефектоскопа (а) и формы импульсов на выходе различных каскадов (б):

ВПР — возбуждатель пьезопреобразователя; ГСИ — генератор синхронизирующих импульсов; ИД — индикатор дефектов; Р — реле; ИС — индикатор самоконтроля; КС — каскад совпадений; УД — усилитель с детектором.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-10 разработан на основе прибора УЗД-НИИМ-5. В нем применен широкополосный усилитель с полосой от 0,5 до 5,5 МГц. В возбуждатель пьезокристалла предусмотрена возможность плавной настройки контура ударного возбуждения, что позволяет вести контроль на различной частоте в указанном диапазоне.

Для повышения надежности контроля в прибор введен канал самоконтроля. При возникновении неисправности в приборе или искателе автоматически подается аварийный звуковой сигнал. Принцип работы канала самоконтроля поясняется рис. 62 [46]. На вход II каскада совпадений канала самоконтроля с выхода усилителя поступает начальный сложный импульс, включающий зондирующий импульс и импульсы, возвращающиеся из призмы. На второй вход III того же каскада подается в качестве стробирующего импульса синхронизирующий импульс, задержанный в специально введенной линии задержки. Время задержки подбирается так, чтобы стробирующий

импульс совпадал во времени с эхо-сигналами реверберационных шумов, возвращающихся из призмы. Естественно, что это время меньше времени $2t_n$ прохождения ультразвукового импульса через призму искателя.

При нормальной работе всего приемно-передающего тракта, включая искатель, на выходе IV каскада совпадений имеется импульс. Исчезновение импульса на выходе

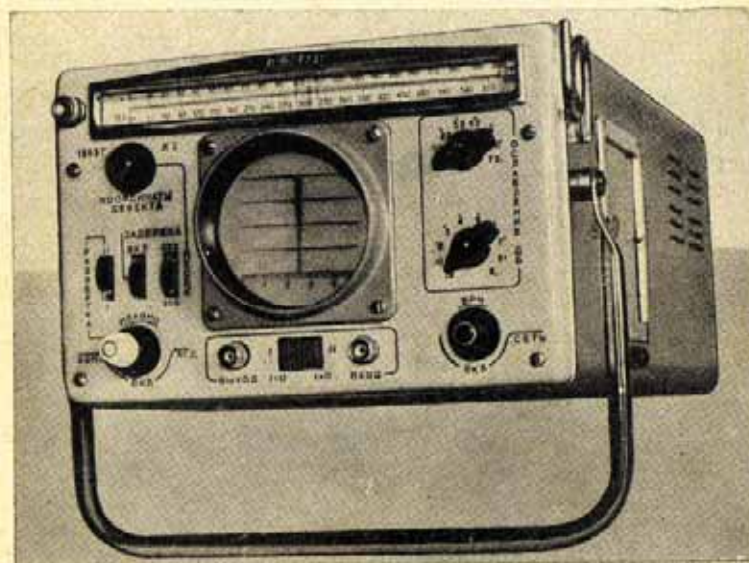


Рис. 63. Ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66П.

каскада совпадений свидетельствует о нарушении работоспособности дефектоскопа. Импульс с выхода каскада совпадений подается на индикатор самоконтроля. В цепи этого индикатора включена одна из двух катушек реле. Контакты 1—3 реле являются нормально замкнутыми. Под воздействием импульсов нормальной работоспособности срабатывает индикатор самоконтроля, размыкая контакты 1—3 и прерывая тем самым цепь подачи напряжения звуковой частоты F_1 на сигнализатор. Очевидно, что при нарушении работоспособности приемно-передающего тракта будет слышен аварийный сигнал частотой F_1 . Такой же эффект будет наблюдаться при отключении искателя, а также в начальный момент после вклю-

чения прибора пока не прогреются электронные лампы. Вторая обмотка реле используется для подключения сигнализатора к источнику напряжения частотой $F_2 (F_2 \gg F_1)$ в момент обнаружения дефекта.

Шкалы глубиномера проградуированы в миллиметрах для искателей с углом ввода луча в сталь 40, 50 и 65°. Для использования глубиномера при работе с различными искателями на переднюю панель прибора выведен

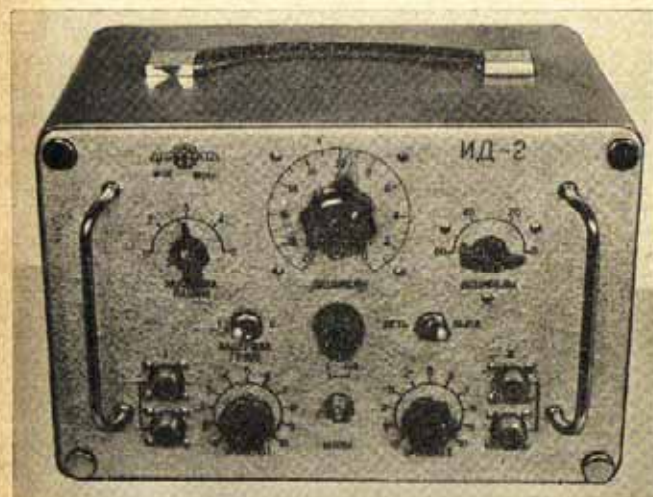


Рис. 64. Имитатор дефектов ИД-2.

переключатель линии на время задержки, равное времени прохождения ультразвука в призме искателя.

По остальным параметрам дефектоскоп УЗД-НИИМ-10 аналогичен прибору УЗД-НИИМ-5.

Дефектоскоп ДУК-66П (рис. 63) выполнен полностью на транзисторах; по принципу работы и своим параметрам он аналогичен прибору УДМ-1М, от которого отличается возможностью более точного сравнения амплитуд эхо-сигналов с помощью встроенного аттенюатора, проградуированного в децибелах, и непосредственного отсчета координат отражающих поверхностей по шкале глубиномера. Прибор одноблочный, габариты $385 \times 210 \times 150$ мм, вес с встроенными аккумуляторами 9,5 кг.

Прставка к дефектоскопам ИД (имитатор дефектов) предназначается для измерения амплитуд эхо-сигналов

при дефектоскопии изделий и сварных соединений. Приставка, выполненная в виде прибора с питанием от сети переменного тока (рис. 64), включается к любому ультразвуковому дефектоскопу [67, 69].

Принцип работы приставки показан на рис. 65. Имитатор дефектов соединяется высокочастотным разъемом 1 с гнездом дефектоскопа, в которое обычно включается искатель. Зондирующий импульс дефектоскопа проходит через два разделительных каскада 2 и 4, регулирующую

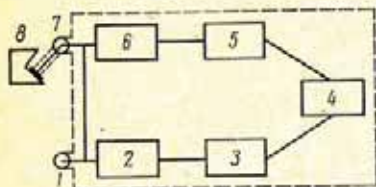


Рис. 65. Блок-схема имитатора дефектов:

1 — разъем для подключения дефектоскопа; 2 и 4 — разделительные каскады; 3 — регулируемая задержка времени; 5 — генератор; 6 — калиброванный аттенюатор; 7 — разъем для подключения искателя; 8 — искатель дефектоскопа.

задержку времени 3 и возбуждает генератор импульсов имитатора 5. Импульс последнего ослабляется калиброванным аттенюатором 6 и затем подается на вход усилителя дефектоскопа. Искатель дефектоскопа 8 при этом включается в гнездо имитатора 7.

В результате при включении имитатора на экране дефектоскопа возникает вспомогательный импульс. С помощью регулируемой задержки времени 3 этот импульс можно перемещать вдоль линии развертки и подводить его близко к измеряемому сигналу. Калиброванным аттенюатором 6 можно изменять амплитуду импульса и приравнивать ее амплитуде измеряемого сигнала. Таким способом можно последовательно измерять амплитуды всех исследуемых сигналов на экране дефектоскопа. Разделительные каскады 2 и 4 необходимы для того, чтобы импульсы генератора 5 не могли попасть на вход дефектоскопа, помимо аттенюатора, по цепям возбуждения генератора.

Искажения импульса имитатора и измеряемого сигнала от дефекта в усилительном тракте одинаковы, так как в момент измерения импульсы имеют одинаковую высоту на экране, благодаря чему достигается достаточно высокая точность измерения.

Имитатор дефектов обладает важным преимуществом перед обычным аттенюатором. При включении блока ВРЧ измерять сигналы аттенюатором нельзя, поскольку они на разных участках развертки ослабляются ВРЧ по-разному.

При измерении имитатором импульс его находится рядом с измеряемым сигналом и ВРЧ действует на оба сигнала примерно одинаково. Благодаря этому измерение амплитуд имитатором можно вести, не выключая ВРЧ.

Электрическая схема имитатора дефектов показана на рис. 66 [70].

Зондирующий импульс подается на управляющую сетку лампы L_1 , которая, как и лампа L_3 , играет роль разделительного каскада.

От импульса, снимаемого с анода L_1 , запускается мультивибратор с одним устойчивым положением, собранный на лампе L_2 . Подстройка запуска мультивибратора осуществляется резистором R_5 .

Задний фронт П-образного импульса мультивибратора после дифференцирования проходит через лампу L_3 и возбуждает тиратрон L_4 , работающий как генератор ударного возбуждения. Изменение длительности П-образного импульса позволяет регулировать время запуска тиратронного генератора. Длительность П-образного импульса мультивибратора регулируется параметрами RC-цепочки $C_{11} - C_{12} - R_{14} - R_{13}$. Вращая переменный конденсатор C_{11} , можно плавно регулировать задержку запуска генератора импульсов (ручка «Задержка плавно» на передней панели имитатора).

Скачкообразное изменение задержки осуществляется подключением сопротивления R_{14} (ручка «Задержка грубо» на передней панели).

Импульс ударного генератора L_4 ослабляется ступенчатым аттенюатором $R_{28} - R_{34}$ и плавным калиброванным делителем напряжения R_{37} (ручка «Отр. децибелы» на передней панели), а затем попадает на вход приемника дефектоскопа. Схема аттенюатора рассчитана таким образом, чтобы входное и выходное его сопротивления возможно меньше изменялись при регулировке амплитуды сигнала. Аттенюатор собран на проволочных безиндуктивных сопротивлениях. С целью уменьшения влияния изменения входного сопротивления дефектоскопа на точность работы аттенюатора введено разделительное сопротивление R_{25} .

Амплитуду сигнала имитатора дефектов можно регулировать также, изменяя напряжение на аноде тиратрона L_4 с помощью потенциометра R_{26} (ручка «Уровень» на передней панели). Этот регулятор амплитуды необходим при выполнении некоторых измерительных операций.

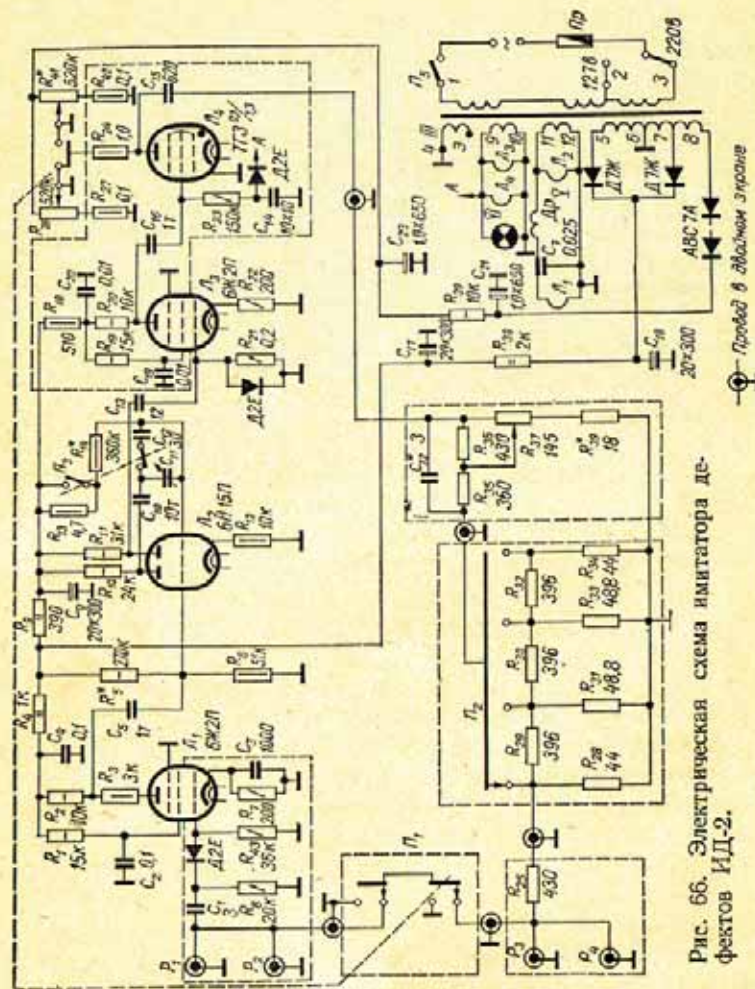


Рис. 66. Электрическая схема имитатора дефектов ИД-2.

Максимальная амплитуда сигнала генератора составляет примерно 1,5 в.

Импульс ударного генератора имитатора дефектов возбуждает колебания контура генератора дефектоскопа на его собственной частоте. Благодаря этому имитатор автоматически работает на той же частоте, что и дефектоскоп. Однако спектр импульса, возбуждаемого имитатором, отличается от спектра эхо-сигнала.

Шкалы аттенюатора (шкалы «Отр. децибелы» на передней панели) проградуированы в отрицательных децибелах таким образом, чтобы показать, во сколько раз принятый сигнал меньше некоторого максимального сигнала.

Аттенюатор имитатора дефектов обеспечивает максимальное ослабление в 80 дб, т. е. в 10 000 раз. Точность измерения при этом равна ± 1 дб.

При сравнении импульсов чувствительность дефектоскопа можно регулировать ручками, изменяющими чувствительность приемника дефектоскопа (ручка «Усиление», «Отсечка» и «Чувствительность»), так как при вращении этих ручек одновременно и практически одинаково меняются сигнал имитатора и измеряемый сигнал от дефекта.

Однако в процессе сравнения амплитуд сигналов нельзя регулировать чувствительность дефектоскопа путём вариации мощности зондирующего импульса, так как при этом сигналы от дефектов и сигнал имитатора изменяются совершенно по-разному. Нельзя также вращать в это время ручку «Уровень» имитатора дефектов. Мощность импульса и ручка «Уровень» регулируются только перед началом измерений для настройки имитатора.

Для сравнения амплитуд двух сигналов удобно применять следующий способ измерения. Поставить ручки аттенюатора в положение «0» и, оперируя ручками «Уровень» и «Мощность импульса», приравнять по высоте вспомогательный и наибольший из измеряемых сигналов. Затем ослабить вспомогательный сигнал имитатора с помощью аттенюатора так, чтобы он равнялся по высоте другому измеряемому сигналу. Показания аттенюатора при этом сразу дадут отношение амплитуд (в децибелах) двух сравниваемых сигналов.

Имитатор дефектов может быть введен в любой типовой ультразвуковой дефектоскоп [49,31].

5. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СТРУКТУРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ

Ультразвуковой контроль структуры металлов основан на исследовании частотной зависимости затухания упругих колебаний и их скорости распространения в контролируемом изделии или соединении [144]. В связи с этим для контроля структуры в ряде случаев используют ультразвуковые дефектоскопы, имеющие аттенюаторы и измерители времени распространения ультразвука.

В Советском Союзе для контроля структуры разработан специальный прибор — ультразвуковой структурный анализатор ДСК-1 (УСАД-1) [147]. Прибор ДСК-1 по принципу действия аналогичен ультразвуковому дефектоскопу. Рабочая частота ультразвука 0,65; 1,65; 2,5; 5 и 10 МГц $\pm 10\%$, длительность развертки до 500 мксек. Аттенюатор обеспечивает ослабление входного сигнала до 60 дБ через 1 дБ. Погрешность измерения времени между зондирующим импульсом и принятыми сигналами не превышает 1% от полного значения шкалы рабочего диапазона.

Прибор ДСК-1 предназначен для относительного метода исследования, когда в качестве показателей степени рассеивания ультразвука принимаются отношения амплитуд сигналов при прозвучивании изделия на разных частотах ультразвука при постоянном коэффициенте усиления усилителя прибора. Эти отношения названы структурными коэффициентами:

$$K_1 = \frac{Af_2}{Af_1}; \quad K_2 = \frac{Af_3}{Af_2}; \quad K_3 = \frac{Af_4}{Af_3},$$

где K_1, K_2, K_3 — структурные коэффициенты; Af_1, Af_2, Af_3, Af_4 — амплитуды сигналов при постоянном усилении и соответствующих частотах.

Для исключения влияния разброса искателей и коэффициентов усиления усилителя при разных частотах на результаты измерений структурных коэффициентов в приборе предусмотрены потенциометры для выравнивания чувствительности приемно-передающего тракта на разных частотах. Потенциометры выведены «под шлиц» на боковую стенку прибора. Прибор одноблочный, габаритные размеры 540 × 360 × 235 мм, вес около 23 кг. Питается прибор от сети переменного тока.

6. ТЕСТ-ОБРАЗЦЫ, ЭТАЛОНЫ И КООРДИНАТНЫЕ ЛИНЕЙКИ

Тест-образцы, эталоны и координатные линейки входят в комплект аппаратуры для контроля сварных соединений и предназначаются для настройки приборов, выбора параметров прозвучивания и определения месторасположения выявленных дефектов.

Тест-образцы — это образцы сварных соединений, в которых выполнены искусственные отражатели. Эти образцы могут быть изготовлены из основного металла при условии, что его акустические свойства близки к акустическим свойствам металла шва. Как правило, качество поверхности тест-образцов должно соответствовать качеству поверхности основного металла соединений, подлежащих контролю. В ряде случаев при экспериментальных исследованиях тест-образцы подвергают механической обработке. Чистота обработки образцов, предназначенных для работы с прямым искателем, должна соответствовать классу $\nabla 5$ — $\nabla 6$. Если же тест-образец предполагается использовать только для исследований с наклонными искателями, то добиваться столь высокого класса чистоты поверхности нецелесообразно. При более грубой поверхности, когда на ней видны следы скоростной чистовой обработки, величина усилия прижатия наклонного искателя к образцу в меньшей степени влияет на коэффициент прозрачности призма — металл, т. е. на результаты исследований, чем при обработке по классу $\nabla 5$ — $\nabla 6$.

Искусственные отражатели в тест-образцах выполняют такими, чтобы они моделировали реальные дефекты определенного вида. Поэтому отражатели в тест-образцах принято называть моделями дефектов. В особых

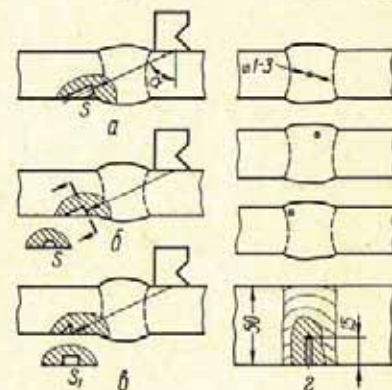


Рис. 67. Тест-образцы с моделями дефектов для выбора и настройки чувствительности и длительности развертки.

случаях модели дефектов могут быть выполнены непосредственно на контролируемом соединении.

Основными моделями дефектов, применяемыми при контроле сварных соединений, являются: отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно к акустической оси искателя (рис. 67, а); сегментные отражатели, также ориентированные нормально к акустической оси искателя (рис. 67, б); угловые отражатели (рис. 67, в); боковые цилиндрические отражатели, ось которых перпендикулярна к акустической оси искателя (рис. 67, г);

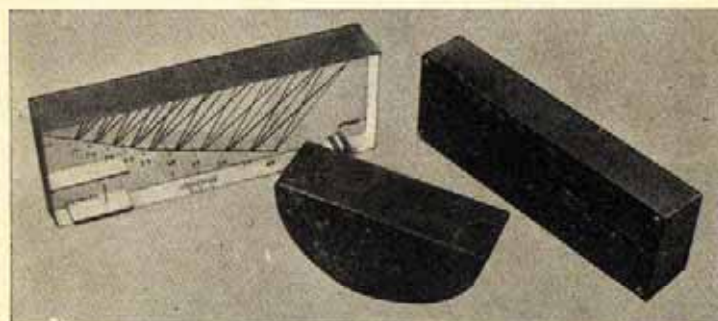


Рис. 68. Комплект эталонов конструкции НИИ мостов ЛИИЖТ.

Моделью дефекта, дающей наиболее объективное представление о чувствительности контроля, является отверстие с плоским дном. Однако отсутствие практически приемлемых способов определения качества изготовления и угла наклона плоскости дна выполненных отверстий затрудняет применение их на практике. Сегментные отражатели, представляющие собой как бы неполностью изготовленные отверстия с плоским дном, позволяют визуально оценивать качество отражающей поверхности и довольно просто с помощью угломера определять угол наклона отражающей плоскости.

Отверстия с плоским дном и сегментные отражатели должны изготавливаться для каждого угла ввода луча. При этом отклонение угла между отражающей плоскостью и акустической осью искателя от прямого не должно превышать 30'. Угловые отражатели выполняют незави-

симо от угла ввода луча и поэтому наиболее широко применяют в производственных условиях.

Эталон так же, как и тест-образцы, представляют собой блоки с искусственными отражателями. Однако в отличие от тест-образцов эталоны изготавливают строго в соответствии с едиными чертежами и техническими условиями, утвержденными стандартами или нормами.

За рубежом для контроля сварных соединений рекомендованы различные типы эталонных блоков [194, 203, 174, 181]. В Советском Союзе принят комплект из трех эталонов (рис. 68), разработанный НИИ мостов ЛИИЖТ [31, 151, ГОСТ 14 782—69.

Эталон №1 изготавливают из органического стекла.

Эталон №2 состоит из стандартной шкалы и образца. Образец изготавливают из металла, близкого по акустическим свойствам к контролируемому. Шкалу приклеивают к образцу и укрепляют четырьмя винтами. Отверстия в эталоне сверлят по меткам на шкале после крепления ее к образцу.

Эталон №3 выполняют из любой малоуглеродистой стали.

Принцип построения эталонов будет рассмотрен в гл. VI.

Координатные линейки используют для расчета координат выявленных дефектов по измеренному с помощью глубиномера интервалу времени между зондирующим импульсом и эхо-сигналом.

Обычно шкалы линеек рассчитаны на определенные два значения угла ввода луча и определенную скорость распространения волны в металле [32, 67]. При прозвучивании металлов с другой скоростью ультразвука или при использовании искателей другого типа приходится вычислять координаты, либо вводить поправки к результатам измерения. Все это значительно осложняет процесс контроля и снижает его надежность.

Указанные недостатки устраняются при использовании универсальной шкалы УКШ-1 [39]. Эта шкала рассчитана на измерение координат дефектов в различных металлах с помощью искателей, у которых углы ввода луча лежат в пределах от первого до второго критических углов.

При построении универсальной шкалы в качестве вспомогательной переменной принимается путь ультразвукового импульса в металле в прямом и обратном направлениях

$$r = Ct. \text{ Из выражений (25) и (26) } r = \frac{H}{\cos \alpha}; r = \frac{L}{\sin \alpha}.$$

Шкала строится из линий $H(r, \alpha) = \text{const}$, $L(r, \alpha) = \text{const}$ и $t(C_t, r) = \text{const}$. Принцип построения линий поясняется рис. 69.

Для удобства пользования шкалой координатная ось r после построения линий исключается, так как значения r при известной скорости ультразвука C_t однозначно определяются временем t . По этой же причине вместо линий $t = \text{const}$ целесообразно оставить только калиброванную ось времени t для конкретного значения скорости C_t в материале контролируемого изделия.

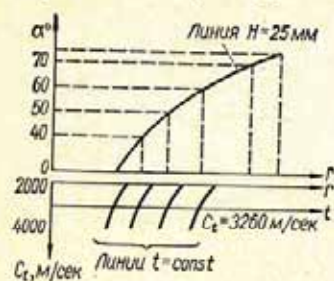


Рис. 69. Схема построения универсальной координатной шкалы УКШ-1.

Такая универсальная шкала представляет собой диаграмму в виде сетки перекрещивающихся линий L и H в системе координат α и t . Значения линий L и H размещаются сверху и снизу сетки соответственно. Координаты отражающей поверхности (дефекта) определяют с помощью универсальной шкалы следующим образом. Вначале глубиномером измеряют время T и вычисляют величину $t = T - 2t_n$. Затем на шкале находят точку пересечения линий L и H , соответствующую известным α и t . Значения линий L и H , пересекающихся в этой точке, дают искомые координаты отражающей поверхности (дефекта). При отсутствии на диаграмме линий с требуемыми значениями следует пользоваться интерполяцией.

Если шкала нанесена на координатной линейке, то калиброванную ось времени t целесообразно размещать на движке. Тогда путем перемещения движка можно будет совместить значение $2t_n$ с нулевыми значениями L и H , а по оси времени отсчитывать величину T , непосредственно измеряемую глубиномером. При этом величина $t = T - 2t_n$ будет вычислена автоматически.

На рис. 70 показана универсальная координатная линейка УКЛ-1. Линейка состоит из корпуса 1, движков 2, 3 и визиров 4, 5. На движке 2 нанесены основная координатная шкала I и часть вспомогательной номограммы II. Движок 3 проградуирован в мксек для стали или алюминия. Визеры крепятся к задним планкам с помощью винтов. Плавный ход визиров обеспечивают пружины. Планка визира 4 проградуирована в значениях угла α через один градус. На планке визира 5 изображена вторая часть вспомогательной номограммы.

С помощью шкалы I, визира 4 и движка 3 можно решать следующие задачи [52]: определять координаты залегания выявленных дефектов; оценивать возможность полного прозвучивания шва посредством данного искателя; выбирать угол ввода луча для контроля сварных швов; определять пределы перемещения искателя при прозвучивании сварных соединений.

Вспомогательная номограмма предназначена для расчета величины изменения угла ввода луча вследствие затухания ультразвука (см. гл. VI).

На обратной стороне корпуса линейки нанесены: шкала перевода децибел в относительные единицы, расчетные формулы для определения координат дефектов и справочная таблица скоростей распространения ультразвуковых волн в некоторых средах.

Универсальная координатная шкала УКШ-1, как и шкалы глубиномеров, рассчитана в прямоугольной системе координат. В то же время при контроле продольных швов в цилиндрических конструкциях более удобно отсчитывать глубину H залегания отражающих поверхностей в

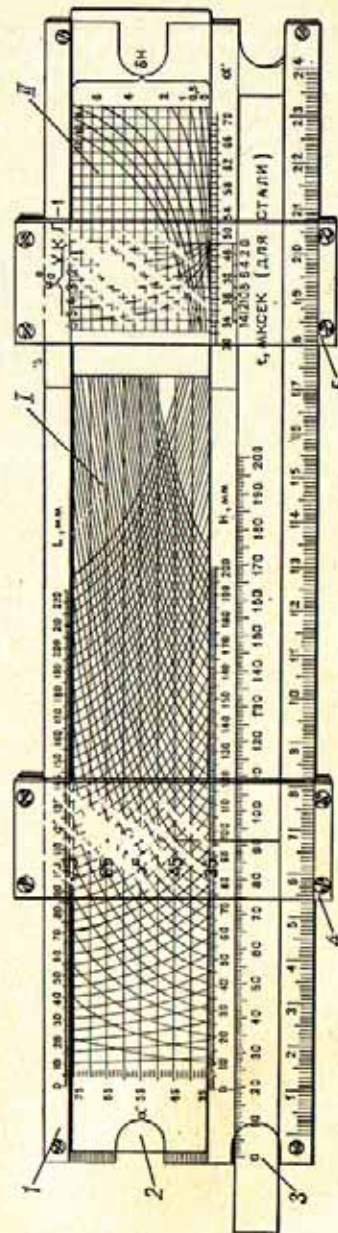


Рис. 70. Универсальная координатная линейка УКЛ-1 (НИИМ).

направлении по радиусу, а расстояние L от этой поверхности до центра излучения искателя — по цилиндрической поверхности (рис. 71). Для этих целей могут быть использованы универсальные координатные шкалы УКШ-2Н и УКШ-2В, построенные по тому же принципу, что и шкала УКШ-1 [111]. В качестве переменных в данных шкалах использованы отношения $\frac{H}{R}$, $\frac{L}{R}$, $\frac{t}{CIR}$ и α , где R — радиус кривизны по-

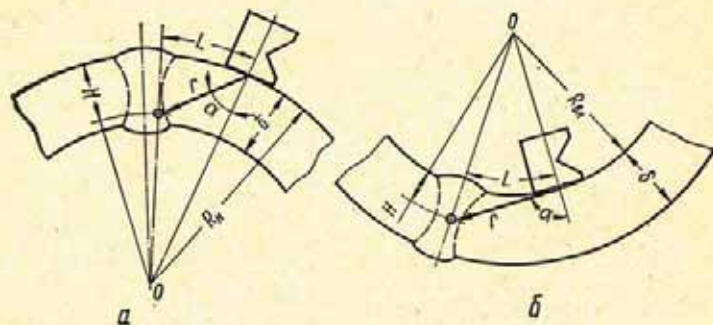


Рис. 71. Схемы расчета координат дефектов в сварных соединениях цилиндрических изделий при контроле:
а — с наружной стороны; б — с внутренней стороны.

верхности, на которой расположен искатель. Эти переменные связаны между собой следующими соотношениями:

для выпуклой (наружной) цилиндрической поверхности (шкала УКШ-2Н) —

$$\frac{t}{CIR_n} = \left(1 - \frac{H}{R_n}\right) \frac{\sin \left[\arcsin \frac{\sin \alpha}{1 - \frac{H}{R_n}} - \alpha \right]}{\sin \alpha}; \quad (45)$$

$$\frac{t}{CIR_n} = \frac{\sin \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{L}{R_n} \right)}{\sin \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{L}{R_n} + \alpha \right)}; \quad (46)$$

для вогнутой (внутренней) поверхности (шкала УКШ-2В) —

$$\frac{t}{CIR_{вн}} \left(1 + \frac{H}{R_{вн}}\right) \frac{\sin \left[\alpha - \arcsin \frac{\sin \alpha}{1 + \frac{H}{R_{вн}}} \right]}{\sin \alpha}; \quad (47)$$

$$\frac{t}{CIR_{вн}} = \frac{\sin \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{L}{R_{вн}} \right)}{\sin \left(\alpha - \frac{180}{\pi} \cdot \frac{L}{R_{вн}} \right)}. \quad (48)$$

Эти шкалы могут быть размещены на обратной стороне движка 2 универсальной координатной линейки УКЛ-1 или вместо шкалы УКШ-1.



Рис. 72. Комплект эталонных образцов и вспомогательных устройств КЭУ-1.

Для решения задач вместо линейки УКЛ-1 со шкалой УКШ-1 могут быть использованы универсальные координатные линейки УКЛ-2, выполненные на базе логарифмической [60].

В связи с широким внедрением ультразвуковой дефектоскопии для контроля качества сварных соединений в Советском Союзе с 1969 г. выпускают «Комплект эталонных образцов и вспомогательных устройств КЭУ-1» (рис. 72) [52].

В состав комплекта входят: эталон № 1; эталон № 2; эталон № 3 с подставкой; универсальная координатная линейка УКЛ-1; устройство для выполнения угловых отражателей УНЭД-Ц2 с бойками и кольцами, а также шкалы для эталона № 2.

Комплект эталонных образцов и вспомогательных устройств КЭУ-1 предназначен для эталонирования и стандартизации основных параметров ультразвукового контроля сварных соединений, выполняемого с помощью различных дефектоскопов.

7. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

При контроле сварных соединений, кроме дефектоскопа и эталонов, необходимо иметь: шабер, металлическую щетку и ветошь для очистки поверхности от грязи и брызг металла; линейку для измерения параметров шва и координат выявленных дефектов; мел для отметки дефектных

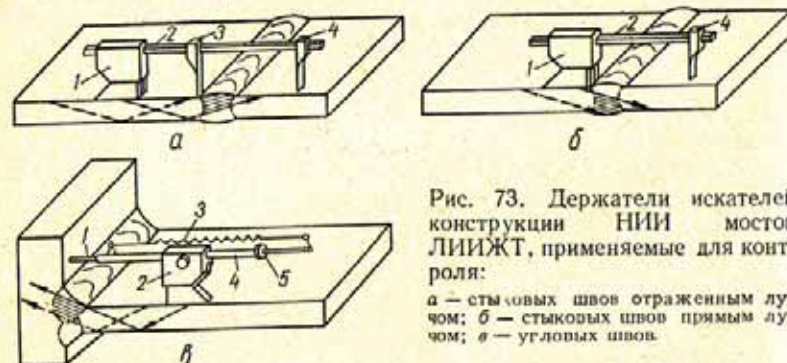


Рис. 73. Держатели искателей конструкции НИИ мостов ЛИИЖТ, применяемые для контроля:

а — стыковых швов отраженным лучом; б — стыковых швов прямым лучом; в — угловых швов.

участков; карандаш и бумагу для регистрации результатов контроля; приспособления для перемещения искателя в заданных пределах (держатель или магнитную линейку).

Разработанный в НИИ мостов держатель искателя для контроля стыковых швов (рис. 73, а, б) состоит из корпуса 1, в котором устанавливается искатель, рейки 2 с миллиметровыми делениями и ограничителей 3 и 4. Эти ограничители при контроле отраженным лучом (рис. 73, а), поочередно упираясь в кромки валика «усиления», органичивают перемещение искателя. Наружный ограничитель 4 фиксирует максимальное, а внутренний 3 — минимальное расстояние от искателя до кромки «усиления» шва.

При контроле прямым лучом (рис. 73, б) функцию ограничителя 3 выполняет передняя грань искателя. Поэтому ограничитель 3 снимают с держателя или придвигают вплотную к искателю.

Держатель для контроля угловых швов (рис. 73, в) состоит из корпуса 2, трубки 4 с миллиметровыми делениями, укрепляемой в корпусе стопорным винтом, штока 1 с миллиметровыми делениями, выдвигаемого из трубки пружиной 3, и гайки 5, регулирующей величину выдвижения штока из трубки. Положение искателя, при котором конец трубки 4 упирается в полку, соответствует минимальному расстоянию искателя от шва, а положение, при котором выдвинутый до отказа пружинной шток 1 еще упирается в полку, соответствует максимальному расстоянию искателя от полки. Искатель при контроле перемещают так, чтобы конец штока упирался в полку.

Если при контроле необходимо перемещать искатель на большом расстоянии от шва, как, например, при «послойном» прозвучивании стыковых швов сварнолитых конструкций, то вместо держателей более удобно применять предложенную ЦНИИТМАШ металлическую магнитную линейку, располагаемую на определенном расстоянии от шва.

В качестве приспособлений, определяющих пределы перемещения искателя, используют также координатные линейки, укрепляемые на призме искателя [181, 159, 171].

Глава IV

АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ ЭХО-ДЕФЕКТОСКОПА

Акустическим трактом ультразвукового дефектоскопа называется путь импульса от излучателя до отражателя и затем обратно к приемнику ультразвука. При расчете акустического тракта определяют ослабление амплитуды сигнала на этом пути, т. е. амплитуду сигнала от дефекта в зависимости от акустических свойств материала, частоты ультразвука, размеров и формы искателя и дефекта, а также расстояния между ними. Если обозначить амплитуду упругого напряжения или давления излучаемого (зондирующего) импульса через P_0 , а амплитуду напряжения или

давления принятого сигнала через P' , то будем определять отношение $\frac{P'}{P_0}$.

Для анализа акустического тракта важное значение имеют понятия полей излучения и приема искателей ультразвукового дефектоскопа. Поле излучения искателя $G(\vec{r})$ определяется амплитудой сигнала, действующего на элементарный приемник, который помещают в различные точки пространства с координатой $\vec{r}$. Поле приемника $G'(\vec{r})$ определяется амплитудой сигнала приемного искателя дефектоскопа при действии на него малого сферического излучателя, помещаемого в различные точки пространства.

В практике дефектоскопии искатель обычно служит одновременно излучателем и приемником ультразвука. Для определения его излучающе-приемных характеристик целесообразно проанализировать акустический тракт при отражении ультразвука от небольшой сферы. Такую сферу можно приближенно считать вторичным сферическим излучателем, амплитуда сигнала которого пропорциональна амплитуде падающей на нее волны. В результате амплитуда сигнала, отраженного от такого дефекта и принятого искателем, пропорциональна $G(\vec{r}) G'(\vec{r})$, т. е. произведению полей излучения и приема. Таким образом, рассматривая акустический тракт для отражения от малой сферы, определим вид полей излучения — приема искателя. Вблизи оси искателя (эта область называется параксиальной) поля излучения и приема идентичны, поэтому $G(\vec{r}) G'(\vec{r}) = G^2(\vec{r})$.

1. ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ — ПРИЕМА НОРМАЛЬНОГО ИСКАТЕЛЯ

Искатель можно представить как совокупность большого количества элементарных излучателей (приемников) колебаний. Ультразвуковые волны, излучаемые различными элементарными источниками A (рис. 74), интерферируют. Чтобы найти суммарный сигнал в некоторой точке B пространства, расположенной на расстоянии r от центра излучателя, нужно просуммировать, т. е. проинтегрировать, действие всех элементарных источников по площади искателя, учитывая при этом, что сигналы от различных источников

пробегают разный путь r_{AB} и приходящие колебания отличаются по фазе.

Пусть точка B находится на оси x круглого преобразователя радиусом a . Тогда максимальная разность фаз $\Delta\varphi$ приходящих колебаний соответствует разнице путей от источников A на границе и в центре искателя:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + a^2} - x). \quad (49)$$

Если a значительно меньше x , то $\sqrt{x^2 + a^2} \approx x + \frac{a^2}{2x}$ и $\Delta\varphi \approx \frac{\pi a^2}{\lambda x}$.

Если точка B расположена далеко от искателя, разность фаз приходящих сигналов невелика. В этом случае происходит их простое суммирование. При приближении к искателю (уменьшении x) амплитуда сигнала от каждого элементарного источника увеличивается, но разность фаз возрастает. Когда $\Delta\varphi$ превзойдет π , на окружности искателя появятся элементарные источники, от которых приходят сигналы в противофазе по отношению к сигналам от центральной части искателя. В результате при дальнейшем уменьшении расстояния сигнал не возрастает, а наоборот, уменьшается.

Граничное значение $x = r_0$ определяется формулой

$$\Delta\varphi = \frac{\pi a^2}{\lambda r_0} = \pi; \quad (50)$$

$$r_0 = \frac{a^2}{\lambda}.$$

Значение r_0 называют границей ближней зоны искателя. Если еще ближе подойти к искателю, то в точке $x = \frac{r_0}{2}$ разность фаз $\Delta\varphi$ составит 2π . При этом вся поверхность искателя разобьется на две области (зоны Френеля), сигналы от которых примерно равны по амплитуде, но смещены по фазе на π . В результате эти сигналы почти уничтожат друг друга и в этой точке суммарный сигнал будет минимальным.

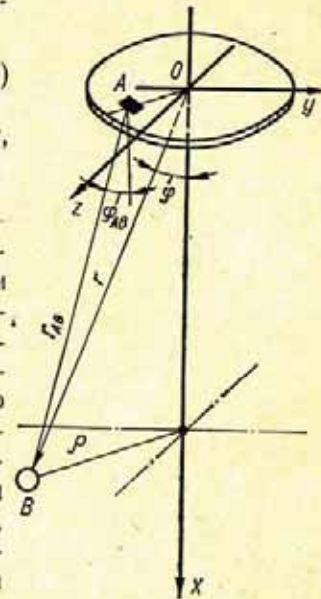


Рис. 74. Схема расчета поля излучения-приема нормального искателя.

При дальнейшем уменьшении x аналогично будут образовываться другие максимумы и минимумы.

Смещение точки B в сторону от оси также приводит к изменению соотношения фаз приходящих сигналов. Рассмотрим максимальную разность фаз, пропорциональную разнице путей, для дальней зоны искателя. Наименьшее значение разности фаз имеет место, когда точка B находится на оси излучателя. Смещение точки B на расстояние p вызывает увеличение разности

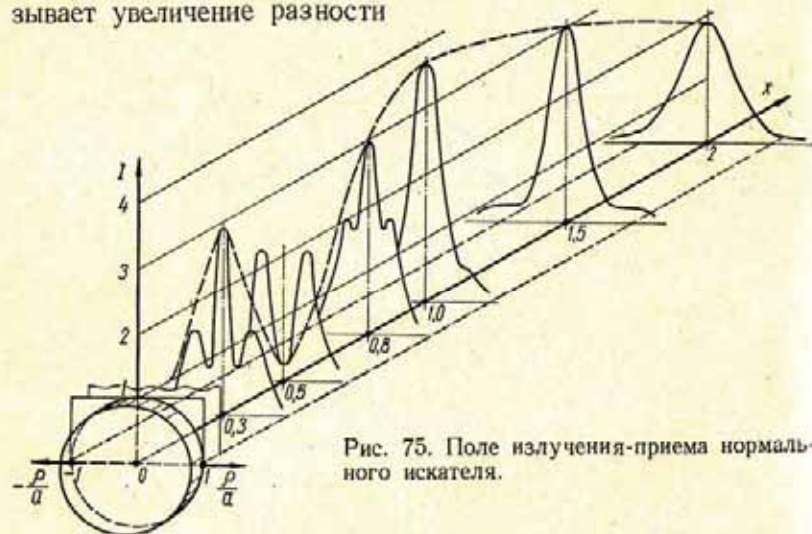


Рис. 75. Поле излучения-приема нормального искателя.

фаз и суммарный сигнал уменьшается. При определенном значении p , как и в случае уменьшения x , сигнал достигнет минимума, затем второго максимума и т. д.

На рис. 75 показан общий вид поля излучения-приема круглого искателя, полученный на основе обработки экспериментальных данных. Диаграмма изображена как функция двух безразмерных параметров: $\frac{x}{r_0}$ — расстояния вдоль оси, отнесенного к длине ближней зоны, и $\frac{p}{a}$ — смещения от оси, отнесенного к радиусу искателя. С помощью этой диаграммы можно приблизительно определить амплитуду P' сигнала от дефекта в любой точке пространства, для любого диаметра искателя и частоты ультразвука. Амплитуду сигнала рассчитывают по формуле

$$P' = P_0 \frac{A\lambda^2}{S_a} I. \quad (51)$$

Здесь P' и P_0 — амплитуды излученного и принятого сигналов; S_a — площадь излучателя-приемника; A — безразмерная величина, характеризующая отражательную способность дефекта; I — функция поля излучения-приема (рис. 75).

Функция I , кроме $\frac{x}{r_0}$ и $\frac{p}{a}$, определяется также формой и длительностью ультразвукового импульса. Диаграмма, приведенная на рис. 75, приблизительно соответствует колоколо-

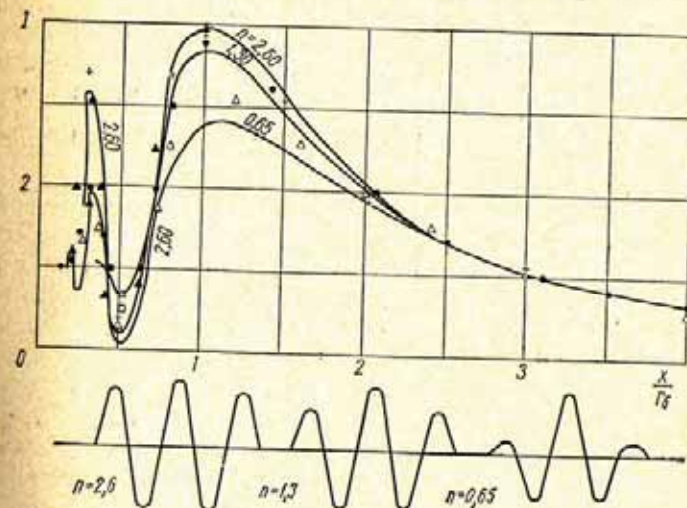


Рис. 76. Поле излучения-приема на оси искателя для импульсов различной длительности, полученное:

$\times$ — И. Н. Ермоловым (длительные импульсы); $\bullet$ — И. Крауткременером [183]; $\blacktriangle$ — И. Образом [188] (длительные импульсы); $\triangle$ — И. Образом [189] (короткие импульсы).

образному импульсу, в котором амплитуда колебаний уменьшается в 2 раза за 0,65 периода колебаний ($n = 0,65$).

Влияние импульсного характера излучения рассмотрим на примере изменения поля на оси искателя. Здесь поле приближенно описывается формулой

$$I = \left[1 - e^{-\left(0,42 \frac{r_0}{xn}\right)^2} \right]^2 + 4e^{-\left(0,42 \frac{r_0}{xn}\right)^2} \sin^2 \frac{\pi r_0}{2x}. \quad (52)$$

На рис. 76 показаны кривые, построенные по этой формуле для различных значений n , а также экспериментальные данные, полученные различными исследователями [183, 188, 189].

В процессе контроля изделия оператор стремится найти положение искателя, соответствующее максимальному отражению от дефекта. Если дефект находится в ближней зоне искателя на расстоянии $\frac{x}{r_0} = \frac{1}{2}$, где на оси искателя имеется минимум поля (см. рис. 75), то оператор сдвинет искатель в сторону и зафиксирует отражение от дефекта, когда тот совпадает с боковым максимумом.

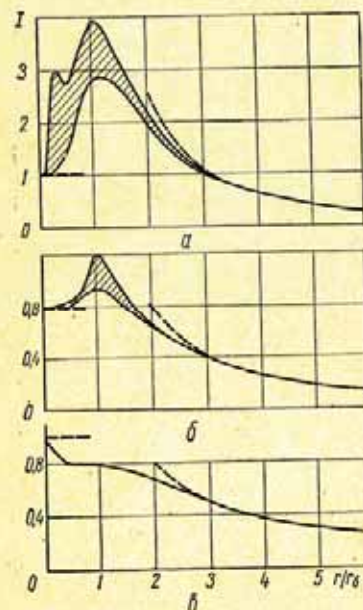


Рис. 77. Амплитуды отражения от дефектов различной формы в зависимости от расстояния:

а — точечный дефект; б — линейный дефект; в — бесконечная плоскость.

На рис. 77, а показана кривая максимального значения амплитуды сигнала от малого дефекта в зависимости от расстояния до искателя $\frac{r}{r_0}$. Заштрихованная область соответствует изменению амплитуды, вызываемому различной длительностью ультразвукового импульса. В некоторых областях поле имеет достаточно простой вид и может быть вычислено по формулам, приведенным ниже в табл. 5. Результаты вычислений показаны пунктиром на рис. 77, а. В непосредственной близости от искателя $I = 1$. В реальных условиях ультразвукового контроля указанный случай осуществить трудно, так как выявлению близких дефектов мешает мертвая зона дефектоскопа. Он реализуется только для искателей большого диаметра, работающих на высокой частоте, у которых ближняя зона значительно превосходит мертвую зону. В дальней зоне на значительном удалении от границы ближней зоны ($x > r_0$) из формулы (52) легко получить:

$$I = \left(\pi \frac{r_0}{x} \right)^2 = \left(\frac{S_a}{\lambda x} \right)^2. \quad (53)$$

В дальней зоне искателя поле имеет вид расходящихся лучей, причем интенсивность излучения падает с увели-

чением угла отклонения луча φ . Для круглого искателя, излучающего импульсы большой длительности,

$$I = \left[\frac{\pi r_0}{r} \cdot \frac{2J_1 \left(2\pi \frac{r r_0}{r} \right)}{2\pi \frac{r r_0}{ar}} \right]^2 \quad (54)$$

или

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{AS_a}{r^2} \left[\frac{2J_1(ak \sin \varphi)}{ak \sin \varphi} \right]^2, \quad (55)$$

где J_1 — функция Бесселя первого порядка; k — волновое число.

Выражение в квадратных скобках и есть $\Phi(\varphi) = \frac{2J_1(ak \sin \varphi)}{ak \sin \varphi}$ — диаграмма направленности нормального искателя. При

$$ak \sin \varphi_p = 3,83$$

или

$$\sin \varphi_p = 0,61 \frac{\lambda}{a} \quad (56)$$

функция J_1 обращается в нуль. По формуле (56) определяют значение угла $\varphi = \varphi_p$, ограничивающего основной лепесток диаграммы направленности.

Как следует из формул (51) и (52), в дальней зоне импульсный характер излучения слабо влияет на поле излучения-приема вблизи оси искателя, однако оказывает существенное влияние на диаграмму направленности при углах $\varphi > \varphi_p$. На рис. 78 показана вычисленная функция направленности $\Phi(\varphi)$ для импульсов различной длительности [109]. Как видно, при $ak \sin \varphi \leq 2,5$ импульсным характером излучения можно пренебречь.

В случае, когда пьезопреобразователь имеет не круглую, а прямоугольную форму со сторонами a_1 и a_2 , картина максимумов и минимумов в ближней зоне искателя

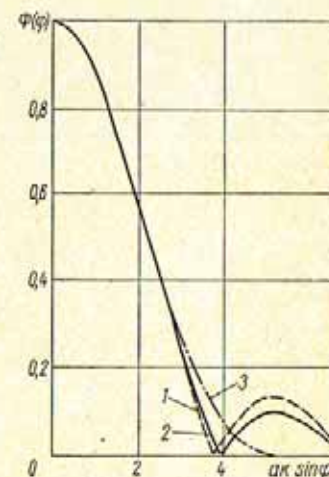


Рис. 78. Диаграмма направленности круглого излучателя:

1 — непрерывное излучение; 2 и 3 — импульсное излучение при λ , равном 1,3 и 0,6 соответственно [109].

сильно искажается и сглаживается. Диаграмма направленности в дальней зоне определяется формулой

$$\Phi(\theta, \varphi) = \frac{\sin(ka_1 \sin \varphi \cos \theta)}{ka_1 \sin \varphi \cos \theta} \cdot \frac{\sin(ka_2 \sin \varphi \sin \theta)}{ka_2 \sin \varphi \sin \theta}, \quad (57)$$

где φ — угол между направлением r из центра искателя к дефекту и осью x ; θ — угол между проекцией r на поверхность искателя и стороной искателя $2a_1$.

Рассмотренная картина акустического поля искателя справедлива для кварцевых преобразователей. В преобразователях из ЦТС или титаната бария пьезоэлектрические свойства заметно изменяются в разных точках пьезопластины. Это сильно искажает акустическое поле, особенно в ближней зоне [189]. В переходной и дальней зонах в параксиальной области картина остается довольно стабильной, однако и здесь при большой неоднородности пьезопластин возможны искажения, приводящие, например, к тому, что направление максимального излучения отклоняется от оси x на $2-3^\circ$ [88].

2. ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ — ПРИЕМА НАКЛОННОГО ИСКАТЕЛЯ

Особенность акустического поля наклонного искателя состоит в том, что ультразвуковые волны излучаются в материал призмы, а затем, испытав преломление на границе, попадают в изделие. Это сильно изменяет ближнее поле искателя. Распределение энергии в ближнем поле становится более равномерным, отсутствуют четко выраженные максимумы и минимумы.

Поле в дальней зоне образуется так, как будто лучи диаграммы направленности возникли уже в призме искателя, а затем преломились на границе призмы с изделием [63]. При этом ослабление каждого луча определяется значением коэффициента прозрачности для данного угла падения (см. рис. 11).

В результате в плоскости падения акустической оси (рис. 79) диаграмма направленности расширяется вследствие преломления, так как угол преломления возрастает тем быстрее, чем больше угол падения. Диаграмма направленности становится несимметричной. Амплитуда поля оказывается более высокой в нижней части, где расхож-

дение лучей меньше, а интенсивность — больше. Это явление тем сильнее, чем больше угол призмы искателя. В гл. IV приведены расчетные диаграммы направленности в плоскости падения для наклонных искателей.

При расчете расстояния от искателя до дефекта в плоскости падения волны допустимо заменить мнимым излучателем-приемником с центром в точке O_1 (рис. 79). Точка O_1 располагается на продолжении преломленной акустической оси на расстоянии

$$O_1O' = r' = r_1 \frac{C_l}{C_t} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right), \quad (58)$$

где r_1 — действительный путь OO' ультразвука в призме вдоль акустической оси; C_l и C_t — скорости падающей и преломленной волн.

В сечении плоскостью, проходящей через преломленную акустическую ось и перпендикулярной плоскости падения, поле остается симметричным. Диаграмма направленности будет такой же, как если бы поперечные волны непосредственно излучались в изделие мнимым источником с центром в точке O_2 (на рис. 79 не показан), расположенным дальше от точки O' , чем источник O_1 :

$$O_2O' = r'' = r_1 \frac{C_l}{C_t}. \quad (59)$$

Для искателя с плексигласовой призмой и преломляющим углом $\beta \approx 40^\circ$ поле в изделии с удовлетворительной точностью представляется как поле, излученное мнимым пьезопреобразователем в виде пластины эллиптической формы с полуосями $2a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$ в плоскости падения и $2a$ в перпендикулярной плоскости (рис. 79). Расстояние r_2 до этой пластины от точки ввода O' следует принять средним между r' и r'' , т. е. примерно

$$r_2 = r_1 \frac{C_l}{C_t} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}. \quad (60)$$

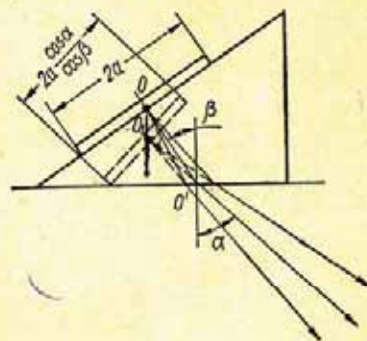


Рис. 79. Схема расчета поля призматического искателя.

При приближении угла падения к критическим значениям точность представления поля с помощью мнимого пьезопреобразователя существенно понижается.

Рассмотренное приближенное представление преломленного акустического поля позволяет рассмотреть работу фокусирующего наклонного искателя. Если фокусировка производится сферически искривленным пьезоэлементом и излучение распространяется в однородной среде, то радиус фокального пятна

$$\rho_0 = 0,61 \frac{\lambda R}{a}, \quad (61)$$

где a — радиус пьезопластины; R — радиус кривизны ее. Отсюда следует, что для достижения хорошей фокусировки необходимо увеличить отношение диаметра искателя к длине волны. Сравнивая формулы (56) и (61), видим, что радиусы ультразвукового пучка, вычисленные по этим формулам, совпадают, т. е. в дальней зоне искателя фокусировка не достигается. Коэффициент усиления K , определяемый отношением амплитуд эхо-сигналов от небольшого дефекта при контроле фокусирующим и нефокусирующим искателями, вычисляется по формуле

$$K = \frac{S_a^2}{(1 \div 4) \lambda^2 R^2}. \quad (62)$$

Множитель $(1 \div 4)$ соответствует изменению эхо-сигнала от дефекта при его удалении от пьезопластины до границы ближнего поля искателя.

В результате преломления ультразвука на границе призмы с изделием наблюдается искажение звукового поля и расширение фокального пятна. Для плексигласового искателя с углом призмы 40° заменим пьезопреобразователь мнимым источником. Тогда ширина фокального пятна в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, сохранится, а в плоскости падения увеличится в соответствии с уменьшением размера искателя:

$$\rho_{02} = 0,61 \frac{\lambda R}{a} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}. \quad (63)$$

Преломление ультразвука вызывает изменение положения фокального пятна, причем при этом возникает явление астигматизма: фокальное пятно размывается вдоль оси

искателя. В плоскости падения (рис. 80, а) расстояние от точки ввода O' до фокального пятна F' определяется по формуле

$$O'F' = R_2' = (R - R_1) \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right)^2, \quad (64)$$

где C_1 и C_2 — скорости звука в верхней и нижней средах.

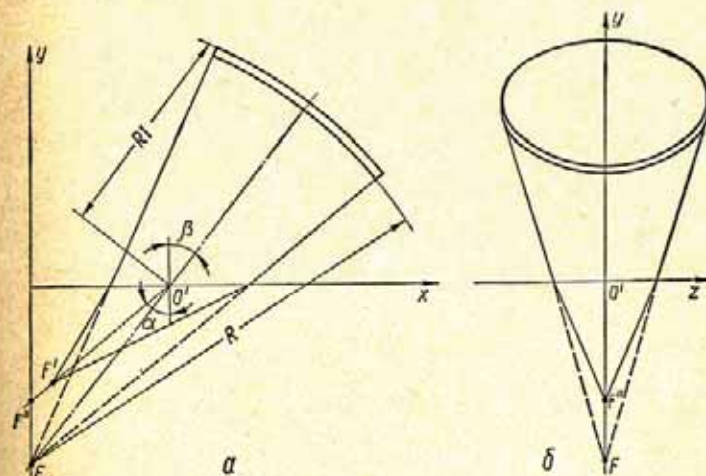


Рис. 80. Положение фокального пятна наклонного фокусирующего искателя.

В плоскости, перпендикулярной плоскости падения и проходящей через преломленную акустическую ось (рис. 80, б), расстояние до фокального пятна

$$O'F'' = R_2'' = (R - R_1) \frac{C_1}{C_2}. \quad (65)$$

Проектируя изображение на плоскость $x = 0$, определяем

$$y_{OF} = y_{OF} \frac{C_1 \cos \alpha}{C_2 \cos \beta}. \quad (66)$$

Полученное соотношение показывает, что в плоскости $x = 0$ преломление проекций лучей происходит с показателем преломления $\frac{C_1 \cos \alpha}{C_2 \cos \beta}$. Это соотношение сохраняется при других расчетах, связанных с проекциями преломленных

лучей. Например, при фокусировке ультразвука плоско-вогнутой линзой фокусное расстояние F в случае нормального падения рассчитывается по формуле

$$F = R_l \left| \frac{C_l}{C_n - C_l} \right|, \quad (67)$$

где R_l и C_l — радиус линзы и скорость звука в ее материале.

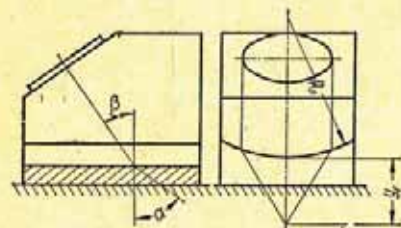


Рис. 81. Положение фокуса искателя с протектором в виде линзы.

Используя формулы (66) и (67), определим глубину залегания фокального пятна искателя с цилиндрическим фокусирующим протектором (рис. 81), скорость звука в котором C_l равна скорости звука в изделии. Заменяя $\frac{C_l}{C_n}$ на $\frac{C_l \cos \alpha}{C_l \cos \beta}$, по-

лучим

$$y_F = R_l \left| \frac{C_l \cos \beta}{C_l \cos \beta - C_l \cos \alpha} \right|, \quad (68)$$

где C_l — скорость звука в призме; C_l — скорость звука в протекторе и изделии.

3. ОТРАЖЕНИЕ ОТ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ НОРМАЛЬНЫМ ИСКАТЕЛЕМ

Естественные дефекты могут иметь самую различную форму, ориентацию и акустические свойства, которые заранее неизвестны. Рассмотрим отражение ультразвука от моделей дефектов, имеющих достаточно простую геометрическую форму — диск, сферу, цилиндр, полосу, бесконечную плоскость. Выполнить отражатель в виде диска или сферы внутри твердого тела очень сложно, поэтому вместо них применяют торцевые отверстия с плоским или сферическим дном. На рис. 82 показаны искусственные отражатели, применяемые при контроле нормальным искателем.

Отражение от диска и отверстия с плоским дном. Дiskoобразный отражатель подобен довольно часто встречающимся дефектам типа расслоений, раскованных газо-

вых пузырей и т. д. Отверстие с плоским дном, имитирующее дискообразный отражатель, является основным типом модели дефекта, по которому настраивается чувствительность и измеряются размеры реальных дефектов.

На рис. 83 показано изменение амплитуды эхо-сигнала в зависимости от диаметра $2b$ диска или плоскодонного отверстия. Кривая 1 соответствует расположению дефекта

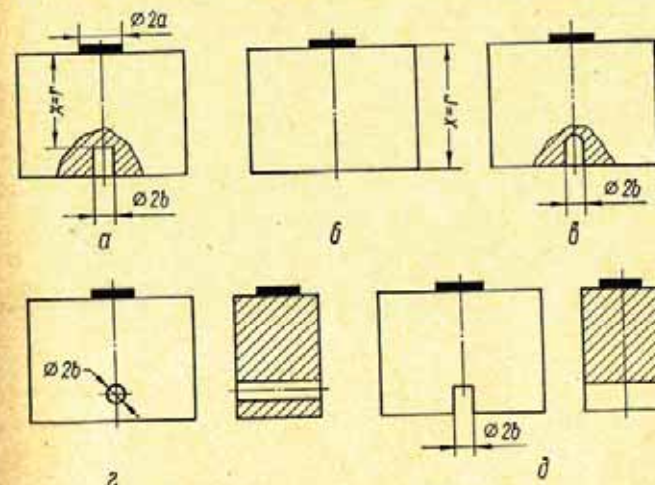


Рис. 82. Отражатели, используемые при контроле нормальным искателем:

а — плоскодонное отверстие; б — плоскость; в — отверстие со сферическим дном; г — цилиндрическое отверстие; д — паз с плоским дном.

на границе ближней зоны искателя, а кривая 2 — в дальней зоне. На этих кривых выделены римскими цифрами четыре области, для которых характерны разные законы отражения:

1. Размер дефекта меньше длины волны ультразвука ($2b < \lambda$). Здесь проявляется разный характер отражения от диска и плоскодонного отверстия. Отражательная способность дефекта характеризуется безразмерным параметром A , который указывает величину отраженного сигнала при падении на дефект плоской волны (см. формулу (51)). В области $2b \ll \lambda$, для бесконечно тонкого полого диска параметр

$$A = A_d = 2,4 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3, \quad (69)$$

а для плоскодонного отверстия

$$A = A'_d = \frac{S_b}{\lambda^2} = \pi \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2. \quad (70)$$

Например, если размер дефекта $\frac{b}{\lambda} = 0,2$, то амплитуда отражения в обратном направлении для диска $A_d = 0,0195$, а для плоскодонного отверстия $A'_d = 0,126$, т. е. в 6,5 раза больше. Значительно худшее отражение от диска объясняется огибанием его ультразвуковыми волнами. Это обстоятельство следует учитывать при настройке чувствительности дефектоскопа на выявление дефектов, меньших длины волны. На рис. 82 сплошные линии соответствуют отражению от плоскодонного отверстия, а пунктир — отражению от диска для кривой 1.

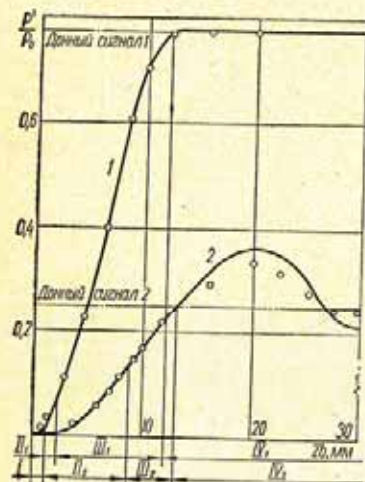


Рис. 83. Амплитуда $\frac{P}{P_0}$ эхо-сигнала от плоскодонного отверстия и диска для нормального излучателя ($2a = 12$ мм, $\lambda = 2,35$ мм): 1 — $r = 15$ мм; 2 — $r = 100$ мм.

II. Размер дефекта больше длины волны, но значительно меньше ширины главного максимума поля излучателя $2\rho_m$ ($\lambda < 2b < 0,4\rho_m$). В дальней зоне полуширина основного лепестка, согласно формуле (56),

$$\rho_m = r \operatorname{tg} \varphi_0 = 0,61 \frac{r\lambda}{a}. \quad (71)$$

Отсюда условие для границы области II можно записать в виде $b < 0,125 \frac{r\lambda}{a}$. На границе ближней зоны, где $\rho_m \approx \approx a$, условие запишется так: $b < 0,2a$.

В этой области амплитуда сигнала увеличивается пропорционально как площади диска, так и площади плоскодонного отверстия:

$$A_d = A'_d = \frac{S_b}{\lambda^2}. \quad (72)$$

Приближенные формулы, приведенные в табл. 5, относятся именно к этой области.

III. Размер отражателя приближается к размеру излучателя

$$0,4\rho_m < 2b < \begin{cases} 2a & \text{при } r_0 < r < 6r_0 \\ 0,45\sqrt{\lambda r} & \text{при } r > 6r_0 \end{cases}$$

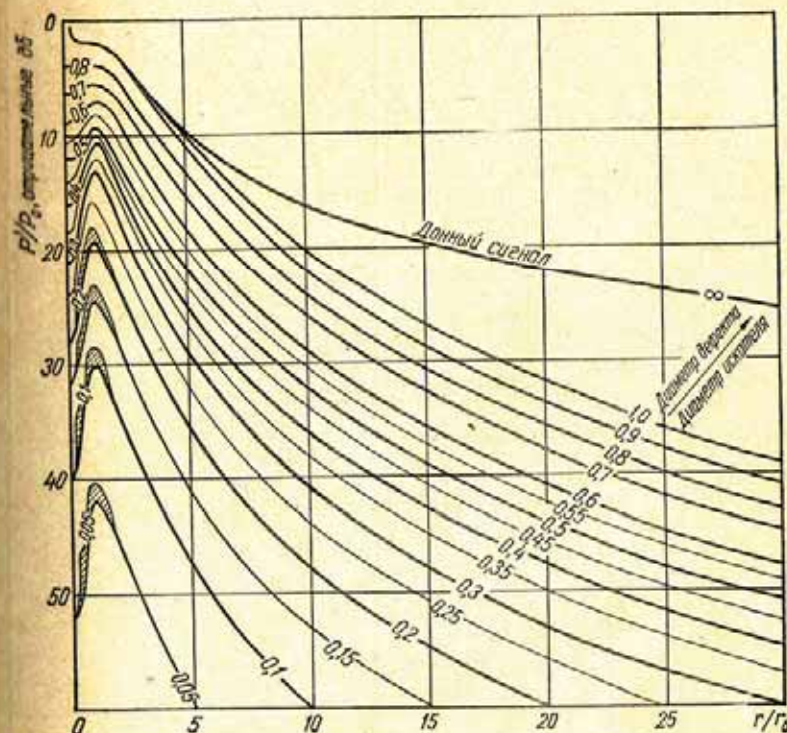


Рис. 84. АРД-диаграмма для максимального эхо-сигнала от плоскодонного отверстия.

В этой области сигнал от отражателя возрастает примерно пропорционально b и достигает величины, равной донному сигналу.

IV. Размер отражателя превосходит размеры излучателя

$$2b > \begin{cases} 2a & \text{при } r_0 < r < 6r_0 \\ 0,45\sqrt{\lambda r} & \text{при } r > 6r_0 \end{cases}$$

Основные формулы для расчета ослабления

Тип отражателя	Ослабление	
	Ближняя зона $r < r_0$, нормальный искатель	
Плоский дефект площадью S_b	$\frac{P'}{P_0} = (1 \div 4) \frac{S_b}{S_a} e^{-2\beta r}$	
Сфера диаметром $2b$	$\frac{P'}{P_0} = (1 \div 4) \frac{\lambda b}{2S_a} e^{-2\beta r}$	
Цилиндр диаметром $2b$, длиной $2l$	$\frac{P'}{P_0} = (1 \div 4) \frac{l \sqrt{2b\lambda}}{S_a} e^{-2\beta r}$	
Бесконечная полоса шириной $2b$	Искатель круглый диаметром $2a$	$\frac{P'}{P_0} = (1,6 \div 2,4) \frac{b}{a} e^{-2\beta r}$
	Искатель прямоугольный со стороной $2a_1$, перпендикулярной дефекту	$\frac{P'}{P_0} = (1 \div 1,5) \frac{b}{a_1} e^{-2\beta r}$
Бесконечный цилиндр диаметром $2b$	Искатель круглый диаметром $2a$	$\frac{P'}{P_0} = (0,565 \div 0,85) \frac{\sqrt{\lambda b}}{a} e^{-2\beta r}$
	Искатель прямоугольный со стороной $2a$, перпендикулярной дефекту	$\frac{P'}{P_0} = (0,35 \div 0,53) \frac{\sqrt{\lambda b}}{a} e^{-2\beta r}$

сигнала акустического тракта

Таблица 5

$\frac{P'}{P_0}$ сигнал	
Дальняя зона $r > 3r_0$	
Нормальный искатель	Наклонный искатель
$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2} e^{-2\beta r}$	$\frac{P'}{P_0} = \frac{D_{lt} S_a S_b \cos \alpha}{\lambda^2 (r + r_0)^2 \cos \beta} e^{-2(\beta_1 r_1 + \beta_2 r)}$
$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_a b}{2\lambda r^2} e^{-2\beta r}$	$\frac{P'}{P_0} = \frac{D_{lt} S_a b \cos \alpha}{2\lambda_1 (r + r_2)^2 \cos \beta} e^{-2(\beta_1 r_1 + \beta_2 r)}$
$\frac{P'}{P_0} = \sqrt[8]{8} \frac{S_a b}{r^2} \sqrt{\frac{b}{\lambda^3}} e^{-2\beta r}$	$\frac{P'}{P_0} = \sqrt[8]{8} \frac{D_{lt} S_a b \cos \alpha}{(r + r_2)^2 \cos \beta} \times \sqrt{\frac{b}{\lambda^3}} e^{-2(\beta_1 r_1 + \beta_2 r)}$
$\frac{P'}{P_0} = \sqrt[3]{2} \frac{S_a b}{(\lambda r)^2} e^{-2\beta r}$	$\frac{P'}{P_0} = \sqrt[3]{2} \frac{D_{lt} S_a b \cos \alpha}{[\lambda_1 (r + r_2)]^2 \cos \beta} \times e^{-2(\beta_1 r_1 + \beta_2 r)}$
$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_a}{2\lambda} \sqrt{\frac{b}{r^3}} e^{-2\beta r}$	$\frac{P'}{P_0} = \frac{D_{lt} S_a \cos \alpha}{2\lambda_1 \cos \beta} \times \sqrt{\frac{b}{(r + r_2)^3}} e^{-2(\beta_1 r_1 + \beta_2 r)}$

Тип отражателя	Ослабление
	Ближняя зона $r < r_0$ нормальный искатель
Бесконечная плоскость	$\frac{P'}{P_0} = (1 \div 0,8) e^{-2\delta_1 r}$
Цилиндрическая фокусирующая поверхность	$\frac{P'}{P_0} \approx e^{-2\delta_1 r}$

Примечание. В формулах приняты следующие обозначения: P_0 — площадь искателя; S_b — площадь дефекта; r — расстояние от искателя до дефекта; $r_0 = \frac{C_l \cos \alpha}{C_t \cos \beta}$ — приведенный путь в призме искателя; α — угол падения в призме искателя; β — угол преломления; D_{lt} — коэффициент прохождения через границу; δ_1 — коэффициент затухания поперечных волн в изделии; δ_2 — коэффициент затухания продольных волн в призме искателя; $(1 \div 0,8)$ и т. п. — изменение численного коэффициента при увеличении расстояния r от 0 до r_0 .

В этой области амплитуда сигнала остается неизменной, равной амплитуде донного сигнала (кривая 1), либо превосходит амплитуду донного сигнала и приближается к нему, испытав ряд осцилляций. Эти осцилляции объясняются тем, что искатель попадает в ближнюю зону дефекта, которая превосходит ближнюю зону искателя при $b > a$.

Для расчета амплитуды эхо-сигнала от дефекта в широком диапазоне размеров дефектов, искателей, частот и расстояний между ними применяется безразмерная номограмма: амплитуда — расстояние — диаметр (АРД-диаграмма) (рис. 84). На оси ординат этой диаграммы указаны значения амплитуды отраженного от диска сигнала, отнесенные к амплитуде максимального сигнала, который может быть получен при полном возвращении к приемнику всей излученной в изделии энергии. Это отношение выражено в отрицательных децибелах. По оси абсцисс отложено расстояние до дефекта, причем за единицу принята длина ближней зоны искате-

Продолжение табл. 5

$\frac{P'}{P_0}$ сигнала	Дальняя зона $r > 3r_0$	
	Нормальный искатель	Наклонный искатель
	$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_a}{2\lambda r} e^{-2\delta_1 r}$	$\frac{P'}{P_0} = \frac{D_{lt} S_a \cos \alpha}{2\lambda_t (r + r_0) \cos \beta} e^{-2(\delta_1 r_1 + \delta_2 r)}$
	$\frac{P'}{P_0} = \sqrt{\frac{S_a}{2\lambda r}} e^{-2\delta_1 r}$	$\frac{P'}{P_0} = D_{lt} \times \sqrt{\frac{S_a}{2\lambda_t (r + r_0)}} e^{-2(\delta_1 r_1 + \delta_2 r)}$

излученный акустический сигнал; P' — принятый акустический сигнал; S_a — площадь дефекта; $r_0 = \frac{S_a}{\pi \lambda}$ — граница ближней зоны; r_1 — средний путь ультразвука; C_l — скорость продольных волн в призме искателя; C_t — скорость поперечных волн в изделии; λ — длина продольных ультразвуковых волн в изделии; λ_t — длина поперечных волн в призме искателя; δ — коэффициент затухания продольных волн в изделии; δ_1 — коэффициент затухания поперечных волн в призме искателя; $(1 \div 0,8)$ и т. п. — изменение численного коэффициента при увеличении расстояния r от 0 до r_0 .

ля. Параметром семейства кривых является отношение диаметра дефекта к диаметру излучателя. Заштрихованные области в левой части диаграммы соответствуют изменению амплитуд, вызываемому различной длительностью ультразвуковых импульсов.

В качестве примера определим с помощью АРД-диаграммы амплитуду сигнала от дефекта диаметром 6 мм, расположенного в стальном образце на глубине 100 мм перпендикулярно оси нормального искателя диаметром 12 мм на частоту 2,5 МГц.

$$\text{Длина волны } \lambda = \frac{C_l}{f} = \frac{5,9}{2,5} = 2,35 \text{ мм.}$$

$$\text{Длина ближней зоны } r_0 = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{6^2}{2,35} = 15,3 \text{ мм.}$$

$$\text{Приведенное расстояние } \frac{r}{r_0} = \frac{100}{15,3} = 6,5.$$

$$\text{Приведенный диаметр дефекта } \frac{2b}{2a} = \frac{6}{12} = 0,5.$$

На пересечении вертикали $\frac{r}{r_0} = 6,5$ и кривой $\frac{2b}{2a} = 0,5$ находим $\frac{P'}{P_0} = 25,5$ отп. $\delta b = 0,053$.

Чтобы учесть затухание ультразвука, нужно умножить полученное значение на $e^{-2\delta r}$. Пусть коэффициент затухания равен $0,00125 \frac{\text{непер}}{\text{мм}}$, тогда, переходя к децибелам, получим

$$20 \lg e^{-2\delta r} = -17,3\delta r = 2,17 \text{ отп. } \delta b.$$

Таким образом, с учетом затухания $\frac{P'}{P_0} \approx 27,7$ отп. $\delta b = 0,0415$.

Если дискообразный отражатель расположен не перпендикулярно к оси искателя, то амплитуда сигнала от него уменьшается, как показано на рис. 85. Дефект становится как бы вторичным излучателем и сигнал от него убывает с увеличением θ тем быстрее, чем больше диаметр дефекта.

Отражение от плоскости. Бесконечной плоскостью является поверхность изделия или образца (рис. 82, б). По величине сигнала от такой поверхности (донного сигнала) производят настройку дефектоскопа и измеряют затухание ультразвука.

Отражение ультразвука от плоскости происходит так же, как отражение света от зеркала (рис. 86). Это означает, что поле отражения аналогично полю излучения мнимого источника, расположенного за зеркалом на расстоянии, равном расстоянию до действительного источника (на рис. 86 показан пунктиром). Отличие состоит только в том, что для лучей с большим углом θ происходит частичная трансформация продольных волн в поперечные и в связи с этим отраженная продольная волна уменьшается по амплитуде.

Если отражающая плоскость расположена в ближней зоне, то почти вся излученная энергия возвращается назад к искателю, а если в дальней зоне, то амплитуда сигнала убывает пропорционально $\frac{1}{r}$ (см. табл. 5). На рис. 77, в показана кривая уменьшения донного сигнала в относительных единицах в зависимости от расстояния до искателя. На рис. 84 та же кривая изображена в децибелах (кривая «Донный сигнал»). Покажем на примере, как

рассчитывают донный сигнал по этой кривой. Пусть диаметр искателя равен 12 мм, частота — 2,5 МГц, а расстояние до плоскости в стали — 100 мм. Тогда $\lambda = 2,36$ мм, $r_0 = 15,3$ мм, $\frac{r}{r_0} = 6,5$, а ослабление донного сигнала при нулевом затухании $\frac{P'}{P_0} = 12$ отп. $\delta = 6 = 2,25$.

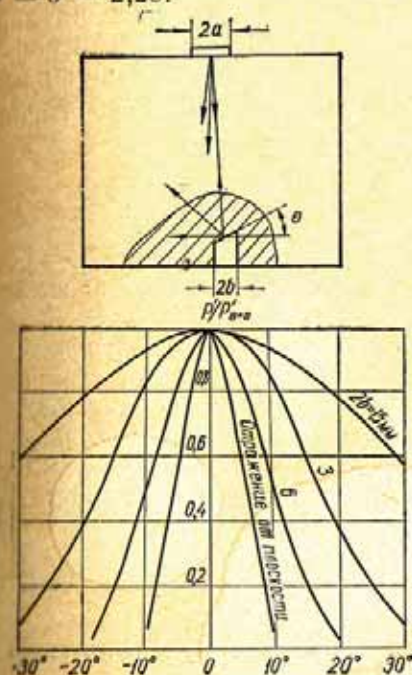


Рис. 85. Уменьшение амплитуды сигнала при отражении от наклонных дефектов в дальней зоне искателя ($2a = 12$ мм; $\lambda = 2,35$ мм).

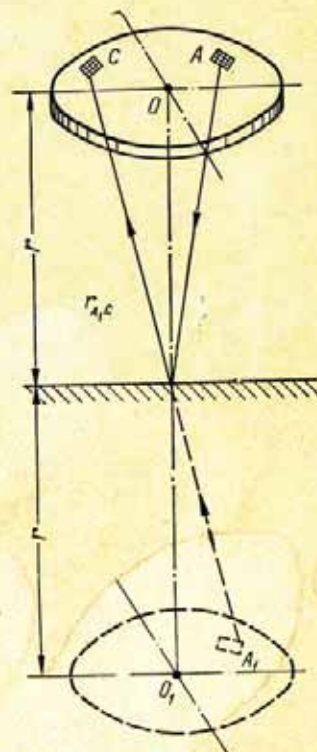


Рис. 86. Схема расчета отражения ультразвука от плоскости.

Отражение, подобное отражению от плоскости, возникает при наличии дефекта типа расслоения. Однако амплитуда сигнала в этом случае зависит от акустического сопротивления вещества, заполняющего расслоение, и от его раскрытия. Если расслоение заполнено воздухом, то отражается практически вся падающая на дефект энергия. Только при ширине раскрытия меньше 10^{-4} — 10^{-6} мм наблюдается уменьшение сигнала от дефекта.

Если расслоение заполнено окислом или другим веществом, то отражение тем слабее, чем меньше разность акустических сопротивлений вещества и материала изделия. Увеличение ширины раскрытия вызывает немонотонное изменение амплитуды отраженного сигнала (см. гл. I). Подобные явления происходят также при отражении от других дефектов (типа диска и полосы).

Сигнал, отраженный от плоскости, перпендикулярной к оси искателя, убывает очень быстро с увеличением угла наклона. Закон убывания при расположении плоскости в дальней зоне описывается приближенной формулой.

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_0}{2\lambda r_1} \Phi^2(\theta),$$

где $\Phi(\theta)$ — диаграмма направленности искателя; r_1 — кратчайшее расстояние от центра искателя до отражающей плоскости; θ — угол падения на плоскость.

Отражение от сферы или отверстия со сферическим дном. Форму, близкую к сферической, имеют дефекты типа раковин, пор и шлаковых включений. Зависимость от расстояния амплитуды эхо-сигнала от небольшого сферического отражателя показана на рис. 77, а. Если диаметр сферы значительно меньше длины волны ультразвука, то

$$A = A_c = 34 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3. \quad (73)$$

Если $b \gg \lambda$, но меньше ширины максимумов интенсивности звукового поля, то

$$A = A_c = \frac{b}{2\lambda}. \quad (74)$$

В табл. 5 приведены приближенные формулы для отражения от сферы в области $\lambda \ll b \ll \rho_m$.

Энергия, отраженная от сферы, распространяется во все стороны более равномерно, чем от диска. В результате амплитуда эхо-сигнала от такого дефекта намного меньше, чем от плоского отражателя равного диаметра (при условии нормального падения), что видно из формул (72) и (74).

Отражение от цилиндра. Форму, близкую к цилиндрической, имеют дефекты в виде цепочки шлаковых включений и вытянутых пор. Если цилиндрический дефект распо-

ложен перпендикулярно оси искателя и имеет небольшую протяженность $2l$ и диаметр $2b$, так что $\lambda < (2l, 2b) < \rho_m$, то зависимость амплитуды сигнала от расстояния до цилиндра выражается той же кривой, приведенной на рис. 77, а, что для других непротяженных дефектов. Параметр

$$A = A_c = l \sqrt{\frac{2b}{\lambda^3}}. \quad (75)$$

Если цилиндрический отражатель имеет бесконечную протяженность ($2l \gg \rho_m$, рис. 82, з), то зависимость амплитуды сигнала от расстояния определяется кривой на рис. 76, б. В дальней зоне искателя уменьшение амплитуды сигнала происходит по закону $\frac{1}{\sqrt{r^3}}$, т. е. быстрее, чем при

отражении от плоскости, но медленнее, чем при отражении от непротяженного дефекта.

Амплитуда эхо-сигнала от бесконечного цилиндрического отражателя рассчитывается по формуле

$$\frac{P'}{P_0} = I_1 A_{ц} \frac{\lambda}{a}, \quad (76)$$

где I_1 определяется из рис. 77, б, а $A_{ц}$ — из рис. 87.

Сплошная кривая из рис. 87 предназначена для расчета отражения от цилиндра диаметром как больше, так и меньше длины волны. Когда диаметр цилиндра больше длины волны, рассчитать $A_{ц}$ можно с помощью приближенной энергетической теории, из которой следует, что

$$A_{ц} = \sqrt{\frac{b}{2\lambda}}. \quad (77)$$

Кривые, приведенные на рис. 77, не учитывают уменьшения амплитуды сигнала, связанного с затуханием ультразвука в материале изделия. Для учета затухания

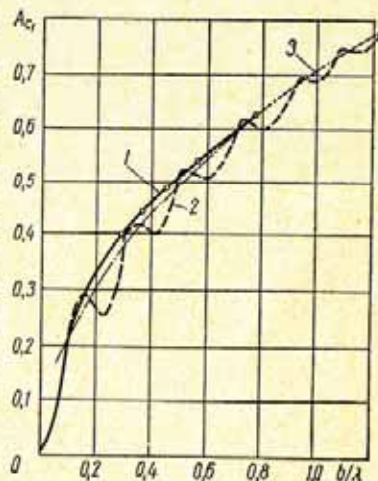


Рис. 87. Отражение продольных волн от цилиндра в зависимости от его диаметра:

1 — экспериментальные точки — отражение от полого цилиндра в твердом теле [49]; 2 — отражение от твердого цилиндра в жидкости [19]; 3 — упрощенная теория.

следует амплитуду сигнала умножить на величину $e^{-2\delta r}$, где δ — коэффициент затухания.

В качестве примера рассчитаем с помощью графиков, показанных на рис. 77, б и 87, амплитуду отраженного сигнала от бесконечного цилиндрического дефекта диаметром $2b = 3$ мм, расположенного на расстоянии $r = 40$ мм от искателя. Искатель имеет диаметр $2a = 18$ мм и работает на частоте 1,8 Мгц. Затухание ультразвука в материале (стали) $\delta = 0,001 \frac{\text{непер}}{\text{мм}}$. Длина волны $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5,9}{1,8} = 3,28$ мм. Длина ближней зоны $r_0 = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{9^2}{3,28} = 24,7$ мм. Приведенное расстояние до дефекта $\frac{r}{r_0} = \frac{40}{24,7} \approx 1,6$. Отношение радиуса дефекта к длине волны $\frac{b}{\lambda} \approx 0,46$. По графику (см. рис. 77, б) находим на оси абсцисс значение 1,6 и соответствующее ей среднее значение сигнала $I_1 = 0,80$. Затем по графику, приведенному на рис. 87, находим на оси абсцисс значение 0,46 и соответствующее сплошной кривой значение $A_{ц1} = 0,49$. Общее ослабление сигнала рассчитываем по формуле (76)

$$\frac{P'}{P_0} = I_1 A_{ц1} \frac{\lambda}{a} e^{-2\delta r} = 0,80 \cdot 0,49 \cdot \frac{3,28}{9} e^{-2 \cdot 0,001 \cdot 40} = 0,132 = 17,5 \text{ отн. дБ.}$$

Отражение от полосы или паза с плоским дном. Непровары сварных соединений имеют форму, подобную полосе. Если дефект расположен перпендикулярно оси искателя и протяженность его невелика, т. е. $\lambda \ll (2b, 2l) \ll \rho_m$, то амплитуда сигнала от него определяется теми же соотношениями, что для дискообразного дефекта. Так, параметр

$$A = A_L = \frac{2b2l}{\lambda^2} = \frac{S_b}{\lambda^2}. \quad (78)$$

Для бесконечно протяженной полосы (рис. 82, д), при $2l \gg \rho_m$, зависимость амплитуды сигнала от расстояния выражается той же кривой, приведенной на рис. 77, б, что и для бесконечного цилиндра. В этом случае параметр

$$A = A_L = \frac{2b}{\lambda}.$$

4. ОТРАЖЕНИЕ ОТ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ НАКЛОННЫМ ИСКАТЕЛЕМ

Особенности отражения от дефектов при контроле наклонным искателем связаны с искажением звукового поля, возникающим в результате преломления ультразвука на границе изделия, излучением поперечных волн вместо продольных и сильным влиянием на отраженный сигнал поверхности изделия, близко расположенной к

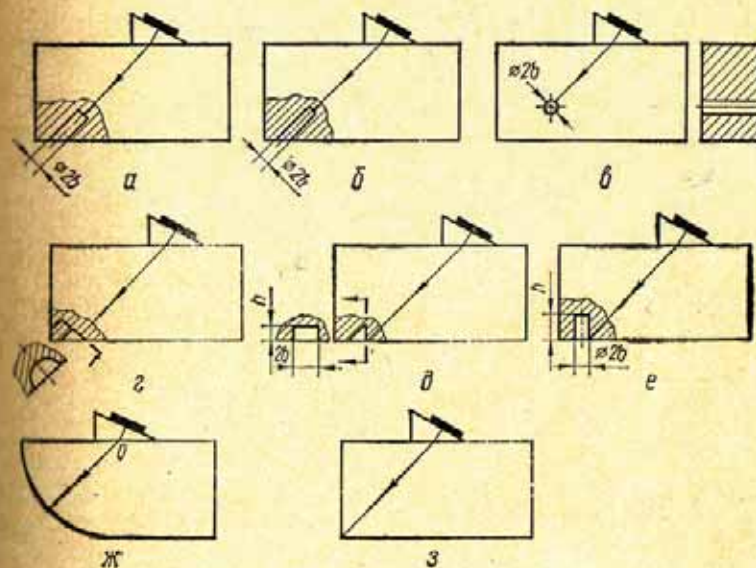


Рис. 88. Искусственные отражатели, применяемые при контроле наклонным искателем:

а — плоскодонное отверстие; б — отверстие со сферическим дном; в — боковое цилиндрическое отверстие; г — сегмент; д — угловой плоский отражатель (заубка); е — угловой цилиндрический отражатель (угловое отверстие); ж — вогнутая цилиндрическая поверхность; з — двугранный угол.

дефекту. На рис. 88 показаны основные типы моделей дефектов, применяемых при контроле наклонными искателями. Отражатели типа плоскодонного отверстия, отверстия со сферическим дном и цилиндрического отверстия (рис. 88, а, б и в) соответствуют таким же отражателям для нормального искателя, однако оси плоскодонного и сферического отверстий располагаются наклонно так, чтобы они совпадали с акустической осью преломленного ультразвукового поля. Отражатель типа сегмента

(рис. 88, г) является видоизмененной формой плоскодонного отверстия. Специфическими типами моделей дефектов являются угловой плоский отражатель или зарубка (рис. 88, д) и угловой цилиндрический отражатель (рис. 88, е). Эхо-сигналы от этих дефектов образуются благодаря двукратному отражению ультразвука от поверхности дефекта и изделия. Образцы, показанные на рис. 88, ж и з, применяются для настройки дефектоскопа по донному сигналу.

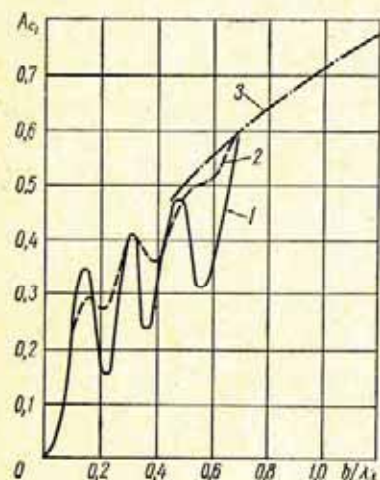


Рис. 89. Отражение поперечных волн от цилиндра в зависимости от его диаметра:

1 — плоскость поляризации перпендикулярна оси цилиндра; 2 — плоскость поляризации параллельна оси цилиндра; 3 — упрощенная (энергетическая) теория.

закону $A = \frac{\pi b^2}{\lambda^2}$ в тех же пределах, что и для продольных волн.

Изменения акустического поля искателя, связанные с прохождением ультразвука в призме и преломлением на границе призмы с изделием, вызывают некоторые изменения формул акустического тракта. Путь ультразвука удлиняется на величину r_2 , определяемую формулой (60). Амплитуда эхо-сигнала уменьшается благодаря затуханию ультразвука в призме, что учитывается множителем $e^{-2\delta_1 r_1}$, где δ_1 — коэффициент затухания, а r_1 — средний путь ультразвука в призме. Кроме того, амплитуда уменьшает-

Отражение поперечных волн от дефектов типа диска, сферы и цилиндра, размеры которых значительно превосходят длину волны ультразвука, происходит аналогично отражению продольных волн. Когда размеры дефекта приближаются к длине волны, характер отражения меняется. Это прежде всего относится к цилиндрическому и сферическому дефектам, амплитуда эхо-сигнала от которых резко уменьшается при определенных соотношениях диаметра дефекта и длины волны (рис. 89). Зависимость амплитуды эхо-сигнала от частоты сглаживается при отражении коротких импульсов.

Отражение от плоскодонного отверстия подчиняется

ся пропорционально коэффициенту прохождения ультразвука по энергии D_{12} . В процессе преломления происходит увеличение расхождения ультразвуковых лучей в плоскости падения, приближенно учитываемое уменьшением размера искателя в этой плоскости в $\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$ раз. В результате почти во все формулы для амплитуды отражения от дефектов, расположенных в дальней зоне наклонного искателя (см. табл. 5), входит множитель $D_{12} e^{-2\delta_1 r_1} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$. При регулировке чувствительности аппаратуры этот множитель или множитель $D_{12} e^{-2\delta_1 r_1}$ может быть исключен. Например, определим, во сколько раз отражение от цилиндрического дефекта диаметром 3 мм, расположенного на глубине 100 мм, меньше донного сигнала при контроле искателем с углом призмы $\beta = 50^\circ$ на частоту $f = 2,5$ МГц (см. табл. 5).

Приведенный путь ультразвука в призме

$$r_2 = r_1 \frac{C_1 \cos \alpha}{C_2 \cos \beta} = 12 \frac{2,67 \cos 65^\circ}{3,26 \cos 50^\circ} \approx 6,6 \text{ мм.}$$

Расстояние до дефекта в стали

$$r = \frac{H}{\cos 65^\circ} = \frac{100}{\cos 65^\circ} = 236,2 \text{ мм.}$$

Общий путь от мнимого искателя до дефекта

$$r_2 + r = 6,6 + 236,2 \approx 243 \text{ мм.}$$

Длина волны ультразвука

$$\lambda_1 = \frac{C_1}{f} = \frac{3,26}{2,5} = 1,3 \text{ мм.}$$

Отношение радиуса дефекта к длине волны

$$\frac{b}{\lambda_1} = \frac{1,5}{1,3} = 1,15;$$

при этом, как видно из рис. 89, можно пользоваться энергетической теорией, т. е. формулами табл. 5. По этим формулам определяем отношение сигналов от бесконечного цилиндра и плоскости, расположенных на одинаковой глубине в дальней зоне искателя:

$$\frac{P'_{\text{цил}}}{P'_{\text{плоск}}} = \sqrt{\frac{b}{r + r_2}} = \sqrt{\frac{1,5}{243}} = 0,0785.$$

Используя понятие мнимого искателя (рис. 79), при расчете отражения от диска можно применять АРД-диаграммы (рис. 84). При этом расстояние по оси абсцисс определяется из формулы $(r + r_2) \pi \lambda \cos \beta / S_a \cos \alpha$, а безразмерный параметр — по формуле $b \sqrt{\cos \beta} / a \sqrt{\cos \alpha}$. Это приближение дает удовлетворительные результаты в дальней и переходной зонах АРД-диаграммы (при $\frac{r}{r_1} \gg 1$)

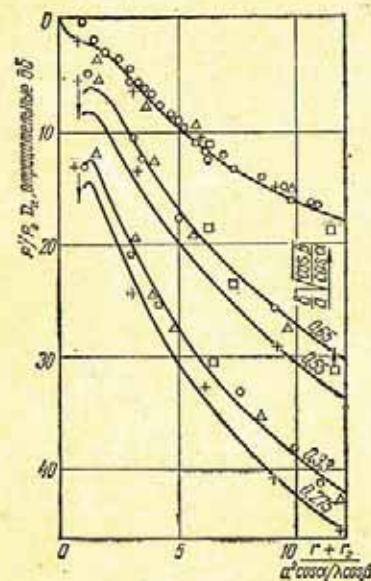


Рис. 90. Пример построения АРД-диаграммы для наклонного искателя.

только для искателя с углами наклона акустической оси 45—60°. Для получения более высокой точности АРД-диаграммы для наклонных искателей рекомендуется строить экспериментально.

На рис. 90 показан пример построения нескольких кривых АРД-диаграммы для дефектов диаметром 3 и 6 мм, а также донного сигнала при контроле плексигласовым и иммерсионными искателями с углами преломления $\alpha = 50^\circ$. Путь в плексигласовой призме равнялся 9,5 мм, а в воде — 20; 54 и 140 мм. Соответствующие эксперимен-

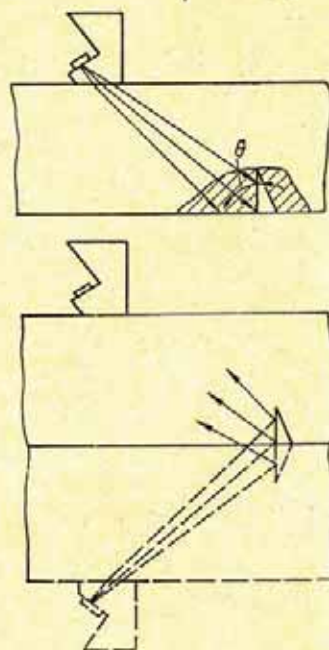


Рис. 91. Схема расчета отражения от углового отражателя (за-рубки).

тальные точки отмечены крестиками (плексиглас), кружками, квадратами и треугольниками (вода).

Рассчитаем с помощью общей АРД-диаграммы (см. рис. 84) отражение от дефекта диаметром $2b = 3$ мм, расположенного на глубине $H = 131$ мм при контроле искателем с параметрами $\beta = 40^\circ$, $f = 2,5$ МГц (см. табл. 4).

Размер мнимого источника в плоскости падения

$$2a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = 12 \frac{\cos 50^\circ}{\cos 40^\circ} = 9,7 \text{ мм.}$$

Приведенный размер дефекта

$$\frac{2b}{2a} \sqrt{\frac{\cos \beta}{\cos \alpha}} = \frac{3}{12} \sqrt{\frac{\cos 40^\circ}{\cos 50^\circ}} = 0,275.$$

В соответствии с этим будем пользоваться интерполированными значениями между кривыми 0,25 и 0,3 АРД-диаграммы (рис. 84).

Расстояние до дефекта в стали

$$r = \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{131}{\cos 50^\circ} = 205 \text{ мм.}$$

Путь ультразвука в призме искателя

$$r_1 = 9,5 \text{ мм.}$$

Приведенный путь в призме

$$r_2 = r_1 \frac{C_1 \cos \alpha}{C_2 \cos \beta} = 9,5 \frac{2,67 \cos 50^\circ}{3,26 \cos 40^\circ} = 6,3 \text{ мм.}$$

Общий путь от мнимого источника до дефекта $r + r_2 = 205 + 6,3 = 211,3$ мм.

Приведенный путь до дефекта

$$\frac{(r + r_2) \lambda \cos \beta}{a^2 \cos \alpha} = \frac{211,3 \cdot 1,3 \cos 40^\circ}{6^2 \cos 50^\circ} = 9.$$

На графике (рис. 84) по оси абсцисс находим значение 9 и соответствующую ему точку посередине между кривыми 0,25 и 0,3. Отсюда определяем $\frac{P'}{P_0 D_{1f}} = 40,5$ дБ (без учета затухания ультразвука). Найденная точка имеется на нижней кривой, приведенной на рис. 90.

Амплитуда эхо-сигнала от сегментного отражателя (рис. 88, з) аналогична амплитуде сигнала от плоскодонного отверстия с такой же отражающей площадью, если диаметр

фрезы $d_{фр}$, которой выполнен сегмент, не превышает величины [156]

$$d_{фр} \leq 0,7 \frac{\lambda H}{2a \cos \alpha}$$

Максимальная амплитуда эхо-сигнала от зарубки (рис. 88, д) и углового отверстия (рис. 88, е) приближенно рассчитывается путем введения мнимого излучателя и мнимого продолжения отражателя (рис. 91). В результате

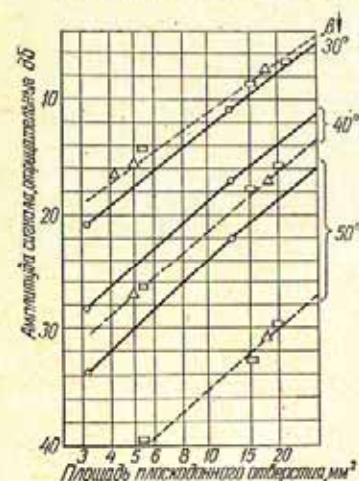


Рис. 92. Зависимость амплитуды эхо-сигнала от площади плоскодонного отверстия и зарубки ($f = 2,5$ МГц; $2a = 12$ мм; толщина образца 60 мм):

○ — плоскодонное отверстие; △ — полукруглая зарубка; □ — прямоугольная зарубка.

некоторое нарушение пропорциональности, и среднее значение коэффициента K сильно отличается от рассчитанного по формуле (79). Это объясняется явлением незеркального отражения, наблюдаемым в данной области [12].

Отражатель типа зарубки удобно использовать вместо плоскодонного отверстия. Площадь зарубки S_1 , дающей сигнал, равный сигналу от заданного плоскодонного отверстия S , определяется по формуле

$$S_1 = \frac{1}{K} S. \quad (80)$$

При этом отношение глубины зарубки h к ее ширине b должно составлять 0,5—4, а размеры h и b должны быть больше длины волны ультразвука. Значения коэффициента K для стали и наиболее часто употребляемых искателей, а также их разброс, наблюдавшийся при экспериментах, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Отношение площадей плоскодонного отверстия и зарубки, дающих равную амплитуду эхо-сигнала

Угол падения в плексигласе β°	Угол преломления α°	Отношение площадей $\frac{S_1}{S}$		Средне-квadraticный разброс экспериментальных данных
		теоретическое	экспериментальное	
10	23	0,2	0,2	—
30	39	—	2,5	0,6
40	50	1,5	1,5	0,3
50	65	0,45	0,5	0,2

Покажем на примере, как осуществляется переход от одного типа дефекта к другому. Предположим, что по техническим условиям необходимо проводить контроль сварного шва при чувствительности, обеспечивающей выявление дефектов с эквивалентным размером $2b = 3$ мм. Определим, какого размера зарубку нужно изготовить, чтобы обеспечить требуемую чувствительность при контроле искателем с $\beta = 40^\circ$. Площадь плоскодонного отверстия, которое нужно выявить,

$$S = \pi b^2 = 7,07 \text{ мм}^2.$$

Площадь зарубки, дающей такой же сигнал,

$$S_1 = \frac{1}{K} S = \frac{7,07}{1,5} = 4,7 \text{ мм}^2.$$

Следует изготовить зарубку глубиной $h = 1,5$ мм и шириной $b = 3,13$ мм. При этом отношение $\frac{h}{b} \approx 0,5$, а произведение $hb = 4,7 \text{ мм}^2$. Если длина волны ультразвука больше 1,5 мм, то следует увеличить значение h . Например, если $\lambda_y = 1,8$ мм, то следует выбрать $h = 2$ мм, а $b = 2,35$ мм.

Чтобы получить донный сигнал при контроле наклонными искателями, нужно изготовить образец с наклонной поверхностью, перпендикулярной направлению ультразвуковых лучей. Однако более удобно пользоваться образцом, в котором отражающая поверхность имеет вогнутую цилиндрическую форму (см. рис. 88, ж). Искатель помещается на образец так, чтобы точка ввода лучей совпадала с осью цилиндрической поверхности. Когда расстояние до поверхности r меньше или равно зоне $\frac{a^2}{\lambda_t}$, амплитуда эхо-сигнала близка к максимальному значению, если не учитывать затухание ультразвука. Когда же расстояние $r \gg \frac{a^2}{\lambda_t}$, амплитуда сигнала уменьшается пропорционально $\frac{1}{\sqrt{2r}}$, так как в плоскости падения ультразвуковые лучи фокусируются и возвращаются назад к искателю, а в перпендикулярной плоскости расходятся до и после зеркального отражения. Для искателей с углами призмы 30 и 40° сигнал, аналогичный донному, с погрешностью не более 1,5 дБ можно получить, определив максимальное отражение от прямого двугранного угла (см. рис. 88, з), который обычно имеется на краю изделия. Для этих искателей угол падения на горизонтальную и вертикальную грани угла (Θ и $90^\circ - \Theta$) больше третьего критического, поэтому трансформации поперечных волн в продольные не происходит. Для искателя с углом призмы 50° происходит трансформация волн при отражении от вертикальной грани двугранного угла, в результате амплитуда эхо-сигнала, как и сигнала от зарубки, резко понижается, и поэтому не удастся четко определить положение искателя на поверхности изделия, соответствующее максимальному значению эхо-сигнала от двугранного угла.

5. ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ НОРМАЛЬНОГО ИСКАТЕЛЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Изменение амплитуды от сферического или дискообразного дефекта небольшого размера при перемещении нормального искателя определяется диаграммой направленности искателя. Действительно, диаграмма направленности отраженного сигнала в этом случае гораздо

шире, чем диаграмма направленности поля излучения-приема искателя. Если путь искателя по поверхности изделия L значительно меньше расстояния до дефекта r , то увеличением расстояния при смещении искателя можно пренебречь и считать $\sin \varphi = \frac{L}{r}$. Тогда в соответствии с формулой (55) изменение амплитуды сигнала записывается в виде

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{AS_a}{r^2} \Phi^2 \left(ak \frac{L}{r} \right), \quad (81)$$

т. е. $\frac{P'}{P_0}$ изменяется пропорционально квадрату функции направленности Φ^2

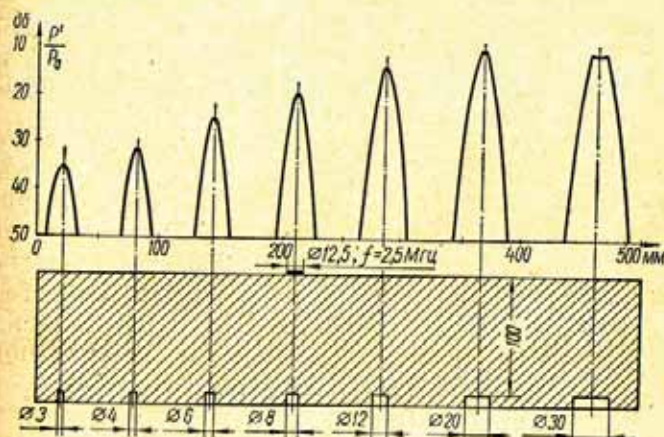


Рис. 93. Изменение амплитуды эхо-сигнала при перемещении искателя над дискообразными дефектами.

Для отражения от дискообразного дефекта при контроле круглым искателем получим выражение

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2} \left[\frac{2J_1 \left(ak \frac{L}{r} \right)}{ak \frac{L}{r}} \right]^2.$$

С увеличением размера дискообразного дефекта при условии, что он остается гораздо меньше диаметра искателя, амплитуда сигнала возрастает пропорционально площади дефекта, но закономерность изменения ампли-

туды сигнала сохраняется. Это видно из рис. 93, где показаны огибающие амплитуды эхо-сигнала при перемещении искателя над дискообразными дефектами различного размера.

Когда диаметр дискообразного дефекта приближается к диаметру искателя, форма огибающей изменяется: она суживается в своей верхней части. Это объясняется действием направленности отражения от дефекта. Для дефектов не плоской, а сферической или цилиндрической формы такого сужения диаграммы направленности не наблюдается.

При дальнейшем увеличении диаметра дискообразного дефекта на огибающей появляется плато. Это происходит, когда размер дефекта превосходит диаметр основного лепестка диаграммы направленности искателя. На краях огибающей имеются максимумы, возникновение которых связано с интерференционными явлениями. Заметим, что огибающие последовательности эхо-сигналов от отражателей правильной формы симметричны.

Изменение амплитуды эхо-сигналов при перемещении наклонного искателя зависит не только от направленных свойств поля излучения-приема искателя, но и от существенного изменения расстояния от точки ввода луча до дефекта. В связи с этим огибающие последовательности эхо-сигналов даже от сферического и цилиндрического отражателей имеют несимметричный вид. Изменение амплитуд эхо-сигналов при сканировании наклонным искателем более подробно рассмотрено в гл. VII.

6. СТРУКТУРНЫЕ ПОМЕХИ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Помехи, связанные с рассеянием ультразвука на структурных неоднородностях, а также зернах материала, являются постоянно действующим фактором, ограничивающим чувствительность ультразвукового контроля. Сигналы, образовавшиеся в результате рассеяния ультразвука на различных неоднородностях, которые приходят к приемнику в один и тот же момент времени, интерферируют (складываются). Отдельные сигналы в зависимости от фаз могут взаимно усилить или ослабить друг друга. На некотором участке развертки помехи, складываясь, дают сигнал, значительно превосходящий средний уровень,

а на другом, наоборот, имеют малую величину. Таким образом, вследствие случайного соотношения фаз колебаний, структурные помехи имеют вид отдельных довольно четких импульсов, на фоне которых выявление дефектов может оказаться невозможным.

Начальные фазы сигналов, создающих структурные помехи, распределяются случайным образом, поэтому амплитуда структурных помех на искателе в некоторый определенный момент времени равновероятно имеет положительное или отрицательное значение, а среднее значение амплитуды равно нулю. Дефектоскоп регистрирует не знак, а абсолютную величину амплитуд приходящих сигналов, поэтому средний уровень амплитуды помех P_n определяется среднеквадратичным значением амплитуды, квадрат которого пропорционален среднему уровню интенсивности сигнала помех $\bar{I}_n$. Таким образом, $P_n \sim \sqrt{\bar{I}_n}$.

Нетрудно показать [67], что, если длина ультразвуковой волны больше среднего размера зерен металла (это условие обычно выполняется), то среднеквадратичное отклонение от среднего уровня помех $\sqrt{\Delta I_n^2}$ равно высоте этого среднего уровня $\bar{I}_n$. Таким образом, $\Delta I_n^2 = \bar{I}_n^2$.

Для того, чтобы дефект надежно регистрировался, необходимо, чтобы интенсивность сигнала от него I' в два-три раза превосходила суммарное значение $I_n + \sqrt{\Delta I_n^2} = 2\bar{I}_n$, т. е. $I' \geq (2 \div 3) \bar{I}_n$. Введя амплитуды сигналов P , получим

$$P' \geq (2 \div 2,5) P_n, \quad (82)$$

где $P_n \sim \sqrt{\bar{I}_n}$ — средний уровень структурных помех по амплитуде сигнала.

Уровень структурных помех в дальней зоне искателя был рассчитан А. С. Голубевым, Л. Г. Меркуловым и В. А. Щукиным [20], которые основывались на методике определения объемных ревербераций в гидролокации [142]. Позднее [66] аналогичная методика была использована для расчета уровня шумов в непосредственной близости от искателя. При расчете определяли энергию, рассеиваемую элементом пространства, расположенным около некоторой точки B , причем предполагали, что рассеяние происходит равновероятно во все стороны. В результате для средней амплитуды помех получена формула

$$P_n = \frac{P_0 \lambda}{S_a} \sqrt{\frac{\delta_p}{2\pi} \int_r^{r+\Delta r} e^{-\delta_p r} dr \int_S I^2 ds_B},$$

где δ_p — коэффициент рассеивания ультразвука; r — расстояние до точки B ; $\Delta r = \frac{C\tau}{2}$ — толщина слоя, сигналы от которого могут попадать на один и тот же участок линии развертки; S — площадь пространства, захватываемая ультразвуковым пучком на расстоянии r ; I — функция акустического поля (см. рис. 75).

После интегрирования с учетом условия $\Delta r < r$ получим

$$P_n = \frac{P_0 \lambda}{2} I_2 \sqrt{\frac{\delta_p C\tau}{\pi S_a}} e^{-2\delta_p r}, \quad (83)$$

где τ — длительность ультразвукового импульса;

$I_2 = 1$ вблизи искателя и $I_2 = \frac{S_a}{\sqrt{2} \lambda r}$ в дальней зоне искателя.

Таким образом, на большом расстоянии от искателя

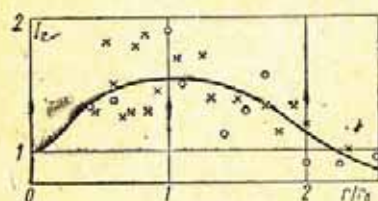


Рис. 94. Уровень структурных помех в зависимости от расстояния до искателя:

× — $2a = 24$ мм; $f = 4$ МГц, перлитная сталь; ○ — $2a = 24$ мм; $f = 2,5$ МГц, аустенитная сталь.

разцах из мелкозернистой перлитной и аустенитной стали 60ХЗГ8Н8. Поскольку доля рассеяния в коэффициенте затухания δ_p не была известна, экспериментальные точки совмещались с теоретической кривой в дальней зоне. При этом оказалось, что для стали 45 $\delta_p \approx \delta$, а для стали 60ХЗГ8Н8В $\delta_p \approx 0,5\delta$. Экспериментальные данные подтверждают теоретическую кривую в пределах ошибки опыта.

При использовании фокусирующего искателя уровень помех в фокальной области вычисляют по формуле (84),

$$P_n = \frac{P}{2r} \sqrt{\frac{\delta_p C\tau S_a}{2\pi}} e^{-2\delta_p r}. \quad (84)$$

На рис. 94 показано изменение функции I_2 при увеличении расстояния от искателя. В пределах ближней зоны I_2 увеличивается от 1 ($r = 0$) до 1,5 ($r = r_0$). Там же приведены экспериментальные точки, полученные при измерении уровня шума различными искателями в об-

где переменное расстояние r заменяется расстоянием до фокальной плоскости искателя R .

Используя формулы для амплитуды сигнала и шумов в ближней, дальней и фокальной зонах, а также выражение (82), можно записать следующие условия выявления дефектов на фоне шумов:

в ближней зоне

$$(1 \div 2) \frac{S_b}{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi}{S_a \delta_p C\tau}} \geq 2,2; \quad (85)$$

в дальней зоне

$$\frac{S_b}{r \lambda^2} \sqrt{\frac{8\pi S_a}{\delta_p C\tau}} \geq 2,2; \quad (86)$$

в фокальной плоскости

$$\frac{S_b}{R \lambda^2} \sqrt{\frac{8\pi S_a}{\delta_p C\tau}} \geq 2,2. \quad (87)$$

Из формулы (86) видно, что если дефект находится в дальней зоне, для повышения отношения сигнал — шум следует увеличить площадь искателя. Физически это объясняется тем, что увеличение площади вызывает улучшение направленности излучения в дальней зоне, а значит увеличивает отношение площади дефекта, пропорциональной амплитуде полезного сигнала, к площади облучаемых ультразвуком зерен металла, ответственных за возникновение шумов.

Однако беспредельное улучшение отношения сигнал — шум за счет увеличения площади искателя невозможно, так как при определенных размерах дефект попадает в ближнюю зону. В этой области увеличение площади искателя ухудшает направленность излучения (см. рис. 75) и, как видно из формулы (85), уменьшает отношение сигнал — шум. Дальнейшее возрастание этого отношения возможно за счет фокусировки ультразвукового луча, что следует из формулы (87). Максимальная величина площади искателя ограничивается трудностью изготовления пьезопластин большого размера и неудобством применения громоздких искателей. Наибольший диаметр искателей, применяемых в ультразвуковой дефектоскопии, достигает 50 мм. Таким образом, для повышения отношения сигнал — шум нужно уменьшить объем пространства, занимаемого ультразвуковым импульсом в месте располо-

жения дефекта. Для этого следует стремиться к улучшению направленности излучения и к уменьшению длительности импульса τ .

Рассмотрим, как влияет на чувствительность частота ультразвука. С одной стороны, увеличение частоты улучшает направленность излучения и дает возможность уменьшить длительность импульса, которая определяется числом периодов колебаний T . Обычно

$$\tau = 5T = 5 \frac{1}{f}. \quad (88)$$

С другой стороны, возрастание частоты вызывает увеличение коэффициента рассеяния δ_r , входящего в формулы (85)–(87). Однако, учитывая выражение (88), а также соотношение $\lambda = \frac{c}{f}$, устанавливаем, что отношение сигнал — шум увеличивается с повышением частоты даже если δ пропорционально f^4 .

Вместе с тем увеличение частоты приводит к быстрому возрастанию затухания ультразвука, а это может вызвать такое уменьшение полезного сигнала, что он не будет вообще зарегистрирован дефектоскопом. Поэтому для выявления дефекта необходимо выполнение двух условий: превышение полезного сигнала от дефекта над уровнем помех и соответствие амплитуды этого сигнала электрической чувствительности дефектоскопа.

Совместно исследовать оба условия выявления дефектов достаточно только для дальней зоны искателя, поскольку в ближней зоне целесообразно применять фокусирующий искатель, формулы для которого аналогичны формулам дальней зоны.

Используя формулу (29) и формулы табл. 5 для отражения от плоского дефекта, получим выражение для амплитуды полезного сигнала при контроле наклонным искателем:

$$U' = U_0 \gamma \gamma' \frac{DS_a S_b \cos \alpha}{\lambda^2 (r + \Delta r_2)^2 \cos \beta} e^{-2(\delta r + \delta_1 r_1)}. \quad (89)$$

Отсюда второе условие выявления дефекта записывается в виде

$$\gamma \gamma' \frac{DS_a S_b \cos \alpha}{\lambda^2 (r + \Delta r_2)^2 \cos \beta} e^{-2(\delta r + \delta_1 r_1)} > \frac{U_{\min}}{U_0}, \quad (90)$$

где $U_{\min}$ — минимальный сигнал, регистрируемый дефектоскопом.

Как следует из формул (89) и (90), увеличение размера искателя ведет к повышению полезного сигнала так же, как и отношения сигнал — шум. Возрастание частоты (уменьшения λ) уменьшает дифракционное ослабление сигнала, но увеличивает затухание ультразвука. Поэтому существует некоторое оптимальное значение частоты, которое соответствует наибольшей амплитуде сигнала [67, 160]. Однако, если учитывать необходимость выполнения одновременно двух условий выявления дефекта, то это значение частоты нельзя признать оптимальным с точки зрения достижения наивысшей общей чувствительности аппаратуры. Вторая оптимальная частота соответствует значению, при котором как условие (86), так и условие (90) выполняются одинаково хорошо, т. е. обеспечивают выявление дефектов одинаково малого размера.

Используя данные по затуханию и рассеянию ультразвука и считая, что для современных дефектоскопов $\frac{U_{\min}}{U_0} \approx 10^{-2}$, можно вычислить оптимальное значение частоты для контроля изделий.

Например, при контроле искателем с $\beta = 40^\circ$ и $2a = 12$ мм изделий из железа Армко толщиной 30 мм со средней величиной зерна $\bar{D} = 0,05$ мм оптимальная частота равна примерно 2 МГц, причем изменение частоты в пределах 1,5–3 МГц слабо влияет на чувствительность. Диаметр наименьших выявляемых дефектов, определяемый обоими условиями, составляет примерно 2 мм.

Особенно существенное влияние оказывает выбор частоты на выявляемость дефектов в крупнозернистых материалах. Например, при контроле нормальным искателем диаметром 12 мм изделия толщиной 100 мм из железа Армко с $\bar{D} = 0,2$ мм получим следующее. На частоте 2,5 МГц площадь наименьшего выявляемого дефекта равна 18 мм², если исходить из условия для отношения сигнал — шум, и 0,0055 мм², если исходить из условия амплитуды сигнала. Таким образом, выявляемость ограничивается первым условием. Увеличивая частоту, мы ухудшаем выполнение второго условия, но улучшаем выполнение первого. При частоте 5,5 МГц получим, что оба условия обеспечивают выявление одинаковых дефектов площадью 2,6 мм². Таким образом, за счет рационального выбора частоты удастся повысить чувствительность примерно в 7 раз.

Выполняя эти расчеты, мы полагали, что амплитуда эхо-сигнала пропорциональна площади дефекта S_b . Следует помнить, что если размер дефекта меньше длины волны ультразвука, то выявляемость его резко ухудшается. Это накладывает дополнительное ограничение на чувствительность ультразвукового метода.

Глава V

АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ ПРИ КОНТРОЛЕ ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

Зеркально-теневой метод широко применяют для выявления расслоений и других внутренних дефектов в основном металле сварных соединений.

1. СПОСОБЫ ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА

Следует различать четыре практически используемых способа зеркально-теневого метода контроля: прямым искателем по первому донному импульсу; прямым искателем по n -му донному импульсу; двумя наклонными искателями по донному импульсу поперечной волны; двумя наклонными искателями по донному импульсу продольной волны.

При любом из четырех способов критерием обнаружения дефекта является уменьшение донного импульса в определенное, наперед заданное, число раз. Чем крупнее дефект, тем существеннее ослабление K_c донного импульса.

Для количественной оценки выявляемости дефектов при зеркально-теновом методе контроля введем коэффициент K_∂ выявляемости дефекта, характеризующий вызываемое дефектом ослабление первого донного импульса:

$$K_\partial = K_c^1 = \frac{U_{\partial 1}}{U_{\partial 0}}, \quad (91)$$

где $U_{\partial 0}$ — амплитуда первых донных импульсов при отсутствии дефекта; $U_{\partial 1}$ — минимальная амплитуда первых

донных импульсов при расположении дефекта в зоне ультразвукового пучка.

Коэффициент K_∂ лежит в пределах от 0 до 1 и тем меньше, чем крупнее дефект. Тогда чувствительность зеркально-теневого метода может быть охарактеризована максимальной величиной коэффициента $K_{\partial m}$ выявляемости дефектов, еще обнаруживаемых при контроле. При этом чувствительность дефектоскопа (условную, см. гл. VI) следует измерять максимальной величиной коэффициента K_y , аналогичного коэффициенту K_∂ и определяющего собой минимальное относительное ослабление донного импульса, регистрируемое индикатором дефектоскопа, т. е.

$$K_y = \frac{U_m}{U_0}, \quad (92)$$

где U_0 — амплитуда донного импульса (первого, второго, ..., n -го); U_m — амплитуда того же донного импульса, но ослабленного до появления сигнала в индикаторе дефектоскопа ($U_m < U_0$).

Очевидно, что чувствительность дефектоскопа тем больше, чем больше величина K_y .

Для сравнения чувствительности различных способов проанализируем акустический тракт зеркально-теневого дефектоскопа.

2. АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Учитывая высокую направленность полей, создаваемых искателями в контролируемых металлах, и в связи

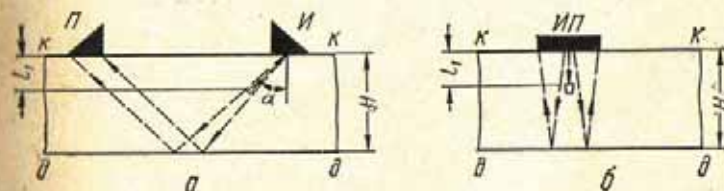


Рис. 95. Способы зеркально-теневого метода контроля при включении искателей по раздельной (а) и совмещенной (б) схемам.

с этим пренебрегая незначительными потерями энергии вследствие трансформации падающей волны при ее отражении от донной поверхности, способы зеркально-теневого метода (рис. 95) можно представить в виде эквивалентных

схем теневого метода в классическом варианте (рис. 96). На эквивалентных схемах 1 — изображение дефекта; 2, 3, и 4 — мнимые отображения дефекта.

Для определения чувствительности, характеризуемой коэффициентом ослабления K_c , воспользуемся методикой, предложенной Л. М. Яблоником [164] для расчета теневого метода.

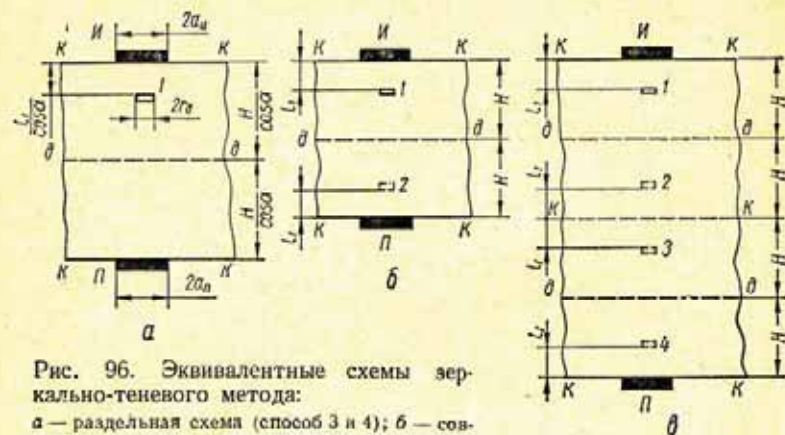


Рис. 96. Эквивалентные схемы зеркально-теневого метода:

а — раздельная схема (способ 3 и 4); б — совмещенная схема при контроле по первому донному отражению (способ 1); δ — то же, по второму донному отражению (способ 2).

Введем следующие обозначения:

- H — толщина изделия;
- $a = a_u = a_n$ — радиус излучателя и приемника;
- r_d — радиус дискового отражателя (дефекта);
- l — расстояние между излучателем и приемником;
- l_1 — глубина расположения отражателя;
- k — волновое число;
- ρC — волновое сопротивление среды;
- $\vartheta_m, \vartheta_{m_1}, \vartheta_{m_2}, \vartheta_{m_3}, \vartheta_{m_4}$ — амплитуда средней колебательной скорости соответственно вблизи излучателя, дефекта 1 и его мнимых отображений 2, 3 и 4;
- $\bar{P}_c, \bar{P}_o$ — среднее давление вблизи приемника при наличии и отсутствии дефекта;

$\bar{P}_{o1}, \bar{P}_{o2}, \bar{P}_{o3}, \bar{P}_{o4}$ — среднее давление вблизи приемника, создаваемое дефектом 1 и его мнимыми отображениями 2, 3 и 4, рассматриваемыми как дополнительные излучатели;

$\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3, \bar{P}_4$ — среднее давление у дефекта 1 или его мнимых отображений, создаваемое излучателем или дефектом 1 и его мнимыми отображениями 2 и 3.

При этом коэффициент ослабления донного импульса, определяющий чувствительность способа,

$$K_c = \frac{\bar{P}_\delta}{\bar{P}_o}. \quad (93)$$

Среднее давление в случае отсутствия дефекта при $l \gg a$ равно [164]

$$\bar{P}_o \approx \frac{2\rho Cl_0^2 m}{ka^2} \left[1 - J_0\left(\frac{ka^2}{l}\right) \right], \quad (94)$$

где J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Среднее давление $\bar{P}_\delta$ при наличии дефекта может быть найдено на основе принципа Бабинне. В соответствии с этим принципом дифракционное поле $\bar{P}_\delta$ на акустически мягком диске, моделирующем собой реальный дефект, может быть получено как разность падающего поля $\bar{P}_n$ и дифракционного поля $\bar{P}_k$ дополнительного к диску жесткого экрана [127], т. е. $\bar{P}_\delta = \bar{P}_n - \bar{P}_k^*$. По аналогии с выражением (94)

$$\bar{P}_k = \frac{2\rho Cl_k \vartheta_{mk}}{ka^2} \left[1 - J_0\left(\frac{ka^2}{l_k}\right) \right], \quad (95)$$

* Приводимые здесь формулы соответствуют лишь амплитудным значениям акустических полей P_o, P_n, P_k и др. При вычислении суммарного поля необходимо учитывать не только амплитуды, но и фазы интерферирующих полей, т. е. складывать их как комплексные величины. Однако, как показано И. Н. Ермоловым, для теневого метода дефектоскопии, при достаточно большом расстоянии между излучателем и дефектом можно пренебречь фазовыми поправками и складывать амплитуды интерферирующих волн как действительные величины. Это приближение используется в данной работе.

где ϑ_{mk} — амплитуда средней колебательной скорости на диске, рассматриваемом как дополнительный источник; l_k — расстояние от дополнительного излучателя до приемника.

Амплитуду ϑ_{mk} определяем по среднему давлению $\bar{P}_{k2}$ у k -го дополнительного излучателя, полагая $\bar{P}_{k2} \approx \rho C \vartheta_{mk}$. Среднее давление $\bar{P}_{k2}$ у k -го дополнительного излучателя рассчитывается также на основе принципа Бабине как разность давления истинного излучателя и среднего давления дополнительных излучателей, предшествующих рассматриваемому.

Тогда, согласно изложенному принципу и принятым обозначениям, получим выражения для коэффициентов K_c при различных способах зеркально-теневого метода контроля:

при раздельном способе

$$K_{c. \text{н}} = \frac{\bar{P}_\partial}{\bar{P}_0} \approx 1 - \frac{\bar{P}_{01}}{\bar{P}_0}; \quad (96)$$

при совмещенном способе по первому донному сигналу

$$K_{c. \text{н}} = K_\partial = \frac{\bar{P}_\partial^1}{\bar{P}_0^1} \approx 1 - \frac{\bar{P}_{01}^1}{\bar{P}_0^1} - \frac{\bar{P}_{02}^1}{\bar{P}_0^1}; \quad (97)$$

при совмещенном способе по второму донному импульсу

$$K_{c. \text{н}} = \frac{\bar{P}_\partial^{11}}{\bar{P}_0^{11}} \approx 1 - \frac{\bar{P}_{01}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} - \frac{\bar{P}_{02}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} - \frac{\bar{P}_{03}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} - \frac{\bar{P}_{04}^{11}}{\bar{P}_0^{11}}. \quad (98)$$

Опуская вследствие громоздкости выводы, приводим окончательные выражения для членов, входящих в формулы (96), (97) и (98):

$$\frac{\bar{P}_{01}}{\bar{P}_0} \approx \frac{kHr_\partial^2}{l_1} \cdot \frac{1}{2H-l_1} \cos \alpha = \frac{\bar{P}_{01}^1}{\bar{P}_0^1} \cos \alpha; \quad (99)$$

$$\frac{\bar{P}_{01}^1}{\bar{P}_0^1} \approx \frac{kHr_\partial^2}{l_1} \cdot \frac{1}{2H-l_1}; \quad (100)$$

$$\frac{\bar{P}_{02}^1}{\bar{P}_0^1} \approx \frac{kHr_\partial^2}{l_1} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{2}{2H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{l_1(2H-2l_1)} \right]; \quad (101)$$

$$\frac{\bar{P}_{01}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} \approx \frac{kHr_\partial^2}{l_1} \cdot \frac{2}{4H-l_1}; \quad (102)$$

$$\frac{\bar{P}_{03}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} \approx \frac{kHr_\partial^2}{2H+l_1} \left[\frac{2}{2H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{l_1(2H-2l_1)} \right]; \quad (103)$$

$$\frac{\bar{P}_{03}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} \approx \frac{kHr_\partial^2}{2H-l_1} \left\{ \frac{2}{2H+l_1} - \frac{kr_\partial^2}{2Hl_1} - \frac{kr_\partial^2}{4l_1} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{2}{4H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{l_1(2H-2l_1)} \right] \right\}; \quad (104)$$

$$\frac{\bar{P}_{04}^{11}}{\bar{P}_0^{11}} \approx \frac{kHr_\partial^2}{l_1} 2 \left\{ \frac{1}{4H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{2l_1(4H-2l_1)} - \frac{kr_\partial^2}{8H} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{2}{2H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{l_1(2H-2l_1)} \right] - \frac{kr_\partial^2}{4(2H-2l_1)} \left[\frac{2}{2H+l_1} - \frac{kr_\partial^2}{2Hl_1} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{kr_\partial^2}{4l_1} \left(\frac{2}{2H-l_1} - \frac{kr_\partial^2}{l_1(2H-2l_1)} \right) \right] \right\}. \quad (105)$$

Выражения (96) — (105) тем точнее, чем больше H , l_1 , $(H-l_1)$ и чем меньше r_∂ . Они дают возможность сравнить чувствительность способов зеркально-теневого метода и оценить зависимость ее от параметров акустического тракта.

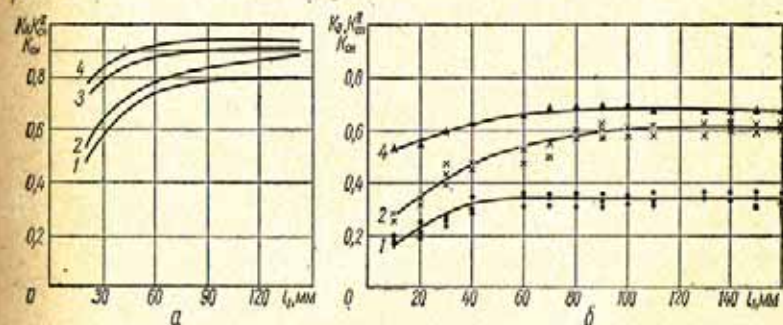


Рис. 97. Зависимости относительного ослабления амплитуды донного сигнала при зеркально-теновом методе контроля:

а — расчетные; б — экспериментальные;
1, 2 — совмещенный способ соответственно по второму и первому донному сигналу; 3, 4 — раздельный способ соответственно $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 40^\circ$.

Для сравнения чувствительности способов на рис. 97, а приведены в виде графиков данные расчета коэффициентов $K_{c. \text{н}}$, K_∂ и $K_{c. \text{н}}^{11}$ для дефектов в виде диска радиусом $r_\partial = 2$ мм, расположенных на различной глубине в стальных изделиях толщиной $H = 150$ мм.

При расчете приняты типовые для дефектоскопов параметры: $f = 2,5 \text{ МГц}$ и $a = 6 \text{ мм}$. Как видно из рис. 97, а, кривые выявляемости дефектов при зеркально-теневом методе являются левой половиной аналогичных кривых теневого метода [164].

На рис. 97, б показаны экспериментальные зависимости коэффициентов $K_{с.н}$, K_d и $K_{с.н}^{II}$ от глубины залегания цилиндрических отражателей диаметром 3 мм ($a = 6 \text{ мм}$, $f = 2,5 \text{ МГц}$), хорошо подтверждающие теоретические предпосылки.

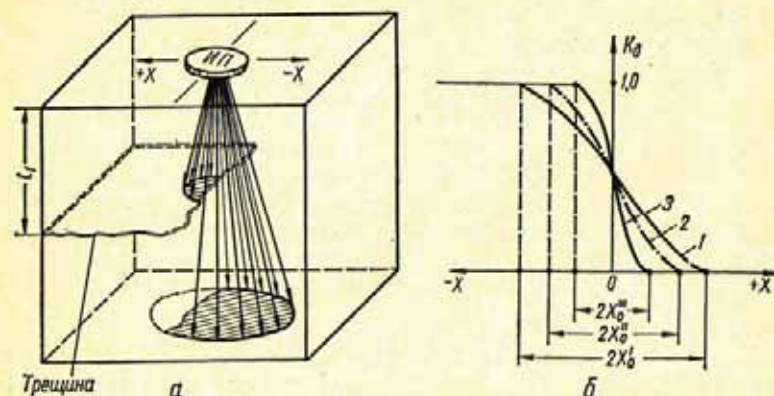


Рис. 98. Выявление дефектов, развивающихся с боковой поверхности изделия:

а — схема озвучивания дефекта; б — зависимость коэффициента выявляемости дефекта K_d от глубины l_1 его расположения и параметра искателя; 1 — $l_1 = L_1$, $af = (af)_1$; 2 — $l_1 = L_1$, $af = (af)_2$; 3 — $l_1 = L_2$, $af = (af)_2$; $L_2 < L_1$; $(af)_2 > (af)_1$.

Анализ приведенных на рис. 97 зависимостей показывает:

1) чувствительность способов зеркально-теневого метода, использующих наклонные искатели при прочих равных условиях, меньше чувствительности способов, использующих прямые искатели;

2) при использовании наклонных искателей чувствительность тем выше, чем меньше угол ввода ультразвукового луча в металл;

3) наименьшей чувствительностью при прочих равных условиях обладает способ, основанный на прозвучивании изделий поперечными волнами с помощью наклонных искателей;

4) наибольшей чувствительностью обладает предложенный автором способ контроля по n -му донному импульсу; чувствительность этого способа к дефектам, расположенным на малой глубине, приближается к чувствительности способа контроля прямым искателем по первому донному импульсу;

5) чувствительность всех четырех способов возрастает с уменьшением глубины расположения дефекта и толщины изделия, а также с увеличением частоты ультразвука и диаметра излучателя, что хорошо согласуется с данными Б. Г. Голодаева [18];

6) при одной и той же условной чувствительности дефектоскопа чувствительность способа контроля по второму донному отражению $K_{с.н}^{II}$ выше чувствительности способа контроля по первому донному отражению, равной $K_{д.м}^I \approx K_y$, и составляет $K_{д.м}^{II} \approx \sqrt{K_y}$.

В практике контроля встречаются случаи, когда выявляемые дефекты в виде трещин и расслоений озвучиваются боковой частью ультразвукового пучка (рис. 98, а). Рассчитать ослабление донного импульса, вызываемое подобными дефектами, с учетом дифракции на крае трещины не удастся. Однако при рассмотрении схемы, приведенной на рис. 98, а, без каких-либо расчетов легко предположить следующее.

В процессе развития дефекта или в процессе приближения искателя к дефекту, когда расстояние X от его края до оси луча станет равным $|X_0| = l_1 \operatorname{tg} \varphi_p$, где φ_p — половина угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности искателя, донный импульс начнет уменьшаться. Если край дефекта достигнет оси диаграммы ($X = 0$), то коэффициент выявляемости этого дефекта составит $K_d \approx 0,5$ и, наконец, когда дефект полностью

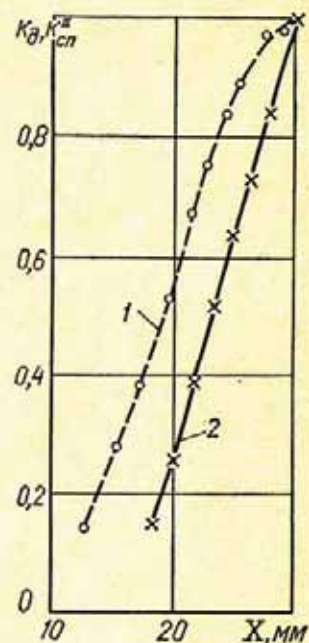


Рис. 99. Экспериментальные зависимости ослабления первого (1) и второго (2) донных сигналов от расстояния X между краем трещины и осью искателя ($af = 15 \text{ мм} \cdot \text{МГц}$; $l = 150 \text{ мм}$; $l_1 = 75 \text{ мм}$).

перекроет луч ($X \geq 2 |X_0|$), то коэффициент выявляемости будет равен нулю ($K_d = 0$).

Так как $\varphi_p < 9^\circ$ и $\operatorname{tg} \varphi_p \approx \sin \varphi_p$, с учетом выражения (9) получаем

$$|X_0| \approx 0,61C \frac{l_1}{af}. \quad (106)$$

Очевидно, что чем больше X_0 , тем меньших размеров будет выявляться трещина, развивающаяся с боковой поверхности изделия. Из выражения (106) следует, что X_0 тем больше, а следовательно, выявляемость рассматриваемых дефектов тем лучше, чем больше глубина их залегания и чем меньше параметр af , т. е. чем хуже направленность поля искателя. На рис. 98, б приведены зависимости $K_d = F(X)$, поясняющие изложенное. Естественно, что чувствительность способа контроля по многократно отраженному донному импульсу к дефектам, выявляемым боковой частью ультразвукового пучка, так же, как и к дефектам, расположенным по оси пучка, будет больше чувствительности способа контроля по первому донному импульсу. Экспериментальные исследования подтверждают это положение (рис. 99).

Следует отметить, что выявляемость реальных дефектов в различных изделиях может быть оценена только экспериментально. Выявляемость дефектов и максимальная условная чувствительность, которая может быть применена при контроле изделий, определяются уровнем помех.

3. ВИДЫ ПОМЕХ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Помехой обычно называют сторонние возмущения, препятствующие правильному приему полезных сигналов [149]. При зеркально-теновом методе, где полезным сигналом является уменьшение амплитуды донного импульса вследствие обнаружения дефекта, помехой следует считать всякое возмущение, приводящее к ослаблению амплитуды донного импульса.

Под помехоустойчивостью при зеркально-теновом методе контроля будем понимать способность дефектоскопической системы противостоять вредному влиянию помех. Все помехи при зеркально-теновом методе контроля с применением пьезоэлектрических преобразователей можно клас-

сифицировать на пять основных видов (рис. 100): 1) вызванные нарушением акустического контакта из-за механических повреждений или загрязнений контактной поверхности (рис. 100, а); 2) возникающие вследствие изменения отражающих свойств донной поверхности (рис. 100, б); 3) связанные с изменением затухания ультразвука из-за структурных неоднородностей контролируемого металла (рис. 100, в); 4) обусловленные локальными непараллельностями контактной и донной поверхностей (рис. 100, г); 5) появляющиеся при поперечных смещениях искателя при контроле изделий, ширина которых соизмерима с диаметром ультразвукового пучка (рис. 100, д).

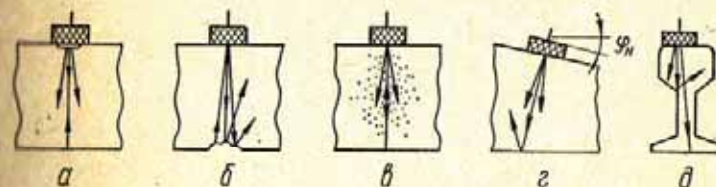


Рис. 100. Помехи при зеркально-теновом методе контроля.

При использовании электромагнитоакустических преобразователей вместо помех первого вида будут возникать помехи из-за изменения коэффициента электромагнитоакустического преобразования.

Уровень помех в данной точке контролируемого изделия может быть оценен коэффициентом помехи

$$K_n = \frac{U_n}{U_0}, \quad (107)$$

где U_0 — амплитуда донного импульса (первого, второго, ..., n -го) при отсутствии помехи; U_n — минимальная амплитуда того же донного импульса при наличии помехи.

Большей помехе соответствует меньшая величина коэффициента помех. Для каждого из перечисленных видов помех эти коэффициенты соответственно равны:

$$K_{n.a} = \frac{U_{n.a}}{U_0} = \frac{U_0 - \Delta U_a}{U_0}; \quad (108)$$

$$K_{n.c} = \frac{U_{n.c}}{U_0} = \frac{U_0 - \Delta U_c}{U_0}; \quad (109)$$

$$K_{п.д} = \frac{U_{п.д}}{U_0} = \frac{U_0 - \Delta U_d}{U_0}; \quad (110)$$

$$K_{п.н} = \frac{U_{п.н}}{U_0} = \frac{U_0 - \Delta U_n}{U_0}; \quad (111)$$

$$K_{п.п} = \frac{U_{п.п}}{U_0} = \frac{U_0 - \Delta U_p}{U_0}; \quad (112)$$

где $U_{п.в}$, $U_{п.с}$, $U_{п.д}$, $U_{п.н}$, $U_{п.п}$ — амплитуды донных импульсов соответственно при нарушении акустического контакта, ухудшении структуры, изменении состояния донной поверхности, непараллельности поверхностей или смещении искателя.

В общем виде при воздействии m видов помех выражение для суммарного коэффициента помех можно записать так:

$$K_{п.з} = \prod_{i=1}^m K_{п.i}. \quad (113)$$

Для надежного обнаружения дефектов необходимо, чтобы чувствительность способа была меньше суммарного коэффициента помех, т. е., чтобы $K_{дm}^i < K_{п.з}$. В связи с этим помехоустойчивость способа при контроле сварного соединения или изделия может быть оценена коэффициентом помехоустойчивости

$$\kappa = \frac{K_{п.з}}{K_{дm}^i}, \quad (114)$$

где $K_{дm}^i$ — чувствительность i -го способа контроля; $K_{п.з}$ — суммарный коэффициент помех при контроле данным способом.

Очевидно, что из всех способов зеркально-теневого метода контроля оптимальным будет тот, который при прочих равных условиях обеспечивает максимальный коэффициент κ помехоустойчивости и максимальную чувствительность.

Сравним помехоустойчивость способов контроля прямым искателем по первому и по второму донным импульсам, как обладающих наибольшей чувствительностью.

Помеха, обусловленная нарушениями акустического контакта, по своему действию адекватна подповерхностному дефекту. Поскольку чувствительности рассматриваемых способов к таким дефектам близки, коэффициенты помех

при прочих равных условиях должны быть одинаковы, т. е. $K_{п.а}^I \approx K_{п.а}^{II}$. Это соотношение не распространяется на бесконтактный способ ввода ультразвуковых колебаний.

На рис. 101 приведены результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости способов контроля к нарушениям акустического контакта. Исследования сводились к измерению коэффициентов $K_{п.а}^I$ и $K_{п.а}^{II}$. Размеры неровностей и чистота поверхности, а также



Рис. 101. Зависимость коэффициентов помех $K_{п.а}^I$ и $K_{п.а}^{II}$ от состояния контактной поверхности изделия:

1 — чистая; 2, 3, 4 и 5 — покрыта одним, двумя, тремя и четырьмя слоями промасленной вальки; 6, 7 и 8 — покрыта слоем масла толщиной 0,4 мм, корунда и песка.

это тем, что потери энергии в контактирующем слое как для первого, так и для второго донных импульсов одинаковы; в то же время загрязнение поверхности приводит к увеличению амплитуды сигнала при отражении первого донного импульса от контактной поверхности.

Помеха, вызванная изменением отражающих свойств донной поверхности, эквивалентна действию дефекта, расположенного у донной поверхности. В связи с этим $K_{п.д}^{II} \approx (K_{п.д}^I)^2$, что подтверждается данными эксперимента [30].

Представляя локальные нарушения структуры в виде эквивалентной сосредоточенной несплошности с соответствующим коэффициентом выявляемости, можно прийти к выводу, что при прочих равных условиях коэффициенты помех $K_{п.с}^{II}$, $K_{п.с}^I$ при контроле по второму и первому донным импульсам могут быть взаимосвязаны следующими соотношениями:

при локализации неоднородности вблизи поверхности, на которой располагается искатель, $K_{п.с}^{II} \approx K_{п.с}^I$; при

локализации неоднородности вблизи донной поверхности $K_{п.с}^{II} \approx (K_{п.с}^I)^2$.

Помехи, связанные с местными непараллельностями поверхности контролируемого соединения, размеры которого в сечениях, параллельных донной плоскости, существенно больше ширины пучка, при малых углах непараллельности ориентировочно определяются коэффициентами

$$K_{п.н}^I = \Phi^2(\varphi_n) \quad \text{и} \quad K_{п.н}^{II} = \Phi^4(\varphi_n),$$

где $\Phi(\varphi)$ — функция, описывающая диаграмму направленности прямого искателя; φ_n — угол между поверхностями изделия. Тогда $K_{п.н}^{II} = (K_{п.н}^I)^2$.

Таблица 7

Коэффициент ослабления K_c и коэффициенты помехоустойчивости χ при контроле по первому и второму донным импульсам

Способ контроля	K_c	χ_a	χ_d	χ_c	χ_n	χ_{nn}
По первому донному импульсу	K_d	$\frac{K_{п.а}^I}{K_d}$	$\frac{K_{п.д}^I}{K_d}$	$\frac{K_{п.с}^I}{K_d}$	$\frac{K_{п.н}^I}{K_d}$	$\frac{K_{п.нн}^I}{K_d}$
По второму донному импульсу	K_d^2	$\frac{K_{п.а}^I}{K_d^2}$	$\frac{(K_{п.д}^I)^2}{K_d^2}$	От $\frac{K_{п.с}^I}{K_d^2}$ до $\frac{(K_{п.с}^I)^2}{K_d^2}$	От $\frac{K_{п.н}^I}{K_d^2}$ до $\frac{(K_{п.н}^I)^2}{K_d^2}$	$\geq \frac{K_{п.нн}^I}{K_d^2}$

Если размеры соединения равны или меньше ширины пучка, то вследствие отражений ультразвука от боковых поверхностей соединения коэффициенты $K_{п.н}^I$ и $K_{п.нн}^{II}$ будут связаны с углом φ_n зависимостями, которые не поддаются расчету и должны быть определены экспериментально [30]. В любом случае коэффициенты помех $K_{п.н}$ тем меньше, чем больше направленность поля, создаваемого искателями.

В то же время влияние помех из-за поперечных смещений искателя, измеряемое коэффициентами $K_{п.н}^I$, $K_{п.нн}^{II}$ будет

тем существеннее, чем меньше направленность поля. Экспериментально установлено, что помехоустойчивость способа контроля по второму донному импульсу к этому виду помех не ниже, чем по первому.

Для сравнения помехоустойчивости способов контроля по первому и второму донным импульсам формулы для коэффициентов χ помехоустойчивости этих способов сведены в табл. 7. Из таблицы следует, что способ контроля по второму донному импульсу по сравнению со способом контроля по первому донному импульсу обладает не только большей чувствительностью, но и в ряде случаев большей помехоустойчивостью. В связи с этим при контроле по второму донному импульсу могут быть выявлены дефекты в металле с загрязненной поверхностью, не обнаруживаемые при контроле по первому донному импульсу [30]. Сравнения изменения амплитуд первого и второго донных импульсов с учетом влияния на них дефектов и помех различного вида, можно повысить селективность зеркально-теневого метода к дефектам определенного вида и помехоустойчивость контроля.

4. ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ДОННОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ИСКАТЕЛЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

При любом способе контроля амплитуда донного импульса в процессе перемещения искателя несколько меняется из-за помех и падает при обнаружении дефекта.

Как показывают исследования акустического тракта теневого дефектоскопа, выполненные с учетом фазы сигнала [68], наибольшее ослабление амплитуды донного импульса может наблюдаться при некотором смещении оси искателя от дефекта.

В тех случаях, когда наибольшее ослабление донного импульса происходит при расположении дефекта на некотором расстоянии от акустической оси искателя, дефектоскопом могут быть ошибочно зафиксированы два рядом расположенных дефекта вместо одного реально существующего.

Естественно, номинальное значение амплитуды донного импульса U_0 зависит от вида контролируемой продукции.

Оно может изменяться также от изделия к изделию однотипной продукции. Поэтому при настройке чувствительности аппаратуры следует использовать величину U_0 , соответствующую данному контролируемому изделию.

Если амплитуда донного сигнала вследствие помех непрерывно флуктуирует, то чувствительность контроля, как и при эхо-методе, следует выбирать, используя методы статистических решений [103, 104, 118, 138, 149]. При этом за величину U_0 целесообразно принимать среднее значение $\bar{U}_0$ амплитуд донных импульсов. В данном случае текущие значения коэффициента помех могут превышать единицу. Если основным видом случайных помех является изменения акустического контакта, то дисперсия коэффициента помех будет количественно характеризовать стабильность акустического контакта.

Глава VI

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Под основными параметрами ультразвукового контроля сварных соединений будем понимать такие параметры, которые определяют достоверность результатов контроля. Некоторые параметры всецело зависят от применяемой аппаратуры. В связи с этим целесообразно выделить из совокупности параметров контроля параметры аппаратуры.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Основные параметры ультразвукового контроля различных соединений могут быть установлены при рассмотрении взаимосвязи отдельных элементов процесса ультразвуковой дефектоскопии, отображаемого его функциональной схемой. Такая схема будет отличаться от скелетных схем дефектоскопов, обычно приводимых в литературе для пояснения принципа ультразвуковой дефектоскопии.

Процесс ультразвуковой дефектоскопии, предназначенной не только для обнаружения дефектов, но и для определения их относительных размеров и координат расположения, состоит из следующих элементов:

1) сканирования контролируемого объема ультразвуковым лучом, перемещаемым в этом объеме. При этом искательная система может находиться в покое или совершать движение по определенной траектории относительно контролируемого объема. Траектория перемещения искательной системы связана с характером излучения ею ультразвукового луча таким образом, что обеспечивается построчное сканирование контролируемого объема;

2) приема и сигнализации о приеме ультразвуковых импульсов, отраженных от внутренних несплошностей. Чтобы приемно-сигнализирующее устройство реагировало только на эхо-сигналы, отраженные от дефектов, в нем должна быть предусмотрена система селекции, программа работы которой определяется способом сканирования;

3) постоянного слежения (наблюдения) за положением ультразвукового луча с целью определения координат последнего в момент выявления дефекта, т. е. в момент срабатывания индикатора;

4) регистрации результатов контроля в виде документа (ультразвукограммы), информирующего о наличии дефектов и их координатах. При этом данные о координатах и размерах дефектов достаточно фиксировать таким образом, чтобы легко можно было оценить качество проконтролированного шва и исправить дефектные участки;

5) оценки качества соединения по результатам контроля в соответствии с заданными техническими условиями;

6) самоконтроля за состоянием акустического контакта и работоспособностью всех узлов аппаратуры.

Описанный процесс ультразвукового контроля может быть отображен функциональной схемой, приведенной на рис. 102.

В этой схеме устройство построчного сканирования обеспечивает определенный характер излучения ультразвукового луча и такое перемещение искательной системы, при котором осуществляется построчное сканирование всего контролируемого объема. Приемно-сигнализирующее устройство усиливает поступившие на искательную систему отраженные и преобразованные импульсы, селек-

тируя и подавая на индикаторы лишь те из них, которые являются эхо-сигналами от дефектов. Программа работы селективной системы определяется способом сканирования шва, его типом и размерами. Устройство наблюдения постоянно накапливает данные о координатах луча и следит за показаниями индикаторов обнаружения дефектов. При срабатывании индикатора устройство наблюдения выдает сигнал на регистрирующее устройство.

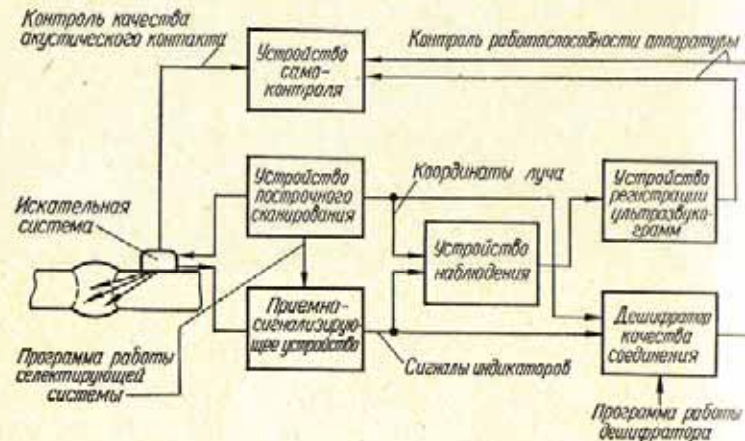


Рис. 102. Обобщенная функциональная схема процесса импульсной ультразвуковой дефектоскопии сварных швов.

Устройство регистрации фиксирует координаты расположения выявленных дефектов, а также другую информацию о них (условные размеры, конфигурацию и т. п.). Дешифратор производит оценку качества контролируемого соединения согласно введенной в него программы, составленной в соответствии с техническими условиями на качество сварного соединения. Контроль качества акустического контакта, а также работоспособности всех узлов аппаратуры выполняется устройством самоконтроля, которое при нарушении контакта или работоспособности аппаратуры останавливает процесс дефектоскопии и подает соответствующий сигнал.

Рассмотренная функциональная схема охватывает различные варианты ультразвуковой дефектоскопии швов: ручной, механизированный и автоматический. При ручном контроле функции устройства сканирования, устройства наблюдения, регистрирующего устройства, дешифратора

и устройства самоконтроля выполняются, как правило, оператором, а в качестве приемно-сигнализирующего устройства служит дефектоскоп.

Естественно, что объем получаемой при контроле информации о качестве шва, характер регистрируемого документа и конструкция аппаратуры во многом определяются способом сканирования контролируемого объекта.

Применяемые в настоящее время методы сканирования сварных соединений сводятся к прозвучиванию металла шва ультразвуковым лучом с помощью искателя,

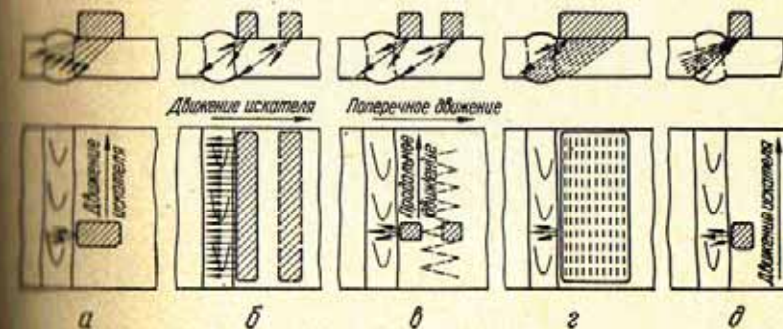


Рис. 103. Сканирование способом:

а — продольного перемещения искателя; б — поперечного перемещения искателя; в — продольно-поперечного перемещения искателя; г — качающегося луча; д — бегущего луча.

перемещаемого вдоль шва (способ продольного перемещения) или совершающего возвратно-поступательное ангагообразное движение около него (способ продольно-поперечного перемещения). Эти способы не являются единственно возможными и наиболее рациональными.

Для контроля сварных соединений могут быть применены и другие разнообразные способы сканирования. Целесообразно классифицировать способы сканирования в зависимости от характера излучения ультразвукового луча и траектории перемещения искательной системы относительно шва, разделив их на пять основных видов (рис. 103) [25]:

1. Способ продольного перемещения искательной системы. Сканирование шва осуществляется путем продольного перемещения искательной системы вдоль его длины. Искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов,

озвучивающих часть или все сечение шва (рис. 103, а).

2. Способ поперечного перемещения искательной системы. Сканирование шва осуществляется путем поперечного перемещения искательной системы перпендикулярно к его длине. Искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, озвучивающих часть или все сечение шва по всей его длине (рис. 103, б).

3) Способ продольно-поперечного перемещения искательной системы. Искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, одновременно озвучивающих узкую область наплавленного металла. Сканирование шва осуществляется путем продольно-поперечного перемещения искательной системы (рис. 103, в).

4. Способ бегающего луча. Луч вводится в металл под одним или разными фиксированными углами. Искательная система содержит мозаику из приемно-излучающих элементов, каждый из которых прозвучивает узкую область шва. Сканирование шва осуществляется путем последовательного переключения приемно-излучающих элементов, благодаря чему луч «бежит» весь контролируемый объем в то время, как сама искательная система находится в покое относительно контролируемого соединения (рис. 103, г). Вместо мозаики приемно-излучающих элементов может быть применен один преобразователь с устройством, обеспечивающим непрерывное перемещение излучающей зоны преобразователя [181].

5. Способ качающегося луча. Искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, в любой момент прозвучивающих узкую область шва. Сканирование шва осуществляется путем качания луча и перемещения искательной системы вдоль шва (рис. 103, д).

При контроле различных изделий и сварных соединений можно применять как перечисленные способы сканирования, так и некоторые их комбинации. Однако любая схема сканирования всегда при рассмотрении может быть представлена в виде эквивалентных способов из предложенной выше классификации.

Целесообразность применения того или иного способа сканирования или их комбинации в основном определяется типом и размерами сварного соединения, подлежащего

контролю. В любом случае следует отдавать предпочтение способу, легко реализуемому и обеспечивающему достаточный объем информации о выявляемых дефектах.

Таблица 8

Основные параметры эхо-метода

	Параметры контроля			Параметры аппаратуры		
	Наименование	Условное обозначение	Размерность	Наименование	Условное обозначение	Размерность
1	Длина волны	λ	мм	Частота	f	Мгц
2	Чувствительность: реальная	—	мм	Чувствительность: условная	K_y	мм
3	предельная эквивалентная	S S_0	мм ² мм	эквивалентная	S_0	мм
4	Направленность поля искателя	α_0	град	Размеры преобразователя	a	мм
5	Угол ввода луча	φ_0	град	Угол призмы	β	град
6	Точность измерения координат (точность селектирования)	A	%	Погрешность глупометра (системы селекции)	A_r	%
7	Мертвая зона	M	мм	Длительность: зондирующего импульса	τ	мксек
				реверберационных шумов из призмы	τ_p	мксек
8	Разрешающая способность по дальности	Δ	мм	Разрешающая способность	T_p	мксек
9	Разрешающая способность по углу	φ_y	мм			

При любом способе сканирования достоверность результатов дефектоскопии определяется чувствительностью и помехоустойчивостью контроля. Чувствительность контроля зависит от чувствительности дефектоскопа с искателем, длины ультразвуковой волны в прозвучиваемом металле и его акустических свойств, направленности и угла ввода ультразвукового луча, а также от качества акустического контакта. Помехоустойчивость контроля сварных соединений при использовании известной аппаратуры прежде всего обуславливается точностью селектирования полезных сигналов, основанной на измерении

координат отражающих поверхностей, а также разрешающей способностью при регистрации и дешифровке результатов дефектоскопии. Точность измерения координат, в свою очередь, зависит от направленности поля искателя и точности работы глубиномера. Поэтому чувствительность, длина волны, направленность поля искателя, угол ввода луча, точность измерения координат и разрешающая способность должны быть отнесены к основным параметрам ультразвукового контроля сварных соединений. При одних и тех же перечисленных параметрах выявляемость дефектов, расположенных вблизи поверхности, будет зависеть от величины мертвой зоны. Поэтому мертвую зону также следует включить в число основных параметров контроля. Основные параметры контроля при эхо-методе и соответствующие им параметры аппаратуры приведены в табл. 8.

К основным параметрам зеркально-теневого метода следует отнести параметры 1, 2, 3, 4, 8. Рассмотрим каждый параметр в отдельности.

2. ДЛИНА ВОЛНЫ И ЧАСТОТА

Длина волны обуславливается скоростью распространения ее в контролируемом металле и частотой ультразвуковых колебаний. При импульсном излучении частота ультразвуковых колебаний определяется частотой заполнения акустического импульса и близка к основной гармонике частотного спектра этого импульса. Частота излучаемых в металл колебаний зависит от конструкции искателя, выходных параметров генератора, а также в ряде случаев и от нагрузки на искатель (см. гл. II). Приблизительно измерять частоту ультразвука в практике дефектоскопии можно, например, одним из двух способов, предложенных Ю. Н. Штремером.

Для измерения по первому способу на вход второго каскада широкополосного усилителя дефектоскопа включается последовательный контур, состоящий из катушки индуктивности постоянной величины и переменного конденсатора (рис. 104). При этом вход каскада шунтируется контуром лишь для тех импульсов, частота которых совпадает с резонансной частотой контура. Вращая ротор конденсатора, находят такое его положение φ , при котором амплитуда эхо-сигнала на экране трубки дефектоскопа

резко уменьшается. Резонансная частота контура при этом совпадает с частотой ультразвуковых импульсов. Резонансную частоту контура определяют с помощью графиков, приведенных на рис. 105, по положению ротора конденсатора. Графики перевода положения ротора в резонансную частоту строят экспериментально с помощью генератора стандартных сигналов для каждого значения индуктивности L . Конструктивно контур удобно оформить в виде приставки, подключаемой к дефектоскопу.

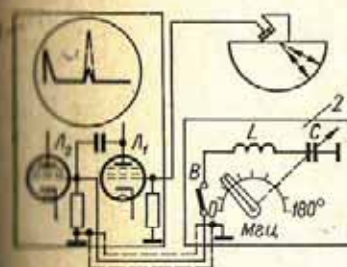


Рис. 104. Схема измерения частоты ультразвуковых колебаний с помощью резонансного контура: 1 — дефектоскоп; 2 — приставка.

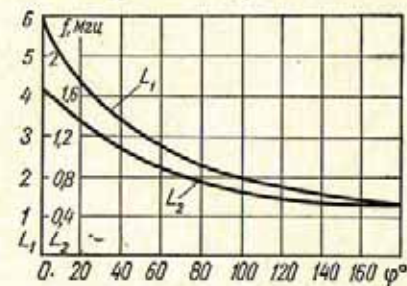


Рис. 105. График перевода положения ротора конденсатора в частоту колебаний ($L_1 = 25$ мкГн, $L_2 = 250$ мкГн, $C = 20 \div 300$ мкМкФ).

В основу второго способа измерения положена зависимость скорости упругой волны в стержне от частоты колебаний. Следует отметить, что при малой длительности ультразвуковых импульсов, а следовательно, при широком частотном спектре, отраженный импульс вследствие геометрической дисперсии будет претерпевать значительное уширение, что снижает точность измерений.

Как показывают исследования [53], частота ультразвука, излучаемого серийно выпускаемыми искателями, может существенно отличаться от номинальной, что приводит к снижению достоверности контроля.

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

В ультразвуковой дефектоскопии целесообразно различать реальную, предельную и условную чувствительности [35]. Реальная чувствительность обуславливает минимальные размеры дефектов различного характера, выявляемых в изделиях или

соединениях определенного вида. Она может быть определена статистической обработкой результатов контроля и металлографического исследования большой серии объектов этого вида. В настоящее время оценить ее можно только в области ультразвуковой дефектоскопии сварных стыков рельсов, где обобщены данные по контролю более 4 млн. сварных стыков на различных рельсостроительных заводах [96, 97, 98, 180].

Предельная чувствительность определяет минимальные размеры искусственного, оптимального с точки зрения выявляемости, отражателя (модели дефекта), который еще обнаруживается в изделии при данной настройке прибора. В качестве меры предельной чувствительности используют площадь $S(\text{мм}^2)$ отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно акустической оси искателя и расположенным в тест-образце сварного соединения на заданной глубине. В связи со сложностью точного изготовления отверстия с плоским дном при работе наклонным искателем для оценки предельной чувствительности можно применять угловой или сегментный отражатель, а в некоторых случаях и боковые отверстия [206].

Для отражателей, используемых в дефектоскопии, можно принять, что площадь S плоского отверстия равна площади сегментного отражателя и связана с эквивалентной площадью S_1 углового отражателя соотношением $S = kS_1$, где k — коэффициент, зависящий от акустических свойств контролируемого металла и от угла ввода луча. Значения коэффициента k для стали приведены в табл. 6.

Ширина b и высота h углового и сегментного отражателей должны быть больше длины поперечной ультразвуковой волны; отношение $\frac{h}{b}$ должно быть не менее 0,5 и не более 4,0 для углового и не менее 0,4 для сегментного отражателей.

Условная чувствительность характеризуется размером и глубиной расположения выявляемых искусственных отражателей, принятых в качестве эталонных и выполненных в образце из материала с определенными, строго регламентированными, акустическими свойствами. При наличии аттенюатора на входе усилителя дефектоскопа в качестве меры условной чувствительности можно использовать величину уменьшения эхо-сигнала от донной поверхности эталонного образца, при котором еще срабатывают

индикаторы дефектоскопа. Очевидно, что для измерения и воспроизведения условной чувствительности должен быть разработан специальный эталон.

Если реальная и предельная чувствительности определяют собой чувствительность метода в целом при контроле соединений данного вида, то условная — характеризует только чувствительность дефектоскопа с искателем. Предельная чувствительность всегда может быть переведена в условную с помощью тест-образца и эталона. Реальная и предельная чувствительности могут быть воспроизведены по условной чувствительности, если соблюдается строгое соответствие частоты колебаний и диаграммы направленности искателя частоте и диаграмме, при которых определялась заданная условная чувствительность.

В некоторых случаях, например при контроле соединений листов сложной формы и малой толщины, воспользоваться тест-образцами или эталоном для измерения и настройки предельной или условной чувствительности невозможно. При этом для настройки чувствительности дефектоскопа используют тест-образцы, изготовленные из основного металла или сварного соединения с моделями дефекта, отличающимися от рассмотренных, или с реальным дефектом. Чувствительность дефектоскопа, настроенного на такой тест-образец, как правило, практически несопоставима с условной или предельной чувствительностями. Дефектоскоп при такой чувствительности будет выявлять реальные дефекты, эквивалентные по отражающим характеристикам модели дефекта или дефекту в тест-образце. Поэтому эту чувствительность в дальнейшем будем называть эквивалентной.

Реальная чувствительность контроля, даже при строго стабильной условной чувствительности дефектоскопа, зависит от ряда факторов, не связанных с акустическими свойствами металла или состоянием аппаратуры. К таким факторам прежде всего относятся шероховатость поверхности металла, акустические свойства среды, контактирующей с контролируемым металлом, состояние контактной поверхности и температура, при которой ведется контроль.

Влияние шероховатости поверхности на чувствительность объясняется зависимостью коэффициента прозрачности границы призмы искателя с металлом от чистоты обработки поверхности. Известные выражения для коэффициентов прозрачности границы призмы искателя с металлом рассчитаны

без учета интерференционных явлений в контактирующем слое и справедливы для слоя толщиной $d < 0,025\lambda_{ж}$, где $\lambda_{ж}$ — длина волны в жидкости [62]. В практике величина неровностей поверхности значительно превышает это значение. При импульсном излучении интерференционные явления в слое будут отсутствовать, если толщина $d_{ж}$ его превышает половину длины волнового пакета импульса, т. е. $d_{ж} \geq d_{ж0}$, где

$$d_{ж0} = \frac{C_{ж\tau}}{2} \cos \alpha_{ж} \quad (115)$$

или

$$d_{ж0} = \frac{NC_{ж}}{2f} \sqrt{1 - \left(\frac{C_{ж}}{C_{l_1}}\right)^2 \sin^2 \beta}. \quad (116)$$

Здесь $C_{ж}$ — скорость распространения ультразвука в жидкости; τ — длительность зондирующего импульса; N — число периодов в импульсе; $\alpha_{ж}$ — угол преломления волны в жидкости; C_{l_1} — скорость продольной волны в призме; β — угол призмы.

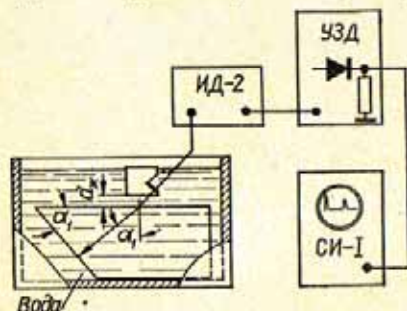


Рис. 106. Схема экспериментальной установки для исследования коэффициента прозрачности.

Интерференционные явления должны привести к осциллирующей зависимости коэффициента прозрачности от толщины слоя. Период d_{τ} предполагаемой осцилляции можно определить из соотношения

$$d_{\tau} = \lambda_{ж} \cos \alpha_{ж} = \frac{C_{ж}}{f} \sqrt{1 - \left(\frac{C_{ж}}{C_{l_1}}\right)^2 \sin^2 \beta}. \quad (117)$$

Экспериментальные исследования зависимости коэффициента прозрачности слоя контактирующей жидкости от его толщины были выполнены на специальной установке, позволяющей отсчитывать толщину слоя с точностью до 0,01 мм. Величину коэффициента прозрачности при различной толщине слоя косвенно оценивали по амплитуде U донного эхо-сигнала от плоскости, перпендикулярной лучу (рис. 106).

Из результатов эксперимента (рис. 107) видно, что

коэффициент прозрачности осциллирует не более, чем на 1 дБ (11%) при изменении толщины слоя $d_{ж}$ до 1,5 мм, затем (до $d_{ж} = 5$ мм) практически остается неизменным. Коэффициент прозрачности слоя, покрывающего поверхность проката, при толщине слоя $d_{ж} > d_{ж0}$ примерно равен коэффициенту при непосредственном контакте искателя с металлом. Некоторое отличие экспериментального значения периода осцилляции от расчетного следует отнести за счет превышения истинного значения частоты ультразвука над принятым при расчете.

Проведенные исследования свидетельствуют о не критичности ультразвукового метода к шероховатостям поверхности при сканировании наклонным искателем, возбуждающим в металле сдвиговую волну, и позволяющим считать чувствительность этого метода практически независимой от толщины слоя контактирующей среды между наклонным искателем и поверхностью проката.

В то же время контактирование поверхности металла с жидкой средой может привести к значительному снижению чувствительности контроля, особенно при прозвучивании соединения многократно отраженным лучом. Действительно, при каждом отражении от поверхности металла будет происходить потеря интенсивности ультразвуковой волны, а следовательно, и уменьшение амплитуды эхо-сигнала от выявляемого дефекта. Предположим, что при отражении от поверхности изделия интенсивность ультразвуковой волны падает в K_0 раз. Коэффициент K_0 будем называть коэффициентом потери чувствительности.

Обозначим через U_0 амплитуду эхо-сигнала от выявляемого дефекта при прозвучивании изделия прямым лучом. В этом случае амплитуда U_1 эхо-сигнала от такого же дефекта, озвучиваемого однократно отраженным лучом, при равенстве расстояний r до дефекта и при толщине металла, существенно большей размеров излучателя, будет в K_0 раз меньше амплитуды U_0 , т. е. $U_1 = K_0 U_0$.

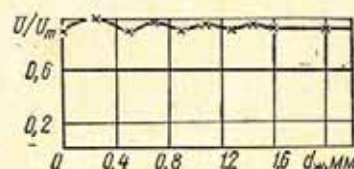


Рис. 107. Экспериментальные зависимости условной величины коэффициента прозрачности границы искатель-поверхность проката от толщины слоя контактирующей жидкости.

($K_0 < 1$). Очевидно, что амплитуда U_2 эхо-сигнала в случае прозвучивания двукратно отраженным лучом будет в K_0 раз меньше амплитуды U_1 , т. е. $U_2 = K_0 U_1 = K_0^2 U_0$.

Продолжая рассуждения, можно прийти к выводу, что амплитуда U_n эхо-сигнала от дефекта при обнаружении его n раз отраженным лучом при соблюдении указанных условий будет в K_0^n раз меньше амплитуды U_0 эхо-сигнала от того же дефекта при обнаружении его прямым лучом, т. е.

$$U_n = K_0^n U_0, \quad (118)$$

где U_n — амплитуда эхо-сигнала при контроле отраженным лучом; U_0 — амплитуда эхо-сигнала при контроле прямым лучом; n — число отражений ультразвукового луча от поверхности металла, контактирующей со средой; K_0 — коэффициент потери чувствительности при одном отражении от поверхности металла*.

Таблица 9

Расчетные и экспериментальные значения коэффициента потери чувствительности

Среда		Угол ввода луча α , град	$K_{0\text{расч}}$	$K_{0\text{экср}}^I$ размеры среды безграничны	$K_{0\text{экср}}^{II}$ металл покрыт слоем жидкости толщиной менее 2 мм
контролируемая	контактирующая				
Сталь	Вода	50	0,84	0,84	—
		65	0,85	0,82	—
	Минеральное масло	50	0,87	0,89	0,50
		65	0,88	0,87	0,57
Дюралюминий	Вода	50	0,59	0,59	—
		65	0,60	0,63	—
	Минеральное масло	50	0,65	0,62	0,11
		65	0,67	0,65	0,44

Коэффициент потери чувствительности при контакте контролируемого металла с полубезграничной средой

* Выражение (118) справедливо для n , при которых еще отсутствует интерференция крайних лучей ультразвукового пучка [100]

$$n \leq \frac{\cos(\psi_n + \psi_n) - \cos 2\alpha_0}{\sin(\psi_n + \psi_n) \operatorname{tg} \alpha_0} - 1,5.$$

$$K_0 = R_t^2, \quad (119)$$

где R_t — коэффициент отражения поперечной волны на границе металл — среда, являющийся функцией угла падения поперечной волны в металле, удельных акустических сопротивлений металла и среды, контактирующей с металлом [12].

Значения коэффициентов K_0 для наиболее часто встречающихся в ультразвуковой дефектоскопии сред приведены в табл. 9.

Если толщина слоя, покрывающего поверхность металла, меньше длины волнового пакета, то вследствие интерференционных явлений в слое величина коэффициента K_0 потери чувствительности может быть существенно меньше рассчитанных значений.

Влияние интерференционных явлений на чувствительность исследовали на образцах из стали и дюралюминия. Вначале измеряли амплитуду U_0^I донного эхо-сигнала от поверхности I образца (рис. 108, а); далее, не меняя положения искателя, ванну наполняли жидкостью (водой или минеральным маслом) до смачивания отражающей поверхности II и вновь измеряли амплитуду U_1^I этого же сигнала. Значение коэффициента $K_{0\text{экср}}^I$ определяли из соотношения $K_{0\text{экср}}^I = \frac{U_1^I}{U_0^I}$. Затем аналогично измеряли амплитуду донного эхо-сигнала U_0^{II} при сухой поверхности II и амплитуду U_1^{II} при поверхности II, покрытой тонким слоем минерального масла (рис. 108, б). При этом толщину слоя подбирали такой, чтобы амплитуда U_1^{II} была минимальной. Величину коэффициента $K_{0\text{экср}}^{II}$ рассчитывали по соотношению $K_{0\text{экср}}^{II} = \frac{U_1^{II}}{U_0^{II}}$. Средние значения измеренных коэффициентов $K_{0\text{экср}}^I$ и $K_{0\text{экср}}^{II}$ сведены в табл. 9.

Из табл. 9 видно, что величина коэффициента потери чувствительности при нанесении на поверхность слоя контактирующей среды из-за интерференционных явлений может быть значительно ниже величины соответствующих коэффициентов при контакте металла с полубезграничной средой, что имеет место при иммерсионном способе ввода колебаний. При таких значениях коэффициента

K_0 и прозвучивании соединений многократно отраженным лучом уменьшение чувствительности может быть весьма существенным. На рис. 109 показаны зависимости ослабления амплитуды эхо-сигнала, характеризующие собой чувствительность контроля, от количества отражений вследствие смачивания поверхности металла слоем масла (контактный вариант) или погружения ее в воду (иммерсионный вариант), рассчитанные по соотношению (118) для значений коэффициента $K_{0\text{эксп}}$, измеренных экспериментально. Как это видно из рис. 109, потери чувствительности, связанные с контактированием поверхностей металла с жидкостью, зависят от способа ввода колебаний (контактный или иммерсионный); они возрастают с увеличением числа отражений и практически могут достигать 50—80 %.

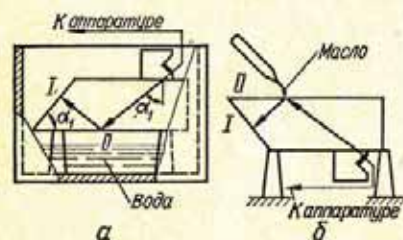


Рис. 108. Схемы измерения коэффициента потери чувствительности.

При сравнении чувствительности контроля при контактном и иммерсионном способах ввода колебаний в металл видно, что чувствительность контроля наклонным искателем по необработанной поверхности проката практически не зависит от способа ввода колебаний, если прозвучивание ведется прямым лучом. При прозвучивании шва многократно отраженным лучом чувствительность контроля при иммерсионном способе ввода колебаний будет значительно ниже, чем при контактном способе, если в последнем случае поверхности металла покрыты слоем контактирующей жидкости только в зоне переме-

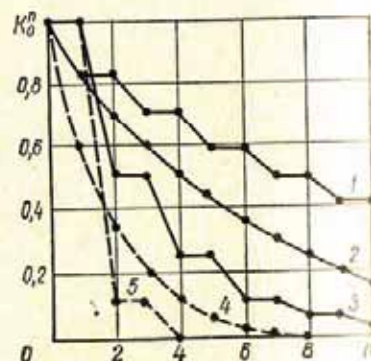


Рис. 109. Расчетные зависимости коэффициента потери чувствительности K_0^n от количества отражений n :

1, 2, 3 — сталь соответственно в воде одна поверхность, две поверхности, контактная поверхность покрыта слоем масла; 4, 5 — дюралюминий соответственно в воде две поверхности, контактная поверхность покрыта слоем масла.

щения искателя. Если же эти поверхности покрыты слоем жидкости вне зоны перемещения искателя, а толщина слоя меньше длины пакета ультразвукового импульса, то чувствительность контроля при контактном способе ввода колебаний может оказаться ниже чувствительности контроля при иммерсионном способе. В связи с этим для получения возможно большей чувствительности и повышения ее стабильности при контроле сварных соединений необходимо освобождать от жидкости на время контроля наполненные резервуары и трубы, удалять слой контактирующей жидкости с поверхности, по которой не перемещается искатель, а при иммерсионном способе ввода колебаний и прозвучивании многократно отраженным лучом искатель размещать в локальной ванне с минимально возможной площадью поверхности, контактирующей с металлом.

При любом способе ввода колебаний чувствительность контроля определяется состоянием поверхности металла, через которую вводится ультразвук. Измерения показывают, что чувствительность при работе наклонным искателем по поверхности проката может составлять 50—80% чувствительности при работе по поверхности, предварительно обработанной по шестому классу чистоты [32, 193]. В то же время грубая механическая обработка прокатанной поверхности, например вручную с помощью наждачного круга, может значительно ухудшить акустический контакт.

При одном и том же состоянии контактной поверхности коэффициент прозрачности границы призмы искателя с контролируемым металлом определяется соотношением скоростей ультразвуковых волн в материале призмы и в контролируемом металле (см. гл. I). Скорость ультразвука в органическом стекле, из которого изготавливают призмы, существенно зависит от температуры [32], в то время, как скорость в металле при изменении температуры в пределах до 100° С практически остается постоянной [110]. В связи с этим температура, при которой ведется контроль, влияет на коэффициент прозрачности границы искатель — металл и угол ввода луча в металл. Увеличение температуры, как правило, сопровождается уменьшением коэффициента прозрачности и возрастанием угла ввода луча. При этом также увеличивается коэффициент затухания ультразвука в призме искателя. Все это приводит к тому, что с увеличением температуры чувствительность контроля падает. Зависимость чувствительности от температуры тем выше, чем больше

K_0 и прозвучивании соединений многократно отраженным лучом уменьшение чувствительности может быть весьма существенным. На рис. 109 показаны зависимости ослабления амплитуды эхо-сигнала, характеризующие собой чувствительность контроля, от количества отражений вследствие смачивания поверхности металла слоем масла (контактный вариант) или погружения ее в воду (иммерсионный вариант), рассчитанные по соотношению (118) для значений коэффициента $K_{0\text{эксп}}$, измеренных экспериментально. Как это видно из рис. 109, потери чувствительности, связанные с контактированием поверхностей металла с жидкостью, зависят от способа ввода колебаний (контактный или иммерсионный); они возрастают с увеличением числа отражений и практически могут достигать 50—80%.

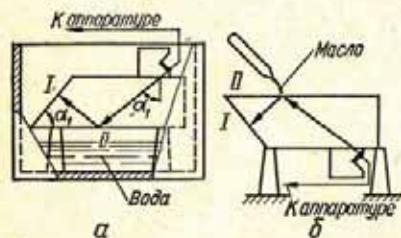


Рис. 108. Схемы измерения коэффициента потери чувствительности.

При сравнении чувствительности контроля при контактном и иммерсионном способах ввода колебаний в металл видно, что чувствительность контроля наклонным искателем по необработанной поверхности проката практически не зависит от способа ввода колебаний, если прозвучивание ведется прямым лучом. При прозвучивании шва многократно отраженным лучом чувствительность контроля при иммерсионном способе ввода колебаний будет значительно ниже, чем при контактном способе, если в последнем случае поверхности металла покрыты слоем контактирующей жидкости только в зоне переме-

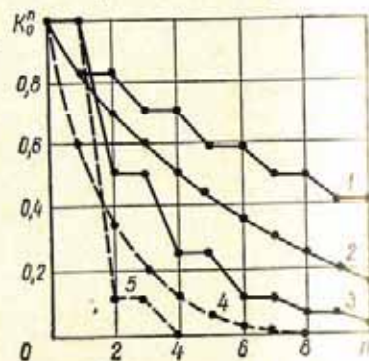


Рис. 109. Расчетные зависимости коэффициента потери чувствительности K_0^n от количества отражений n :

1, 2, 3 — сталь соответственно в воде, одна поверхность, две поверхности, контактная поверхность покрыта слоем масла; 4, 5 — дюралюминий соответственно в воде две поверхности, контактная поверхность покрыта слоем масла.

щения искателя. Если же эти поверхности покрыты слоем жидкости вне зоны перемещения искателя, а толщина слоя меньше длины пакета ультразвукового импульса, то чувствительность контроля при контактном способе ввода колебаний может оказаться ниже чувствительности контроля при иммерсионном способе. В связи с этим для получения возможно большей чувствительности и повышения ее стабильности при контроле сварных соединений необходимо освобождать от жидкости на время контроля наполненные резервуары и трубы, удалять слой контактирующей жидкости с поверхности, по которой не перемещается искатель, а при иммерсионном способе ввода колебаний и прозвучивании многократно отраженным лучом искатель размещать в локальной ванне с минимально возможной площадью поверхности, контактирующей с металлом.

При любом способе ввода колебаний чувствительность контроля определяется состоянием поверхности металла, через которую вводится ультразвук. Измерения показывают, что чувствительность при работе наклонным искателем по поверхности проката может составлять 50—80% чувствительности при работе по поверхности, предварительно обработанной по шестому классу чистоты [32, 193]. В то же время грубая механическая обработка прокатанной поверхности, например вручную с помощью наждачного круга, может значительно ухудшить акустический контакт.

При одном и том же состоянии контактной поверхности коэффициент прозрачности границы призмы искателя с контролируемым металлом определяется соотношением скоростей ультразвуковых волн в материале призмы и в контролируемом металле (см. гл. I). Скорость ультразвука в органическом стекле, из которого изготовляют призмы, существенно зависит от температуры [32], в то время, как скорость в металле при изменении температуры в пределах до 100° С практически остается постоянной [110]. В связи с этим температура, при которой ведется контроль, влияет на коэффициент прозрачности границы искатель — металл и угол ввода луча в металл. Увеличение температуры, как правило, сопровождается уменьшением коэффициента прозрачности и возрастанием угла ввода луча. При этом также уменьшается коэффициент затухания ультразвука в призме искателя. Все это приводит к тому, что с увеличением температуры чувствительность контроля падает. Зависимость чувствительности от температуры тем выше, чем больше

угол призмы искателя. В связи с этим при использовании искателей с большими углами призмы ($\beta = 50 \div 54^\circ$) необходимо производить настройку чувствительности дефектоскопа при той температуре, при которой будет проводиться контроль.

4. НАПРАВЛЕННОСТЬ ПОЛЯ ИСКАТЕЛЯ

Для контроля сварных соединений особый интерес представляет направленность поля наклонных искателей в плоскости падения центрального луча.

Направленность поля наклонного искателя так же, как и прямого (см. гл. I), изображают в виде диаграммы,

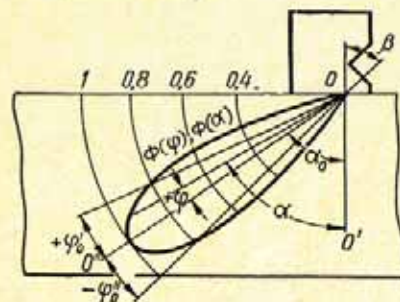


Рис. 110. Диаграмма направленности в полярных координатах.

изделия и проходящей через условный центр O волнового пучка (рис. 110).

В ряде случаев для сравнения направленности поля диаграммы задают в прямоугольных координатах $\Phi(\varphi)$ и φ , где φ — угол, отсчитываемый от полярной оси OO'' , совпадающей с акустической осью искателя (рис. 110). При использовании такой системы координат необходимо дополнительно указывать угол наклона оси диаграммы направленности, т. е. угол α_0 между акустической осью искателя и нормалью к поверхности изделия.

Направленность поля наклонных искателей впервые исследована Д. Б. Диановым [63].

В связи с тем, что анализ полученного Д. Б. Диановым выражения [63] в общем виде затруднителен, выполнены расчеты на электронно-вычислительной машине диаграмм направленности наклонных искателей для большинства вариантов, встречающихся в дефектоскопии сварных соединений [36].

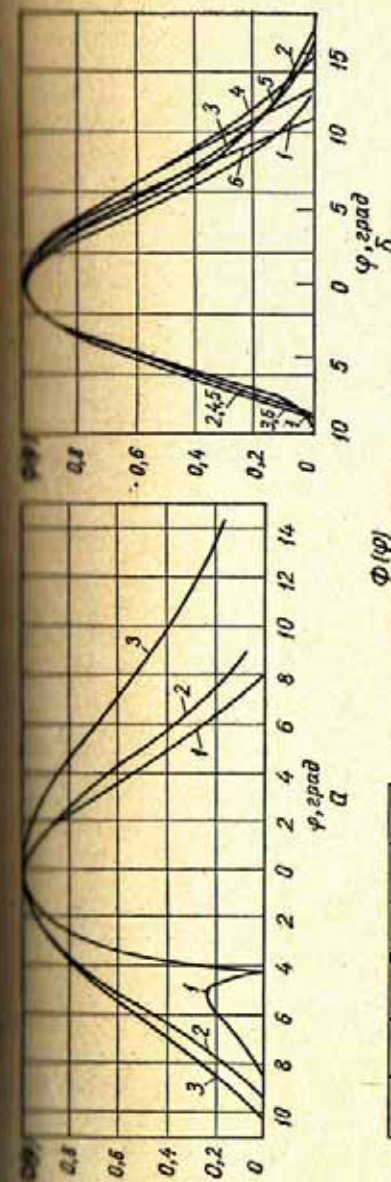


Рис. 111. Расчетные диаграммы направленности (основной лосек) поля поперечной волны в стали, создаваемого наклонными искателями с призмой из органического стекла:
 1) $\alpha = 15^\circ$; $\beta = 50^\circ$; $\alpha_0 = 30^\circ$; $\alpha_1 = 20^\circ$; $\alpha_2 = 40^\circ$; $\alpha_3 = 50^\circ$; $\alpha_4 = 60^\circ$; $\alpha_5 = 70^\circ$; $\alpha_6 = 75^\circ$; $\alpha_7 = 80^\circ$; $\alpha_8 = 85^\circ$; $\alpha_9 = 90^\circ$; $\alpha_{10} = 95^\circ$; $\alpha_{11} = 100^\circ$; $\alpha_{12} = 105^\circ$; $\alpha_{13} = 110^\circ$; $\alpha_{14} = 115^\circ$; $\alpha_{15} = 120^\circ$; $\alpha_{16} = 125^\circ$; $\alpha_{17} = 130^\circ$; $\alpha_{18} = 135^\circ$; $\alpha_{19} = 140^\circ$; $\alpha_{20} = 145^\circ$; $\alpha_{21} = 150^\circ$; $\alpha_{22} = 155^\circ$; $\alpha_{23} = 160^\circ$; $\alpha_{24} = 165^\circ$; $\alpha_{25} = 170^\circ$; $\alpha_{26} = 175^\circ$; $\alpha_{27} = 180^\circ$; $\alpha_{28} = 185^\circ$; $\alpha_{29} = 190^\circ$; $\alpha_{30} = 195^\circ$; $\alpha_{31} = 200^\circ$; $\alpha_{32} = 205^\circ$; $\alpha_{33} = 210^\circ$; $\alpha_{34} = 215^\circ$; $\alpha_{35} = 220^\circ$; $\alpha_{36} = 225^\circ$; $\alpha_{37} = 230^\circ$; $\alpha_{38} = 235^\circ$; $\alpha_{39} = 240^\circ$; $\alpha_{40} = 245^\circ$; $\alpha_{41} = 250^\circ$; $\alpha_{42} = 255^\circ$; $\alpha_{43} = 260^\circ$; $\alpha_{44} = 265^\circ$; $\alpha_{45} = 270^\circ$; $\alpha_{46} = 275^\circ$; $\alpha_{47} = 280^\circ$; $\alpha_{48} = 285^\circ$; $\alpha_{49} = 290^\circ$; $\alpha_{50} = 295^\circ$; $\alpha_{51} = 300^\circ$; $\alpha_{52} = 305^\circ$; $\alpha_{53} = 310^\circ$; $\alpha_{54} = 315^\circ$; $\alpha_{55} = 320^\circ$; $\alpha_{56} = 325^\circ$; $\alpha_{57} = 330^\circ$; $\alpha_{58} = 335^\circ$; $\alpha_{59} = 340^\circ$; $\alpha_{60} = 345^\circ$; $\alpha_{61} = 350^\circ$; $\alpha_{62} = 355^\circ$; $\alpha_{63} = 360^\circ$; $\alpha_{64} = 365^\circ$; $\alpha_{65} = 370^\circ$; $\alpha_{66} = 375^\circ$; $\alpha_{67} = 380^\circ$; $\alpha_{68} = 385^\circ$; $\alpha_{69} = 390^\circ$; $\alpha_{70} = 395^\circ$; $\alpha_{71} = 400^\circ$; $\alpha_{72} = 405^\circ$; $\alpha_{73} = 410^\circ$; $\alpha_{74} = 415^\circ$; $\alpha_{75} = 420^\circ$; $\alpha_{76} = 425^\circ$; $\alpha_{77} = 430^\circ$; $\alpha_{78} = 435^\circ$; $\alpha_{79} = 440^\circ$; $\alpha_{80} = 445^\circ$; $\alpha_{81} = 450^\circ$; $\alpha_{82} = 455^\circ$; $\alpha_{83} = 460^\circ$; $\alpha_{84} = 465^\circ$; $\alpha_{85} = 470^\circ$; $\alpha_{86} = 475^\circ$; $\alpha_{87} = 480^\circ$; $\alpha_{88} = 485^\circ$; $\alpha_{89} = 490^\circ$; $\alpha_{90} = 495^\circ$; $\alpha_{91} = 500^\circ$; $\alpha_{92} = 505^\circ$; $\alpha_{93} = 510^\circ$; $\alpha_{94} = 515^\circ$; $\alpha_{95} = 520^\circ$; $\alpha_{96} = 525^\circ$; $\alpha_{97} = 530^\circ$; $\alpha_{98} = 535^\circ$; $\alpha_{99} = 540^\circ$; $\alpha_{100} = 545^\circ$; $\alpha_{101} = 550^\circ$; $\alpha_{102} = 555^\circ$; $\alpha_{103} = 560^\circ$; $\alpha_{104} = 565^\circ$; $\alpha_{105} = 570^\circ$; $\alpha_{106} = 575^\circ$; $\alpha_{107} = 580^\circ$; $\alpha_{108} = 585^\circ$; $\alpha_{109} = 590^\circ$; $\alpha_{110} = 595^\circ$; $\alpha_{111} = 600^\circ$; $\alpha_{112} = 605^\circ$; $\alpha_{113} = 610^\circ$; $\alpha_{114} = 615^\circ$; $\alpha_{115} = 620^\circ$; $\alpha_{116} = 625^\circ$; $\alpha_{117} = 630^\circ$; $\alpha_{118} = 635^\circ$; $\alpha_{119} = 640^\circ$; $\alpha_{120} = 645^\circ$; $\alpha_{121} = 650^\circ$; $\alpha_{122} = 655^\circ$; $\alpha_{123} = 660^\circ$; $\alpha_{124} = 665^\circ$; $\alpha_{125} = 670^\circ$; $\alpha_{126} = 675^\circ$; $\alpha_{127} = 680^\circ$; $\alpha_{128} = 685^\circ$; $\alpha_{129} = 690^\circ$; $\alpha_{130} = 695^\circ$; $\alpha_{131} = 700^\circ$; $\alpha_{132} = 705^\circ$; $\alpha_{133} = 710^\circ$; $\alpha_{134} = 715^\circ$; $\alpha_{135} = 720^\circ$; $\alpha_{136} = 725^\circ$; $\alpha_{137} = 730^\circ$; $\alpha_{138} = 735^\circ$; $\alpha_{139} = 740^\circ$; $\alpha_{140} = 745^\circ$; $\alpha_{141} = 750^\circ$; $\alpha_{142} = 755^\circ$; $\alpha_{143} = 760^\circ$; $\alpha_{144} = 765^\circ$; $\alpha_{145} = 770^\circ$; $\alpha_{146} = 775^\circ$; $\alpha_{147} = 780^\circ$; $\alpha_{148} = 785^\circ$; $\alpha_{149} = 790^\circ$; $\alpha_{150} = 795^\circ$; $\alpha_{151} = 800^\circ$; $\alpha_{152} = 805^\circ$; $\alpha_{153} = 810^\circ$; $\alpha_{154} = 815^\circ$; $\alpha_{155} = 820^\circ$; $\alpha_{156} = 825^\circ$; $\alpha_{157} = 830^\circ$; $\alpha_{158} = 835^\circ$; $\alpha_{159} = 840^\circ$; $\alpha_{160} = 845^\circ$; $\alpha_{161} = 850^\circ$; $\alpha_{162} = 855^\circ$; $\alpha_{163} = 860^\circ$; $\alpha_{164} = 865^\circ$; $\alpha_{165} = 870^\circ$; $\alpha_{166} = 875^\circ$; $\alpha_{167} = 880^\circ$; $\alpha_{168} = 885^\circ$; $\alpha_{169} = 890^\circ$; $\alpha_{170} = 895^\circ$; $\alpha_{171} = 900^\circ$; $\alpha_{172} = 905^\circ$; $\alpha_{173} = 910^\circ$; $\alpha_{174} = 915^\circ$; $\alpha_{175} = 920^\circ$; $\alpha_{176} = 925^\circ$; $\alpha_{177} = 930^\circ$; $\alpha_{178} = 935^\circ$; $\alpha_{179} = 940^\circ$; $\alpha_{180} = 945^\circ$; $\alpha_{181} = 950^\circ$; $\alpha_{182} = 955^\circ$; $\alpha_{183} = 960^\circ$; $\alpha_{184} = 965^\circ$; $\alpha_{185} = 970^\circ$; $\alpha_{186} = 975^\circ$; $\alpha_{187} = 980^\circ$; $\alpha_{188} = 985^\circ$; $\alpha_{189} = 990^\circ$; $\alpha_{190} = 995^\circ$; $\alpha_{191} = 1000^\circ$; $\alpha_{192} = 1005^\circ$; $\alpha_{193} = 1010^\circ$; $\alpha_{194} = 1015^\circ$; $\alpha_{195} = 1020^\circ$; $\alpha_{196} = 1025^\circ$; $\alpha_{197} = 1030^\circ$; $\alpha_{198} = 1035^\circ$; $\alpha_{199} = 1040^\circ$; $\alpha_{200} = 1045^\circ$; $\alpha_{201} = 1050^\circ$; $\alpha_{202} = 1055^\circ$; $\alpha_{203} = 1060^\circ$; $\alpha_{204} = 1065^\circ$; $\alpha_{205} = 1070^\circ$; $\alpha_{206} = 1075^\circ$; $\alpha_{207} = 1080^\circ$; $\alpha_{208} = 1085^\circ$; $\alpha_{209} = 1090^\circ$; $\alpha_{210} = 1095^\circ$; $\alpha_{211} = 1100^\circ$; $\alpha_{212} = 1105^\circ$; $\alpha_{213} = 1110^\circ$; $\alpha_{214} = 1115^\circ$; $\alpha_{215} = 1120^\circ$; $\alpha_{216} = 1125^\circ$; $\alpha_{217} = 1130^\circ$; $\alpha_{218} = 1135^\circ$; $\alpha_{219} = 1140^\circ$; $\alpha_{220} = 1145^\circ$; $\alpha_{221} = 1150^\circ$; $\alpha_{222} = 1155^\circ$; $\alpha_{223} = 1160^\circ$; $\alpha_{224} = 1165^\circ$; $\alpha_{225} = 1170^\circ$; $\alpha_{226} = 1175^\circ$; $\alpha_{227} = 1180^\circ$; $\alpha_{228} = 1185^\circ$; $\alpha_{229} = 1190^\circ$; $\alpha_{230} = 1195^\circ$; $\alpha_{231} = 1200^\circ$; $\alpha_{232} = 1205^\circ$; $\alpha_{233} = 1210^\circ$; $\alpha_{234} = 1215^\circ$; $\alpha_{235} = 1220^\circ$; $\alpha_{236} = 1225^\circ$; $\alpha_{237} = 1230^\circ$; $\alpha_{238} = 1235^\circ$; $\alpha_{239} = 1240^\circ$; $\alpha_{240} = 1245^\circ$; $\alpha_{241} = 1250^\circ$; $\alpha_{242} = 1255^\circ$; $\alpha_{243} = 1260^\circ$; $\alpha_{244} = 1265^\circ$; $\alpha_{245} = 1270^\circ$; $\alpha_{246} = 1275^\circ$; $\alpha_{247} = 1280^\circ$; $\alpha_{248} = 1285^\circ$; $\alpha_{249} = 1290^\circ$; $\alpha_{250} = 1295^\circ$; $\alpha_{251} = 1300^\circ$; $\alpha_{252} = 1305^\circ$; $\alpha_{253} = 1310^\circ$; $\alpha_{254} = 1315^\circ$; $\alpha_{255} = 1320^\circ$; $\alpha_{256} = 1325^\circ$; $\alpha_{257} = 1330^\circ$; $\alpha_{258} = 1335^\circ$; $\alpha_{259} = 1340^\circ$; $\alpha_{260} = 1345^\circ$; $\alpha_{261} = 1350^\circ$; $\alpha_{262} = 1355^\circ$; $\alpha_{263} = 1360^\circ$; $\alpha_{264} = 1365^\circ$; $\alpha_{265} = 1370^\circ$; $\alpha_{266} = 1375^\circ$; $\alpha_{267} = 1380^\circ$; $\alpha_{268} = 1385^\circ$; $\alpha_{269} = 1390^\circ$; $\alpha_{270} = 1395^\circ$; $\alpha_{271} = 1400^\circ$; $\alpha_{272} = 1405^\circ$; $\alpha_{273} = 1410^\circ$; $\alpha_{274} = 1415^\circ$; $\alpha_{275} = 1420^\circ$; $\alpha_{276} = 1425^\circ$; $\alpha_{277} = 1430^\circ$; $\alpha_{278} = 1435^\circ$; $\alpha_{279} = 1440^\circ$; $\alpha_{280} = 1445^\circ$; $\alpha_{281} = 1450^\circ$; $\alpha_{282} = 1455^\circ$; $\alpha_{283} = 1460^\circ$; $\alpha_{284} = 1465^\circ$; $\alpha_{285} = 1470^\circ$; $\alpha_{286} = 1475^\circ$; $\alpha_{287} = 1480^\circ$; $\alpha_{288} = 1485^\circ$; $\alpha_{289} = 1490^\circ$; $\alpha_{290} = 1495^\circ$; $\alpha_{291} = 1500^\circ$; $\alpha_{292} = 1505^\circ$; $\alpha_{293} = 1510^\circ$; $\alpha_{294} = 1515^\circ$; $\alpha_{295} = 1520^\circ$; $\alpha_{296} = 1525^\circ$; $\alpha_{297} = 1530^\circ$; $\alpha_{298} = 1535^\circ$; $\alpha_{299} = 1540^\circ$; $\alpha_{300} = 1545^\circ$; $\alpha_{301} = 1550^\circ$; $\alpha_{302} = 1555^\circ$; $\alpha_{303} = 1560^\circ$; $\alpha_{304} = 1565^\circ$; $\alpha_{305} = 1570^\circ$; $\alpha_{306} = 1575^\circ$; $\alpha_{307} = 1580^\circ$; $\alpha_{308} = 1585^\circ$; $\alpha_{309} = 1590^\circ$; $\alpha_{310} = 1595^\circ$; $\alpha_{311} = 1600^\circ$; $\alpha_{312} = 1605^\circ$; $\alpha_{313} = 1610^\circ$; $\alpha_{314} = 1615^\circ$; $\alpha_{315} = 1620^\circ$; $\alpha_{316} = 1625^\circ$; $\alpha_{317} = 1630^\circ$; $\alpha_{318} = 1635^\circ$; $\alpha_{319} = 1640^\circ$; $\alpha_{320} = 1645^\circ$; $\alpha_{321} = 1650^\circ$; $\alpha_{322} = 1655^\circ$; $\alpha_{323} = 1660^\circ$; $\alpha_{324} = 1665^\circ$; $\alpha_{325} = 1670^\circ$; $\alpha_{326} = 1675^\circ$; $\alpha_{327} = 1680^\circ$; $\alpha_{328} = 1685^\circ$; $\alpha_{329} = 1690^\circ$; $\alpha_{330} = 1695^\circ$; $\alpha_{331} = 1700^\circ$; $\alpha_{332} = 1705^\circ$; $\alpha_{333} = 1710^\circ$; $\alpha_{334} = 1715^\circ$; $\alpha_{335} = 1720^\circ$; $\alpha_{336} = 1725^\circ$; $\alpha_{337} = 1730^\circ$; $\alpha_{338} = 1735^\circ$; $\alpha_{339} = 1740^\circ$; $\alpha_{340} = 1745^\circ$; $\alpha_{341} = 1750^\circ$; $\alpha_{342} = 1755^\circ$; $\alpha_{343} = 1760^\circ$; $\alpha_{344} = 1765^\circ$; $\alpha_{345} = 1770^\circ$; $\alpha_{346} = 1775^\circ$; $\alpha_{347} = 1780^\circ$; $\alpha_{348} = 1785^\circ$; $\alpha_{349} = 1790^\circ$; $\alpha_{350} = 1795^\circ$; $\alpha_{351} = 1800^\circ$; $\alpha_{352} = 1805^\circ$; $\alpha_{353} = 1810^\circ$; $\alpha_{354} = 1815^\circ$; $\alpha_{355} = 1820^\circ$; $\alpha_{356} = 1825^\circ$; $\alpha_{357} = 1830^\circ$; $\alpha_{358} = 1835^\circ$; $\alpha_{359} = 1840^\circ$; $\alpha_{360} = 1845^\circ$; $\alpha_{361} = 1850^\circ$; $\alpha_{362} = 1855^\circ$; $\alpha_{363} = 1860^\circ$; $\alpha_{364} = 1865^\circ$; $\alpha_{365} = 1870^\circ$; $\alpha_{366} = 1875^\circ$; $\alpha_{367} = 1880^\circ$; $\alpha_{368} = 1885^\circ$; $\alpha_{369} = 1890^\circ$; $\alpha_{370} = 1895^\circ$; $\alpha_{371} = 1900^\circ$; $\alpha_{372} = 1905^\circ$; $\alpha_{373} = 1910^\circ$; $\alpha_{374} = 1915^\circ$; $\alpha_{375} = 1920^\circ$; $\alpha_{376} = 1925^\circ$; $\alpha_{377} = 1930^\circ$; $\alpha_{378} = 1935^\circ$; $\alpha_{379} = 1940^\circ$; $\alpha_{380} = 1945^\circ$; $\alpha_{381} = 1950^\circ$; $\alpha_{382} = 1955^\circ$; $\alpha_{383} = 1960^\circ$; $\alpha_{384} = 1965^\circ$; $\alpha_{385} = 1970^\circ$; $\alpha_{386} = 1975^\circ$; $\alpha_{387} = 1980^\circ$; $\alpha_{388} = 1985^\circ$; $\alpha_{389} = 1990^\circ$; $\alpha_{390} = 1995^\circ$; $\alpha_{391} = 2000^\circ$; $\alpha_{392} = 2005^\circ$; $\alpha_{393} = 2010^\circ$; $\alpha_{394} = 2015^\circ$; $\alpha_{395} = 2020^\circ$; $\alpha_{396} = 2025^\circ$; $\alpha_{397} = 2030^\circ$; $\alpha_{398} = 2035^\circ$; $\alpha_{399} = 2040^\circ$; $\alpha_{400} = 2045^\circ$; $\alpha_{401} = 2050^\circ$; $\alpha_{402} = 2055^\circ$; $\alpha_{403} = 2060^\circ$; $\alpha_{404} = 2065^\circ$; $\alpha_{405} = 2070^\circ$; $\alpha_{406} = 2075^\circ$; $\alpha_{407} = 2080^\circ$; $\alpha_{408} = 2085^\circ$; $\alpha_{409} = 2090^\circ$; $\alpha_{410} = 2095^\circ$; $\alpha_{411} = 2100^\circ$; $\alpha_{412} = 2105^\circ$; $\alpha_{413} = 2110^\circ$; $\alpha_{414} = 2115^\circ$; $\alpha_{415} = 2120^\circ$; $\alpha_{416} = 2125^\circ$; $\alpha_{417} = 2130^\circ$; $\alpha_{418} = 2135^\circ$; $\alpha_{419} = 2140^\circ$; $\alpha_{420} = 2145^\circ$; $\alpha_{421} = 2150^\circ$; $\alpha_{422} = 2155^\circ$; $\alpha_{423} = 2160^\circ$; $\alpha_{424} = 2165^\circ$; $\alpha_{425} = 2170^\circ$; $\alpha_{426} = 2175^\circ$; $\alpha_{427} = 2180^\circ$; $\alpha_{428} = 2185^\circ$; $\alpha_{429} = 2190^\circ$; $\alpha_{430} = 2195^\circ$; $\alpha_{431} = 2200^\circ$; $\alpha_{432} = 2205^\circ$; $\alpha_{433} = 2210^\circ$; $\alpha_{434} = 2215^\circ$; $\alpha_{435} = 2220^\circ$; $\alpha_{436} = 2225^\circ$; $\alpha_{437} = 2230^\circ$; $\alpha_{438} = 2235^\circ$; $\alpha_{439} = 2240^\circ$; $\alpha_{440} = 2245^\circ$; $\alpha_{441} = 2250^\circ$; $\alpha_{442} = 2255^\circ$; $\alpha_{443} = 2260^\circ$; $\alpha_{444} = 2265^\circ$; $\alpha_{445} = 2270^\circ$; $\alpha_{446} = 2275^\circ$; $\alpha_{447} = 2280^\circ$; $\alpha_{448} = 2285^\circ$; $\alpha_{449} = 2290^\circ$; $\alpha_{450} = 2295^\circ$; $\alpha_{451} = 2300^\circ$; $\alpha_{452} = 2305^\circ$; $\alpha_{453} = 2310^\circ$; $\alpha_{454} = 2315^\circ$; $\alpha_{455} = 2320^\circ$; $\alpha_{456} = 2325^\circ$; $\alpha_{457} = 2330^\circ$; $\alpha_{458} = 2335^\circ$; $\alpha_{459} = 2340^\circ$; $\alpha_{460} = 2345^\circ$; $\alpha_{461} = 2350^\circ$; $\alpha_{462} = 2355^\circ$; $\alpha_{463} = 2360^\circ$; $\alpha_{464} = 2365^\circ$; $\alpha_{465} = 2370^\circ$; $\alpha_{466} = 2375^\circ$; $\alpha_{467} = 2380^\circ$; $\alpha_{468} = 2385^\circ$; $\alpha_{469} = 2390^\circ$; $\alpha_{470} = 2395^\circ$; $\alpha_{471} = 2400^\circ$; $\alpha_{472} = 2405^\circ$; $\alpha_{473} = 2410^\circ$; $\alpha_{474} = 2415^\circ$; $\alpha_{475} = 2420^\circ$; $\alpha_{476} = 2425^\circ$; $\alpha_{477} = 2430^\circ$; $\alpha_{478} = 2435^\circ$; $\alpha_{479} = 2440^\circ$; $\alpha_{480} = 2445^\circ$; $\alpha_{481} = 2450^\circ$; $\alpha_{482} = 2455^\circ$; $\alpha_{483} = 2460^\circ$; $\alpha_{484} = 2465^\circ$; $\alpha_{485} = 2470^\circ$; $\alpha_{486} = 2475^\circ$; $\alpha_{487} = 2480^\circ$; $\alpha_{488} = 2485^\circ$; $\alpha_{489} = 2490^\circ$; $\alpha_{490} = 2495^\circ$; $\alpha_{491} = 2500^\circ$; $\alpha_{492} = 2505^\circ$; $\alpha_{493} = 2510^\circ$; $\alpha_{494} = 2515^\circ$; $\alpha_{495} = 2520^\circ$; $\alpha_{496} = 2525^\circ$; $\alpha_{497} = 2530^\circ$; $\alpha_{498} = 2535^\circ$; $\alpha_{499} = 2540^\circ$; $\alpha_{500} = 2545^\circ$; $\alpha_{501} = 2550^\circ$; $\alpha_{502} = 2555^\circ$; $\alpha_{503} = 2560^\circ$; $\alpha_{504} = 2565^\circ$; $\alpha_{505} = 2570^\circ$; $\alpha_{506} = 2575^\circ$; $\alpha_{507} = 2580^\circ$; $\alpha_{508} = 2585^\circ$; $\alpha_{509} = 2590^\circ$; $\alpha_{510} = 2595^\circ$; $\alpha_{511} = 2600^\circ$; $\alpha_{512} = 2605^\circ$; $\alpha_{513} = 2610^\circ$; $\alpha_{514} = 2615^\circ$; $\alpha_{515} = 2620^\circ$; $\alpha_{516} = 2625^\circ$; $\alpha_{517} = 2630^\circ$; $\alpha_{518} = 2635^\circ$; $\alpha_{519} = 2640^\circ$; $\alpha_{520} = 2645^\circ$; $\alpha_{521} = 2650^\circ$; $\alpha_{522} = 2655^\circ$; $\alpha_{523} = 2660^\circ$; $\alpha_{524} = 2665^\circ$; $\alpha_{525} = 2670^\circ$; $\alpha_{526} = 2675^\circ$; $\alpha_{527} = 2680^\circ$; $\alpha_{528} = 2685^\circ$; $\alpha_{529} = 2690^\circ$; $\alpha_{530} = 2695^\circ$; $\alpha_{531} = 2700^\circ$; $\alpha_{532} = 2705^\circ$; $\alpha_{533} = 2710^\circ$; $\alpha_{534} = 2715^\circ$; $\alpha_{535} = 2720^\circ$; $\alpha_{536} = 2725^\circ$; $\alpha_{537} = 2730^\circ$; $\alpha_{538} = 2735^\circ$; $\alpha_{539} = 2740^\circ$; $\alpha_{540} = 2745^\circ$; $\alpha_{541} = 2750^\circ$; $\alpha_{542} = 2755^\circ$; $\alpha_{543} = 2760^\circ$; $\alpha_{544} = 2765^\circ$; $\alpha_{545} = 2770^\circ$; $\alpha_{546} = 2775^\circ$; $\alpha_{547} = 2780^\circ$; $\alpha_{548} = 2785^\circ$; $\alpha_{549} = 2790^\circ$; $\alpha_{550} = 2795^\circ$; $\alpha_{551} = 2800^\circ$; $\alpha_{552} = 2805^\circ$; $\alpha_{553} = 2810^\circ$; $\alpha_{554} = 2815^\circ$; $\alpha_{555} = 2820^\circ$; $\alpha_{556} = 2825^\circ$; $\alpha_{557} = 2830^\circ$; $\alpha_{558} = 2835^\circ$; $\alpha_{559} = 2840^\circ$; $\alpha_{560} = 2845^\circ$; $\alpha_{561} = 2850^\circ$; $\alpha_{562} = 2855^\circ$; $\alpha_{563} = 2860^\circ$; $\alpha_{564} = 2865^\circ$; $\alpha_{565} = 2870^\circ$; $\alpha_{566} = 2875^\circ$; $\alpha_{567} = 2880^\circ$; $\alpha_{568} = 2885^\circ$; $\alpha_{569} = 2890^\circ$; $\alpha_{570} = 2895^\circ$; $\alpha_{571} = 2900^\circ$; $\alpha_{572} = 2905^\circ$; $\alpha_{573} = 2910^\circ$; $\alpha_{574} = 2915^\circ$; $\alpha_{575} = 2920^\circ$; $\alpha_{576} = 2925^\circ$; $\alpha_{577} = 2930^\circ$; $\alpha_{578} = 2935^\circ$; $\alpha_{579} = 2940^\circ$; $\alpha_{580} = 2945^\circ$; $\alpha_{581} = 2950^\circ$; $\alpha_{582} = 2955^\circ$; α_{5

K_0 и прозвучивании соединений многократно отраженным лучом уменьшение чувствительности может быть весьма существенным. На рис. 109 показаны зависимости ослабления амплитуды эхо-сигнала, характеризующие собой чувствительность контроля, от количества отражений вследствие смачивания поверхности металла слоем масла (контактный вариант) или погружения ее в воду (иммерсионный вариант), рассчитанные по соотношению (118) для значений коэффициента $K_{0\text{эксп}}$, измеренных экспериментально. Как это видно из рис. 109, потери чувствительности, связанные с контактированием поверхностей металла с жидкостью, зависят от способа ввода колебаний (контактный или иммерсионный); они возрастают с увеличением числа отражений и практически могут достигать 50—80%.

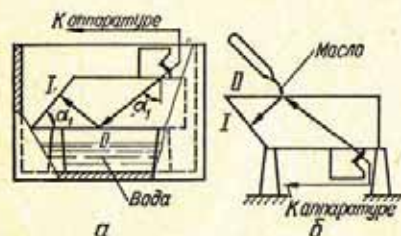


Рис. 108. Схемы измерения коэффициента потери чувствительности.

При сравнении чувствительности контроля при контактном и иммерсионном способах ввода колебаний в металл видно, что чувствительность контроля наклонным искателем по необработанной поверхности проката практически не зависит от способа ввода колебаний, если прозвучивание ведется прямым лучом. При прозвучивании многократно отраженным лучом чувствительность контроля при иммерсионном способе ввода колебаний будет значительно ниже, чем при контактном способе, если в последнем случае поверхности металла покрыты слоем контактирующей жидкости только в зоне переме-

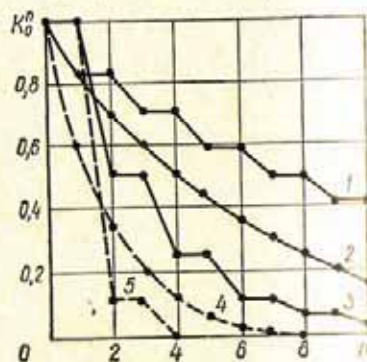


Рис. 109. Расчетные зависимости коэффициента потери чувствительности K_0^n от количества отражений n :

1, 2, 3 — сталь соответственно в воде одна поверхность, две поверхности, контактная поверхность, покрытая слоем масла; 4, 5 — дюралюминий соответственно в воде две поверхности, контактная поверхность, покрытая слоем масла.

щения искателя. Если же эти поверхности покрыты слоем жидкости вне зоны перемещения искателя, а толщина слоя меньше длины пакета ультразвукового импульса, то чувствительность контроля при контактном способе ввода колебаний может оказаться ниже чувствительности контроля при иммерсионном способе. В связи с этим для получения возможно большей чувствительности и повышения ее стабильности при контроле сварных соединений необходимо освобождать от жидкости на время контроля наполненные резервуары и трубы, удалять слой контактирующей жидкости с поверхности, по которой не перемещается искатель, а при иммерсионном способе ввода колебаний и прозвучивании многократно отраженным лучом искатель размещать в локальной ванне с минимально возможной площадью поверхности, контактирующей с металлом.

При любом способе ввода колебаний чувствительность контроля определяется состоянием поверхности металла, через которую вводится ультразвук. Измерения показывают, что чувствительность при работе наклонным искателем по поверхности проката может составлять 50—80% чувствительности при работе по поверхности, предварительно обработанной по шестому классу чистоты [32, 193]. В то же время грубая механическая обработка прокатанной поверхности, например вручную с помощью наждачного круга, может значительно ухудшить акустический контакт.

При одном и том же состоянии контактной поверхности коэффициент прозрачности границы призмы искателя с контролируемым металлом определяется соотношением скоростей ультразвуковых волн в материале призмы и в контролируемом металле (см. гл. I). Скорость ультразвука в органическом стекле, из которого изготовляют призмы, существенно зависит от температуры [32], в то время, как скорость в металле при изменении температуры в пределах до 100° С практически остается постоянной [110]. В связи с этим температура, при которой ведется контроль, влияет на коэффициент прозрачности границы искатель — металл и угол ввода луча в металл. Увеличение температуры, как правило, сопровождается уменьшением коэффициента прозрачности и возрастанием угла ввода луча. При этом также повышается коэффициент затухания ультразвука в призме искателя. Все это приводит к тому, что с увеличением температуры чувствительность контроля падает. Зависимость чувствительности от температуры тем выше, чем больше

Обычно диаграммы направленности рассчитывают для случая непрерывного излучения упругой волны [63], однако искажением диаграммы направленности из-за импульсного характера излучения можно пренебречь, если число колебаний в импульсе превышает пять [109].

Направленность поля искателя может быть несколько повышена путем применения кольцевых преобразователей [81, 95]. Одним из путей дальнейшего обострения диаграмм направленности является использование раздельно-совмещенных искателей [67, 94].

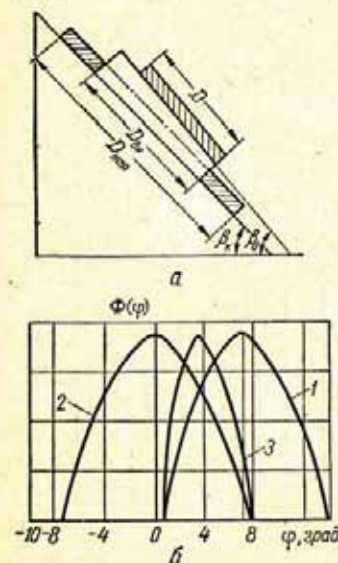


Рис. 114. Расчетная схема раздельно-совмещенного искателя (а) и характеристики направленности в стали (основной лепесток) (б):

1 — дисковый преобразователь ($D=12$ мм, $f=2,5$ МГц, $\beta_d=46^\circ$); 2 — кольцевой пьезопреобразователь ($f=2,5$ МГц, $D_{\text{вн}}=18$ мм, $D_{\text{вн}}=14$ мм, $\beta_k=42^\circ$); 3 — раздельно-совмещенный искатель.

для излучающего и приемного преобразователей, которые можно подобрать так, что пьезоконстанты каждого из преобразователей будут иметь максимально возможное значение.

Решение практических задач дефектоскопии часто приводит к необходимости дифференцирования и интегриро-

вания функций, описывающих диаграмму направленности наклонных искателей. В связи с этим известное выражение [63] для диаграммы направленности целесообразно аппроксимировать более простой функцией.

Для аппроксимации этого выражения в рабочей области основного лепестка диаграммы направленности воспользуемся выражением, применяемым в радиолокации для аппроксимации диаграмм направленности антенн:

$$\Phi_a(\varphi) \approx \cos^n(M\varphi), \quad (122)$$

где M — коэффициент масштаба; $\varphi = \alpha - \alpha_0$ — текущее значение угла.

Величина масштабного коэффициента M выбирается на определенной ширине φ_0 диаграммы направленности, соответствующей заданному уровню $\Phi_a(\varphi_0)$. Если учесть, что рабочей областью диаграммы является часть ее вблизи максимума и при наличии отсечки в приемном тракте дефектоскопа уменьшение входного сигнала до 0,8 своей максимальной величины приводит к снижению выходного сигнала до уровня примерно 0,5, то целесообразно принять

$$\Phi_a(\varphi_0) = 0,8.$$

Тогда

$$\Phi_a(\varphi_0) = \cos^n(M\varphi_0) = 0,8,$$

откуда

$$M = \frac{1}{\varphi_0} \arccos \sqrt[n]{0,8}.$$

При этом выражение (122) примет вид

$$\Phi_a(\varphi) \approx \cos^n \left[\frac{\arccos \sqrt[n]{0,8}}{\varphi_0} \varphi \right], \quad (123)$$

где φ_0 — раскрытие половины основного лепестка диаграммы на уровне 0,8.

Из-за несимметричности основного лепестка при аппроксимации диаграммы выражением (123) следует для каждой половины лепестка брать соответствующие значения φ'_0 и φ''_0 (см. рис. 112) или же, если допустима меньшая точность аппроксимации, принимать

$$|\varphi_0| \approx \frac{|\varphi'_0| + |\varphi''_0|}{2}.$$

Показатель n выбираем из условия наилучшего приближения функции $\Phi_a(\varphi)$ к расчетной $\Phi_r(\varphi)$ в интервале

— $\varphi_0 \leq \varphi \leq +\varphi_0$. Для определения показателя $n = n_0$, соответствующего наилучшему приближению функций $\Phi_a(\varphi)$ и $\Phi_r(\varphi)$ в отдельных точках, удобно воспользоваться способом наименьших квадратов. По этому способу функция $\Phi_a(\varphi)$ при данном значении $n = n_0$ будет наилучшим приближением к $\Phi_r(\varphi)$, если при данном показателе n_0 для нее $S = \sum [\Phi_r(\varphi) - \Phi_a(\varphi)]^2$ имеет наименьшее значение. Расчеты величины S для $n = 1, 2$ и 3 показывают, что наилучшее приближение обеспечивается при $n_0 = 1$.

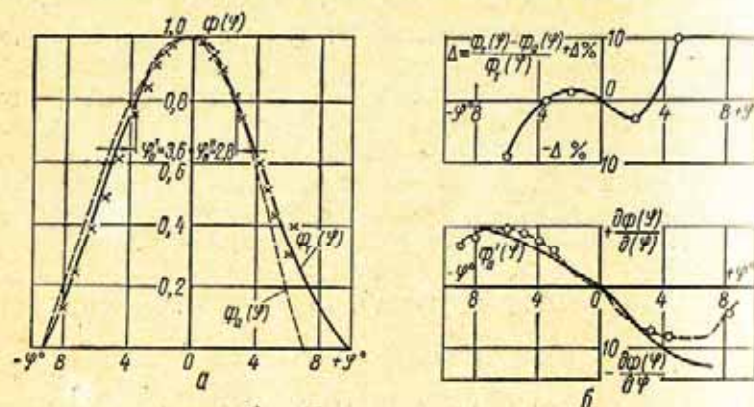


Рис. 115. Диаграммы направленности наклонного излучателя ($\beta = 40^\circ$, $af = 15$ мм/МГц).

Тогда выражение (123), аппроксимирующее рабочую часть основного лепестка диаграммы направленности наклонного излучателя с дисковым излучателем, примет вид

$$\Phi_a(\varphi) \approx \cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \varphi\right). \quad (124)$$

На рис. 115, а в качестве примера показаны диаграммы направленности типового наклонного излучателя с призмой из органического стекла ($\beta = 40^\circ$, $f = 2,5$ МГц, $a = 6$ мм). Диаграмма $\Phi_r(\varphi)$ рассчитана по выражению, полученному Д. Б. Диановым [63], а $\Phi_a(\varphi)$ — по аппроксимирующему выражению (124). На рис. 115, б приведены зависимости, характеризующие погрешность аппроксимации. Видно, что максимальная относительная величина отклонения аппроксимирующей функции $\Phi_a(\varphi)$ от расчетной $\Phi_r(\varphi)$ в установленном интервале углов φ не превышает 3%, а абсолютные

значения первых производных обеих функций практически совпадают. Если учесть, что неравномерность акустического контакта при прозвучивании соединений через поверхность проката приводит к изменению амплитуды эхо-сигналов на 1–3 дБ, то достигнутую точность аппроксимации можно считать вполне достаточной.

Получив выражение (124), аппроксимирующее диаграмму направленности излучателя с дисковым излучателем, можно вывести соотношение, описывающее диаграмму направленности излучателя с кольцевым преобразователем [95]. Кольцевой преобразователь можно представить в виде дискового площадью S_1 , из которого выделен второй дисковый преобразователь площадью S_2 . Тогда в соответствии с принципом суперпозиции можно считать, что амплитуда поля в любой точке в дальней зоне излучателя будет определяться разностью амплитуд, создаваемых каждым из преобразователей.

Обозначив отношение площадей дисков $\kappa = \frac{S_2}{S_1}$, примерно равное отношению максимальных значений амплитуд поля, можно записать результирующую амплитуду в виде

$$\cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_{01}} \varphi\right) - \kappa \cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_{02}} \varphi\right),$$

где φ_{01} , φ_{02} — половина угла раскрытия основного лепестка характеристики направленности на уровне 0,8 соответственно для наружного и внутреннего дисков.

Переходя к относительным величинам, получим в тех же координатах выражение для характеристики направленности наклонного излучателя с кольцевым преобразователем:

$$\Phi_n(\varphi) \approx \frac{\cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_{01}} \varphi\right) - \kappa \cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_{02}} \varphi\right)}{1 - \kappa}. \quad (125)$$

Значения углов φ_0 , необходимые для аппроксимации диаграмм направленности наклонных излучателей, могут быть определены из рис. 111, 112 или измерены экспериментально.

Экспериментальное исследование диаграммы направленности представляет определенный практический интерес, так как позволяет наиболее полно изучить направленность

поля, создаваемого искателем, с учетом импульсного характера излучения и неоднородности преобразователя.

В основу определения диаграммы направленности наклонного искателя $\Phi(\alpha)$ может быть положено измерение огибающей последовательности эхо-сигналов, отраженных от искусственного отражателя с круговой индикатрисой рассеяния падающей на него волны. Таким отражателем является сфера. В связи со сложностью выполнения сферического отражателя в практике дефектоскопии вместо сферы можно использовать цилиндрический отражатель (боковое отверстие). Амплитуда эхо-сигнала от этого отражателя будет тем меньше, чем больше расстояние от излучателя до отражателя. Зависимость амплитуды от расстояния r до отражателя в первом приближении описывается функцией $\frac{1}{r^n} e^{-2\delta r}$, где n — показатель, определяемый формой и размерами отражающей поверхности (для сферы $n = 2$, для цилиндра $n = 1,5$); δ — коэффициент затухания. Расстояние от отражателя до мнимого центра излучения искателя является функцией угла α , под которым озвучивается отражатель (рис. 116, а). Кроме того, амплитуда эхо-сигнала зависит от угла между акустической осью искателя и направлением озвучивания отражателя и тем меньше, чем больше этот угол. Если учесть, что искатель в режиме приема имеет такую же направленность как и в режиме излучения, то зависимость амплитуды эхо-сигнала от угла α озвучивания отражателя выразится функцией $\Phi^2(\alpha)$. Тогда закон изменения амплитуды эхо-сигнала от сферы (цилиндра) на входе приемного тракта дефектоскопа при перемещении искателя, т. е. огибающая последовательности эхо-сигналов, определяемая в основном диаграммой направленности наклонного искателя $\Phi(\alpha)$, будет описываться выражением

$$U(\alpha) = k\Phi^2(\alpha) \frac{1}{r^n(\alpha)} e^{-2\delta r(\alpha)}, \quad (126)$$

где $U(\alpha)$ — амплитуда эхо-сигнала на входе приемного тракта при озвучивании отражателя под углом преломления α ; k — коэффициент, учитывающий амплитуду зондирующего импульса, чувствительность искателя, размеры отражателя, качество акустического контакта и т. п.

Учитывая, что $\alpha = \arctg \frac{x}{H}$ и $r = \sqrt{H^2 + x^2}$, получаем выражение для огибающей $U(x)$ последовательности эхо-сигналов как функцию расстояния x от отражателя до точки ввода луча (рис. 116, а):

$$U(x) = \Phi_1^2\left(\frac{x}{H}\right) \left[H^2 \left(\frac{x^2}{H^2} + 1 \right) \right]^{-\frac{n}{2}} \exp\left(-2\delta H \sqrt{\frac{x^2}{H^2} + 1}\right). \quad (127)$$

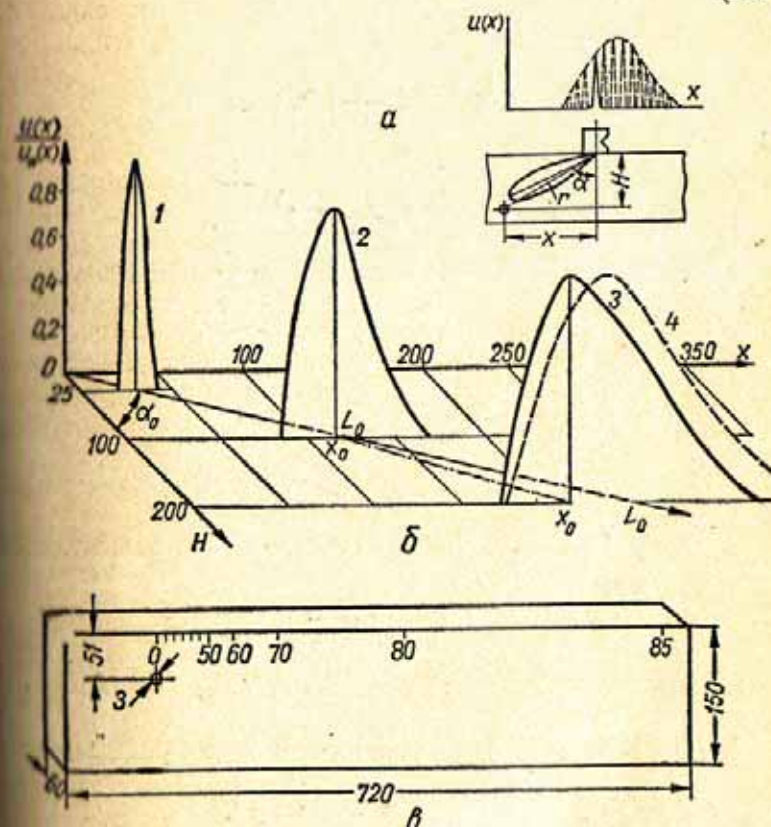


Рис. 116. Схема измерения огибающей последовательности эхо-сигналов (а), огибающие последовательности эхо-сигналов от отражателей, расположенных на глубине $H = 25; 100; 200$ мм (б) и образец для измерения диаграмм направленности (в): 1, 2, 3 — $\delta = 0,08$ непер/см; 4 — $\delta = 0$.

На рис. 116, б приведены огибающие $\frac{U(x)}{U(x)_{\max}}$ последовательности эхо-сигналов. Расчеты выполнены для типового

искателя с призмой из органического стекла ($\beta = 40^\circ$; $f = 2,5 \text{ МГц}$; $a = 6 \text{ мм}$), диаграмма направленности которого была аппроксимирована выражением (124). Положение максимума огибающих определяется соотношениями $L_0 = H \operatorname{tg} \alpha_0$; $x_0 = H \operatorname{tg} \alpha_1$. Анализируя выражение (127) и рис. 116, б, видим, что при малом затухании ультразвука ($\delta \leq 0,01 \text{ нпер/см}$) и незначительной глубине H залегания отражателя третьим множителем в уравнении (127) можно пренебречь, положив его равным единице. Тогда выражение (127) примет вид

$$U(x) \approx \Phi_1^2\left(\frac{x}{H}\right) \Phi_2(x),$$

где

$$\Phi_2(x) = \left[H^2 \left(\frac{x^2}{H^2} + 1 \right) \right]^{-\frac{n}{2}}.$$

Огибающая $U(x)$ последовательности эхо-сигналов легко может быть определена с помощью дефектоскопа, имеющего аттенуатор, и образца со сферическим (или цилиндрическим) отражателем. Глубина расположения отражателя должна превышать протяженность ближней зоны искателя, которая для типовых искателей с параметром $af \approx 15 \text{ мм} \cdot \text{МГц}$ составляет 20—30 мм.

Для перехода от полученной огибающей $U(x)$ к диаграмме направленности $\Phi(\alpha)$ необходимо:

1) каждое значение $U(x_i)$ разделить на соответствующее значение $\Phi_2(x_i)$, т. е.

$$\frac{U(x_i)}{\Phi_2(x_i)} = \Phi_1^2\left(\frac{x_i}{H}\right);$$

2) извлечь квадратный корень из функции $\Phi_1^2\left(\frac{x_i}{H}\right)$;

3) перевести функцию $\Phi_1\left(\frac{x_i}{H}\right)$ в функцию $\Phi_1(\alpha)$, заменив параметр $\frac{x_i}{H}$ на параметр $\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_i}{H}\right)$;

4) вычислить диаграмму направленности

$$\Phi(\alpha) = \frac{\Phi_1(\alpha)}{\Phi_{1\max}(\alpha)}.$$

Процесс определения диаграмм направленности может быть несколько упрощен, если использовать тест-образец, на котором заранее нанесена шкала, проградуированная

и значениях угла α преломления луча (рис. 116, в). В этом случае будем измерять непосредственно огибающую $U(\alpha)$ как функцию угла преломления. Умножив эту огибающую на функцию $\Phi_2(\alpha) = \left(\frac{H}{\cos \alpha}\right)^n$, получим результирующую диаграмму направленности $\Phi_1^2(\alpha)$. Для перехода к диаграмме направленности следует рассчитать функцию

$$\Phi(\alpha) = \sqrt{\frac{\Phi_1^2(\alpha)}{\Phi_{1\max}^2(\alpha)}}.$$

При соблюдении постоянства акустического контакта в процессе измерения огибающих последовательности эхо-сигналов и малом интервале измерений ($\Delta x = 1 \text{ мм}$) предложенная методика дает весьма удовлетворительную воспроизводимость (см. рис. 115). Для измерения диаграмм направленности наклонных искателей могут быть применены электромагнитоакустические преобразователи [205].

В практике контроля сварных соединений в ряде случаев достаточно знать границы ультразвукового пучка не только в дальней, но и в ближней зонах. Принято границей пучка считать поверхность конуса, на которой эхо-сигнал от небольшого отражателя будет иметь амплитуду на 20 дБ ниже, чем от того же отражателя, расположенного на акустической оси искателя [122, 194]. Для определения границ пучка Международным институтом сварки (МИС) разработан специальный блок калибровки пучка, изготавливаемый из стали [194].

Диаграммы направленности рассчитывают без учета затухания упругих колебаний в исследуемой среде. В то же время при работе наклонными искателями затухание приводит к кажущемуся искривлению оси диаграммы направленности наклонных искателей [38].

При значительном затухании колебаний на пути их распространения от искателя до отражателя (дефекта) величина угла ввода луча α_1 , соответствующего максимальной амплитуде эхо-сигнала, оказывается существенно меньше величины угла наклона акустической оси искателя α_0 (рис. 117). Объясняется это тем, что при смещении отражателя от акустической оси искателя увеличение амплитуды эхо-сигнала за счет снижения потерь на затухание превышает падение амплитуды вследствие направленных свойств искателя [64]. Очевидно, что чем

меньше направленность поля искателя и чем больше затухание, тем значительнее отклонение угла α_1 от α_0 .

Для определения величины угла α_1 ввода луча с учетом затухания рассмотрим уравнение (126) огибающей последовательности амплитуд $U(\alpha)$ эхо-сигналов, получаемой при озвучивании сферического или цилиндрического отражателя. Учитывая, что $r(\alpha) = \frac{H}{\cos \alpha}$, из уравнения (126) получаем

$$U(\alpha) = k\phi^2(\alpha) \frac{\cos^n \alpha}{H^n} e^{\frac{-2\delta H}{\cos \alpha}}. \quad (128)$$

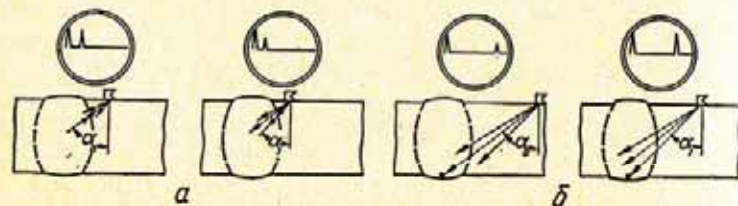


Рис. 117. Особенность выявления дефектов при незначительном (а) и большом (б) затухании ультразвука на пути к дефекту.

Значение угла α_1 ввода луча как угла, соответствующего максимуму функции $U(\alpha)$, можно рассчитать из условия

$$\frac{\partial U(\alpha_1)}{\partial \alpha} = 0. \quad (129)$$

Из выражений (128) и (129) получим [38]:

$$\frac{\frac{\partial \phi(\alpha_1)}{\partial \alpha}}{\phi(\alpha_1)} = \left(\frac{n}{2} + \frac{\delta H}{\cos \alpha_1} \right) \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (130)$$

Уравнение (130) позволяет рассчитать значения угла α_1 ввода луча. Левая часть уравнения определяется направленностью поля искателя, а правая — затуханием ультразвука в контролируемом металле и конфигурацией выявляемого дефекта.

Если учесть, что $\alpha_1 < \alpha_0$ и $\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\cos \alpha_1}$ возрастают с увеличением α_1 , то из анализа уравнения (130) видно, что отклонение угла α_1 ввода луча от угла α_0 тем значительнее, чем меньше направленность поля искателя, больше угол α_0

наклона оси диаграммы и выше затухание (δH) ультразвука при распространении его в металле. При отсутствии затухания ($\delta H = 0$) угол α_1 ввода луча также будет меньше угла α_0 наклона оси диаграммы направленности.

Для количественной оценки зависимости угла α_1 ввода луча от перечисленных выше факторов воспользуемся выражением (124), аппроксимирующим диаграмму направленности наклонного искателя.

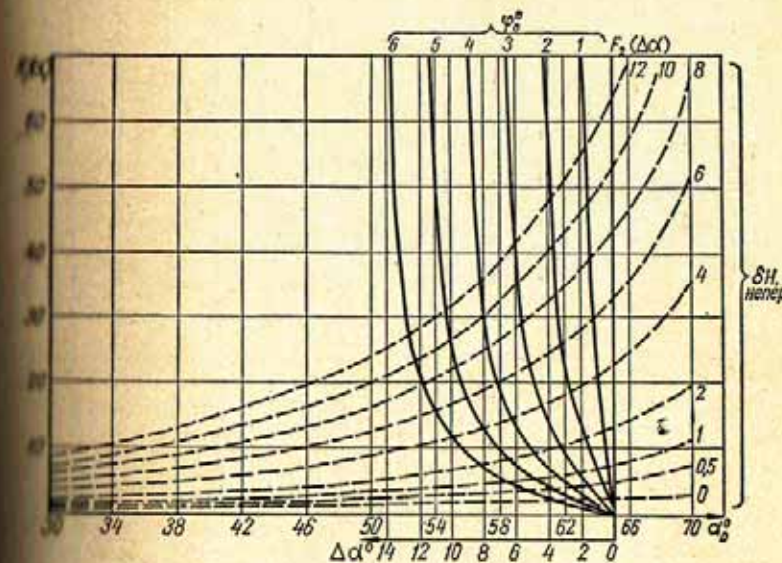


Рис. 118. Номограмма для расчета угла ввода луча с учетом затухания.

Обозначив $\alpha_0 - \alpha_1$ через $\Delta\alpha$, из выражения (130) с учетом (124) находим

$$\frac{\pi}{5\varphi_0} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \Delta\alpha \right) = \left(\frac{n}{2} + \frac{\delta H}{\cos \alpha_1} \right) \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (131)$$

Уравнение (131) может быть решено графически построением функций обеих частей равенства.

Графическое решение уравнения (131) для случая выявления дефектов округлой формы ($n = 2$) представлено на рис. 118. Здесь изображено два семейства кривых: одно (штриховые линии) отображает функцию $F_1(\alpha_1) = \left(1 + \right.$

$+ \frac{\delta H}{\cos \alpha_1} \operatorname{tg} \alpha_1$ для значений параметра $\delta H = 0 \div 12$ *непер*, охватывающих все возможные в ультразвуковой дефектоскопии случаи, а второе семейство $F_2(\Delta\alpha) = \frac{\pi}{5\varphi_0} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \Delta\alpha \right)$ для искателей с углом раскрытия основного лепестка диаграммы направленности $\varphi_0 = 1 \div 6^\circ$, т. е. практически для всех

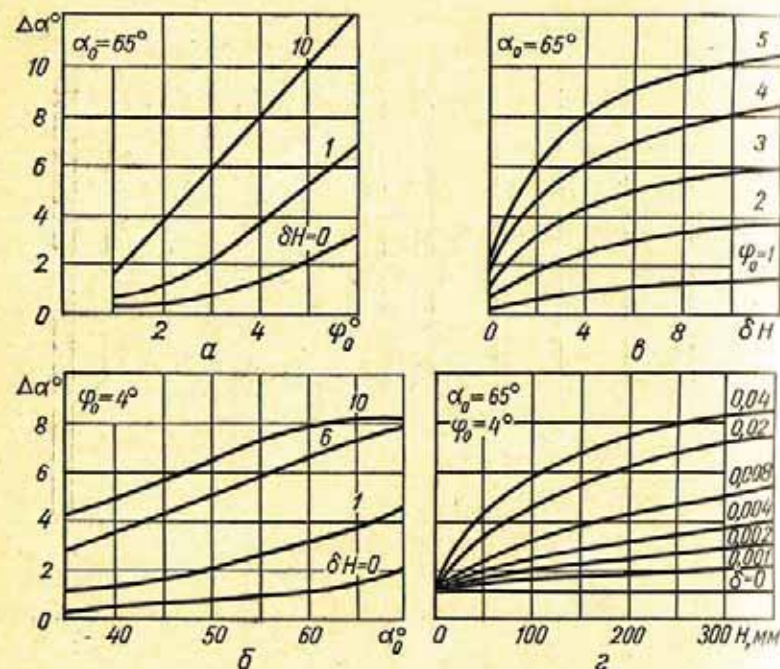


Рис. 119. Зависимости величины отклонения $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_1$ от угла φ_0 раскрытия основного лепестка диаграммы (а), угла α_0 наклона ее оси (б), затухания ультразвука δH (в) и глубины H залегания дефекта (г).

стандартных искателей. Корни уравнения (131) соответствуют точкам пересечения кривых $F_1(\alpha_1)$ с кривыми $F_2(\Delta\alpha)$ при совмещении начала координат семейства кривых $F_2(\Delta\alpha)$ с точкой $\alpha_1 = \alpha_0$ на оси абсцисс.

В результате решения уравнения (131) получены данные, характеризующие связь величины отклонения $\Delta\alpha$ угла α_1 ввода луча от ожидаемого значения α_0 с шири-

ной φ_0 диаграммы направленности (рис. 119, а), углом α_0 наклона оси диаграммы (рис. 119, б), затуханием δH ультразвука (рис. 119, в) и с глубиной H залегания отражателя (рис. 119, г).

Из рис. 119 видно, что отклонение $\Delta\alpha$ угла α_1 от угла α_0 почти прямо пропорционально величине α_0 и углу раскрытия основного лепестка диаграммы на уровне 0,8. Оно тем больше, чем больше затухание ультразвука на пути его от излучателя до дефекта (рис. 119, в, г). Для типовых искателей, у которых угол раскрытия диаграммы $\varphi_0 \approx 3 \div 4^\circ$, величина отклонения $\Delta\alpha$ угла ввода луча в зависимости от затухания ультразвука может достигать нескольких градусов.

Уменьшение угла ввода луча с увеличением глубины расположения отражателя создает представление о квазинискривлении диаграммы направленности наклонного искателя при контроле металлов с большим коэффициентом затухания (рис. 120). При малом затухании ультразвука ($\delta H < 0,2$ *непер*) величина отклонения $\Delta\alpha$ не превышает 2° и практически не зависит от глубины расположения отражателя (дефекта).

Результаты расчета проверяли на образце из органического стекла, в котором на различной глубине H были выполнены цилиндрические отверстия диаметром 6 мм. Применение органического стекла, имеющего при частоте $f = 1,8$ МГц коэффициент затухания $\delta \approx 0,035$ *непер/мм*, позволило измерить углы α_1 ввода луча при затухании ультразвука δH от 0,24 до 2,6 *непер*.

Для исследований был изготовлен специальный искатель с углом призмы $\beta = \alpha_0 = 65^\circ$. Диаметр $2a = 8,8$ мм преобразователя был рассчитан так, чтобы обеспечить раскрытие основного лепестка диаграммы на уровне 0,8, равное $\varphi = 4^\circ$. Результаты эксперимента приведены в табл. 10 в сравнении с расчетными данными. Из таблицы видно, что данные измерений хорошо согласуются с теоретическими и подтверждают возможность использования предложенной номограммы для определения угла ввода

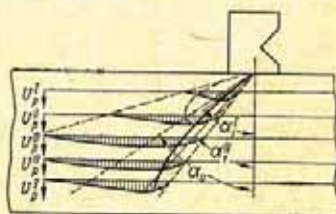


Рис. 120. Квазинискривление диаграммы направленности наклонного искателя:

$U_p^I - U_p^V$ — нормированные огибающие последовательности эхосигналов от отражателей на различной глубине.

Таблица 10

Результаты исследований квазискривления
ультразвукового луча [38]

$H, \text{ мм}$	$zH, \text{ нпер}$	α_1 (эксп.)	$\Delta\alpha_{\text{эксп}} = \alpha_1 - 65^\circ$	$\Delta\alpha_{\text{расч}}$
8,5	0,24	63°	2°	2°
28	0,98	$61^\circ 40'$	$3^\circ 20'$	$3^\circ 24'$
49	1,71	$61^\circ 15'$	$3^\circ 45'$	$4^\circ 20'$
73	2,60	58°	7°	$5^\circ 10'$

луча в металл по известному коэффициенту затухания ультразвука и диаграмме направленности искателя.

Для удобства пользования номограмма нанесена на универсальную координатную линейку УКЛ-1 (см. рис. 70).

Все вышеизложенное указывает на необходимость введения следующих понятий [35]:

угол ввода луча α_1 ;

угол наклона акустической оси искателя α_0 ;

угол преломления по Снеллиусу α_c .

Между этими углами всегда соблюдаются неравенства:

$$\alpha_1 < \alpha_0 \text{ при } \alpha_0 > 0;$$

$$\alpha_0 > \alpha_c \text{ при } \alpha_c < \alpha_{cm};$$

$$\alpha_0 = \alpha_c \text{ при } \alpha_c \approx \alpha_{cm};$$

$$\alpha_0 < \alpha_c \text{ при } \alpha_c > \alpha_{cm},$$

где α_{cm} — угол преломления, рассчитанный по уравнению Снеллиуса и соответствующий максимальному коэффициенту прозрачности при трансформации продольной волны в поперечную на границе искателя с металлом.

5. УГОЛ ВВОДА ЛУЧА

Под углом ввода луча α_1 следует понимать угол между нормалью к поверхности изделия, проходящей через точку ввода луча, и линией, соединяющей центр отражателя с круговой индикатрисой рассеяния и точку

ввода луча при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отражателя максимальна.

При контроле сварных соединений пределы перемещения искателя и глубину расположения выявленных дефектов определяют, исходя из соответствия истинного угла α_1 ввода луча расчетному значению α_{10} . Полагая, что в большинстве случаев $\alpha_{10} \approx \alpha_0$, необходимый угол β_0 призмы, при котором обеспечивается ввод ультразвуковой волны в металл под заданным углом α_{10} , может быть определен по графикам, приведенным на рис. 113, или для искателей с параметром $af \geq 15 \text{ мм МГц}$ рассчитан по выражению Снеллиуса

$$\beta_0 \approx \arcsin \left(\frac{C_{t_1}}{C_{t_2}} \sin \alpha_{10} \right). \quad (132)$$

Следует отметить, что прослойка контактирующей среды не оказывает влияния на геометрию распространения ультразвукового луча в контролируемом металле, если плоскость призмы, через которую выходит ультразвуковой луч, параллельна поверхности металла [32]. Однако даже при правильно выбранном угле призмы β_0 в процессе контроля возможны отклонения величины истинного угла ввода луча α_1 в металл от расчетной величины α_{10} . Отклонения угла ввода луча в металл могут быть вызваны изменением:

угла призмы вследствие ее истирания (рис. 121,а); положения призмы, приводящим к непараллельности ее рабочей плоскости и поверхности металла (рис. 121,б); скоростей распространения ультразвуковых колебаний вследствие понижения или повышения температуры призмы искателя и металла.

Угол ввода луча α_1 связан с углом призмы β_0 и углом $\Delta\beta$ истирания ее соотношением, вытекающим из уравнения (132),

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \pm \Delta\alpha = \arcsin \left[\frac{C_{t_2}}{C_{t_1}} \sin (\beta_0 \pm \Delta\beta) \right]. \quad (133)$$

Полагая, что в процессе дефектоскопии угол истирания призмы не превышает 2° ($|\Delta\beta| \leq 2^\circ$) и принимая в соответствии с этим $\cos \Delta\beta \approx 1$; $\sin \Delta\beta \approx \Delta\beta$; $\cos \Delta\alpha \approx 1$; $\sin \Delta\alpha \approx \Delta\alpha$, после некоторых преобразований выражения (133), получим

$$\Delta\alpha \approx \Delta\beta \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \beta_0}{\left(\frac{C_{I_1}}{C_{I_2}}\right)^2 - \sin^2 \beta_0}}. \quad (134)$$

Из уравнения (134) следует, что изменение угла ввода луча в металл из-за истирания призмы тем больше, чем больше угол ввода луча.

Для случая контроля соединений из стали типовым искателем с углом призмы $\beta = 50^\circ$ выражение (134) принимает вид

$$\Delta\alpha \approx 2,2\Delta\beta. \quad (135)$$

На рис. 121 приведены зависимости отклонения угла ввода луча в сталь от угла истирания $\Delta\beta$, рассчитанные по выражению (135).

Максимальная погрешность уравнений (134) и (135) при $|\Delta\beta| \leq 2^\circ$ и $\beta_0 \leq 50^\circ$ не превышает 5%. При $\beta_0 > 50^\circ$ приращение $\Delta\alpha$ угла ввода луча вследствие изменения угла β следует определять по графикам, приведенным на рис. 113.

Если плоскость основания призмы не параллельна поверхности металла, то угол ввода луча зависит от акустических свойств контактирующей среды и величины угла Θ между плоскостью призмы и поверхностью металла (рис. 121, б).

Из рис. 121, б следует:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{C_{I_2}}{C_{\text{ж}}} \sin \beta_{\text{ж}}\right); \quad (136)$$

$$\beta_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}} \pm \Theta; \quad (137)$$

$$\sin \alpha_{\text{ж}} = \frac{C_{\text{ж}}}{C_{I_1}} \sin \beta_0. \quad (138)$$

Подставляя выражения (137) и (138) в (136) и выполнив некоторые преобразования, получаем

$$\alpha_1 = \arcsin\left[\frac{C_{I_2}}{C_{\text{ж}}}\left(\frac{C_{\text{ж}}}{C_{I_1}} \sin \beta_0 \cos \Theta \pm \sin \Theta \sqrt{1 - \left(\frac{C_{\text{ж}}}{C_{I_1}} \sin \beta_0\right)^2}\right)\right]. \quad (139)$$

Предполагая, что непараллельность будет малой ($\Theta < 2^\circ$), с погрешностью, не превышающей 5%, можно заменить формулу (139) выражением

$$\Delta\alpha \approx \Theta \sqrt{\frac{\left(\frac{C_{I_1}}{C_{\text{ж}}}\right)^2 - \sin^2 \beta_0}{\left(\frac{C_{I_1}}{C_{I_2}}\right)^2 - \sin^2 \beta_0}}. \quad (140)$$

Из уравнения (140) следует, что изменение угла ввода луча в металл из-за наклона призмы тем больше, чем больше угол ввода луча. Для случая ввода колебаний в сталь через воду с помощью искателя с углом $\beta_0 = 50^\circ$ выражение (140) примет вид

$$\Delta\alpha \approx 5,4\Theta. \quad (141)$$

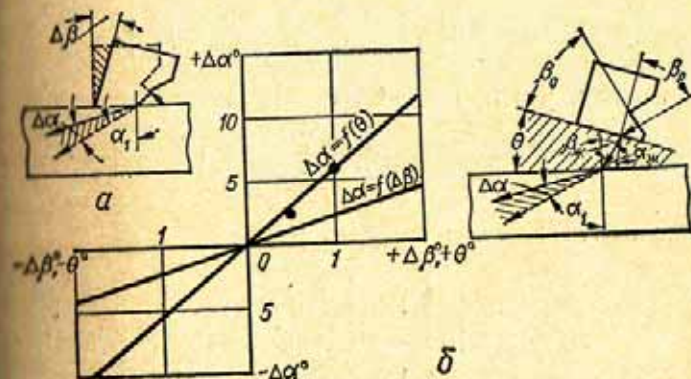


Рис. 121. Расчетные зависимости приращения $\Delta\alpha$ угла ввода ультразвукового луча в сталь от угла $\Delta\beta$ износа призмы и угла ее подъема ($\beta_0 = 50^\circ$); точки — данные эксперимента.

На рис. 121 показана зависимость приращения угла ввода луча в сталь от угла подъема призмы искателя с углом $\beta_0 = 50^\circ$, рассчитанная по соотношению (141).

Из выражений (135) и (141), а также из рис. 121 следует, что приращение угла ввода луча, вызываемое подъемом призмы на 1° , значительно превосходит приращение того же угла при износе призмы на 1° . Если принять допустимым отклонение угла ввода луча $\Delta\alpha \leq 2^\circ$, то при контроле типовым искателем с углом призмы $\beta_0 = 50^\circ$ износ призмы не должен превышать величины $\Delta\beta \approx 1^\circ$, а подъем $\Theta = 0,4^\circ$.

Изменения угла ввода луча в металл, обусловленные зависимостью скоростей распространения ультразвука от температуры, могут быть определены из уравнения (133).

Пусть C_{t_0}' — скорость распространения поперечной волны в металле при температуре t_0 ; C_{t_0}' — то же, продольной волны в материале призмы при температуре t_0 ; ΔC_{t_2} — температурный коэффициент скорости поперечной волны в металле; ΔC_{t_1} — то же, продольной волны в материале призмы.

Тогда скорости распространения ультразвука в призме C_{t_1} и металле C_{t_2} при любой температуре t : $C_{t_1} = C_{t_0}' + \Delta C_{t_1}(t - t_0)$; $C_{t_2} = C_{t_0}' + \Delta C_{t_2}(t - t_0)$.

Подставляя значения C_{t_1} и C_{t_2} в уравнение (133), получаем выражение для расчета угла α_{1t} ввода луча в металл при температуре t :

$$\alpha_{1t} = \arcsin \left[\frac{C_{t_2}' + \Delta C_{t_2}(t - t_0)}{C_{t_1}' + \Delta C_{t_1}(t - t_0)} \sin \beta_0 \right]. \quad (142)$$

Учитывая, что при $t = t_0$ угол ввода луча

$$\alpha_{10} = \arcsin \left(\frac{C_{t_2}'}{C_{t_1}'} \sin \beta_0 \right),$$

выражение (142) можно записать в виде

$$\alpha_{1t} = \arcsin \left[\frac{1 + \frac{\Delta C_{t_2}}{C_{t_1}'}(t - t_0)}{1 + \frac{\Delta C_{t_1}}{C_{t_1}'}(t - t_0)} \sin \alpha_{10} \right]. \quad (143)$$

Температурный коэффициент скорости распространения поперечной волны в металлах в диапазоне температур $t = 0 \div 100^\circ \text{C}$ практически равен нулю [110], т. е. $\Delta C_{t_2} \approx 0$.

Температурный коэффициент скорости распространения продольной волны в органическом стекле при температуре $0-40^\circ \text{C}$ составляет $\Delta C_{t_1} = -3 \text{ м/сек} \cdot \text{град}$. Так как при $t_0 = 20^\circ \text{C}$ $C_{t_1}' = 2670 \text{ м/сек}$, то $C_{t_1}(t) = 2670 - 3(t - t_0) = 2730 - 3t$. Подставив соответствующие значения в формулу (143), получим

$$\alpha_{1t} \approx \arcsin \left[\frac{\sin \alpha_{10}}{1 - 0,00112(t - 20)} \right], \quad (144)$$

где α_{10} — угол ввода луча в металл при температуре призмы $t = t_0 = 20^\circ \text{C}$; α_{1t} — то же, при температуре $t \neq 20^\circ \text{C}$.

Из формулы (144) следует, что изменение угла ввода луча при изменении температуры тем значительнее, чем больше

угол ввода луча. На рис. 122 приведен график зависимости угла ввода луча в сталь от температуры, рассчитанный по формуле (144). На этом же графике точками указаны

измеренные экспериментально. Из рис. 122 видно, что угол ввода луча может подвергаться серьезным изменениям при понижении или повышении температуры призмы. В связи с этим необходимо знать возможную величину $\Delta \alpha_t$ отклонения угла ввода луча, связанного с изменением температуры, при которой ведется контроль.

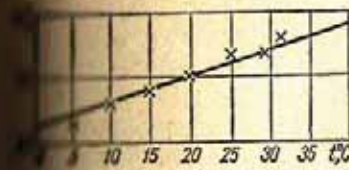


Рис. 122. Расчетная зависимость угла ввода луча от температуры $t, ^\circ \text{C}$ (искатель с углом $\alpha_{10} = 70^\circ$).

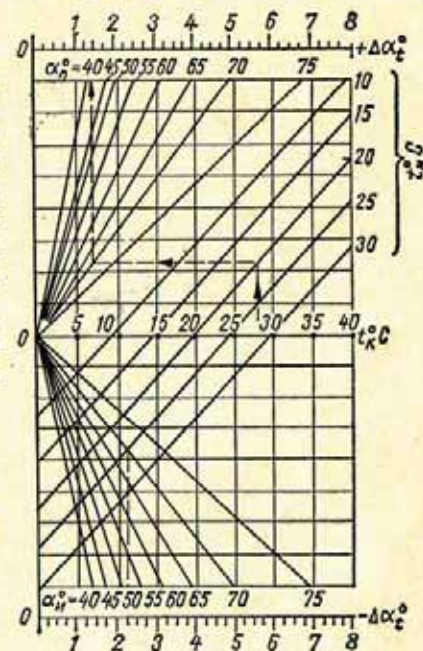


Рис. 123. Номограмма для определения величины $\Delta \alpha_t$ отклонения истинного значения угла ввода луча от значения α_{10} в зависимости от температуры $t_K, ^\circ \text{C}$.

Пусть α_{1n} — угол ввода луча, величина которого известна; t_n — температура, при которой угол ввода луча составляет α_{1n} ; t_K — температура, при которой ведется контроль, $t_K \neq t_n$; α_{1n} — угол ввода луча при температуре t_n , равный $\alpha_{1n} \pm \Delta \alpha_t$.

Тогда, согласно уравнению (144), имеем

$$\sin \alpha_{1n} = \frac{1}{1 - 0,00112(t_n - 20)} \sin \alpha_{10}; \quad (145)$$

$$\sin(\alpha_{1n} \pm \Delta \alpha_t) = \frac{1}{1 - 0,00112(t_K - 20)} \sin \alpha_{10}. \quad (146)$$

Полагая $\Delta\alpha_i \leq 6^\circ$ и принимая, что $\sin \Delta\alpha_i \approx \Delta\alpha_i$, после некоторых преобразований выражений (145) и (146) получаем

$$\Delta\alpha_i \approx 57 \left[\frac{1 - 0,00112(t_n - 20)}{1 - 0,00112(t_k - 20)} - 1 \right] \text{tg } \alpha_{1n}. \quad (147)$$

На рис. 123 приведена номограмма, рассчитанная по формуле (147), позволяющая определять приращение $\Delta\alpha_i$ угла ввода луча при изменении температуры от величины t_n , соответствующей углу ввода луча α_{1n} , до величины t_k . Следует подчеркнуть, что как номограмма, так и выражения (144) и (147) справедливы для контроля любых металлов с помощью искателей, призма которых выполнена из органического стекла.

Таким образом, для снижения влияния различных факторов, вызывающих изменение угла ввода луча в металл, на достоверность контроля целесообразно:

осуществлять сканирование наклонным искателем без особого нажима на него с целью уменьшения истирания призмы;

очищать поверхность, по которой будет перемещаться искатель, от брызг металла, грязи и пыли так, чтобы высота отдельных бугорков, отстоящих друг от друга на расстоянии более длины призмы, не превышала среднюю геометрическую величину неровностей поверхности более чем на 0,2 мм;

измерять угол ввода луча в металл при температуре, при которой ведется контроль, или вводить поправку на возможное температурное изменение угла ввода луча, считывая ее по номограмме (рис. 123).

6. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Точность измерения координат отражателей (дефектов) во многом определяет достоверность ультразвукового контроля.

Определение глубины H расположения отражателя с круговой индикатрисой рассеяния и расстояния L от него до точки ввода луча по горизонтали при известных скоростях распространения сдвиговой волны C_s , угле ввода луча α_{10} и акустической задержке в призме искателя t_n осу-

ществляется по методу максимума и сводится к измерению интервала времени T_0 между зондирующим импульсом и эхосигналом от отражателя.

Точность измерения координат во многом определяется соответствием истинных значений T , C_s , t_n и α_{10} значениям T_0 , C_{10} , t_{n0} и α_{10} , принимаемым при расчете координат для глубиномерных устройств по выражениям (25, 26). Отклонения истинных значений этих величин от расчетных приводят к систематическим погрешностям в измерении координат.

Однако, кроме систематических погрешностей, при измерении координат может возникать и случайная, обусловленная неточностью установки искателя в положение, при котором дефект озвучивается под углом α_{10} . Систематическая ошибка может быть учтена, если известна ее относительная величина A . При этом истинное значение координат расположения дефекта определяется из следующих соотношений:

$$H = \frac{H_{гЛ}}{1 + A_{гЛ}}; \quad L = \frac{L_{гЛ}}{1 + A_{гЛ}}. \quad (148)$$

где H и L — истинные значения координат расположения дефекта; $H_{гЛ}$ и $L_{гЛ}$ — измеренные значения координат; $A_{гЛ}$ и $A_{гЛ}$ — суммарная относительная погрешность измерения глубины и расстояния соответственно.

Систематические погрешности следует учитывать, если их величины соизмеримы с величиной случайной погрешности $A_{сл}$. Случайная погрешность измерения координат подчиняется нормальному закону распределения [32]. Для оценки ее величины рассмотрим более подробно процесс измерения глубины расположения дефекта с круговой индикатрисой рассеяния. В процессе измерения глубины оператор фиксирует положение искателя, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигнала от дефекта. При этом амплитуда эхо-сигнала, наблюдаемого на экране индикатора типа A , при линейной амплитудной характеристике приемного тракта и постоянном акустическом контакте может быть представлена в виде

$$U(\varphi) = k\Phi^2(\varphi) \frac{1}{r^n(\varphi)} \exp[-2\delta r(\varphi)]^*, \quad (149)$$

* Аналогичные выражения, связывающие напряжение на выходе приемного тракта лоатора с пеленгом цели, называют пеленгационными характеристиками [125].

где k — коэффициент пропорциональности; φ — угловая координата, отсчитываемая от оси диаграммы направленности $\Phi(0)$.

В случае контроля металлов с малым коэффициентом затухания ($\delta \approx 0$) и применения искателей с острой диаграммой направленности ($af \gg 15$ мм МГц) справедливо заменить выражение (149) на

$$U(\varphi) \approx k\Phi^2(\varphi). \quad (150)$$

Тогда приращение ΔU сигнала при смещении искателя на расстояние, соответствующее углу $\Delta\varphi$, равно

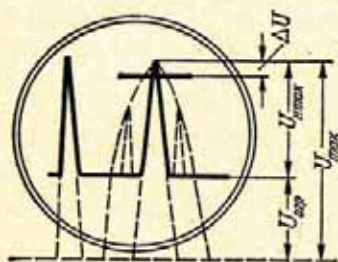


Рис. 124. Экран дефектоскопа.

$$\Delta U = U(0 + \Delta\varphi) - U(0)$$

или после разложения в ряд Тейлора

$$\Delta U \approx U'(0) \Delta\varphi + \frac{1}{2} U''(0) (\Delta\varphi)^2.$$

Величина относительного приращения амплитуды сигнала по отношению к максимальному значению $U_{\max}$ составит

$$\frac{\Delta U}{U_{\max}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U''(0)}{U(0)} (\Delta\varphi)^2 + \frac{U'(0)}{U(0)} \Delta\varphi.$$

В точке максимума диаграммы $U'(0) \approx 0$.

Тогда

$$\frac{\Delta U}{U_{\max}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U''(0)}{U(0)} (\Delta\varphi)^2. \quad (151)$$

Экспериментально установлено, что оператор при работе с типовыми дефектоскопами, на экране которых нанесена масштабная линия (рис. 124), в зависимости от натренированности замечает разницу $\Delta U = (0,2-0,5)$ мм в амплитуде $U_{H\max} = (20-30)$ мм наблюдаемых импульсов, т. е.

$$\left| \frac{\Delta U}{U_{H\max}} \right| \gg (0,007 \div 0,0025). \quad (152)$$

Если учесть, что уровень отсечки сигналов в приемном тракте колеблется от 25 до 50%, т. е. $U_{H\max} = (0,5 \div 0,75) \times$

$U_{\max}$, то условие (152) для входных сигналов примет вид

$$\frac{\Delta U}{U_{\max}} \gg (0,0035 \div 0,0188). \quad (153)$$

Для вычисления отношения $\frac{U''(0)}{U(0)}$ воспользуемся выражением (124), аппроксимирующим основной лепесток диаграммы направленности наклонного искателя. Тогда, согласно (124) и (150), получим

$$U(\varphi) \approx k \cos^2 \left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \varphi \right)$$

$$\frac{U''(0)}{U(0)} \approx 2 \left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \right)^2 \approx 0,825 \frac{1}{\varphi_0^2}. \quad (154)$$

Из выражений (151), (153) и (154) находим возможную относительную ошибку $|\Delta\varphi|$ в установке искателя

$$|\Delta\varphi| \approx (0,09 \div 0,21) \varphi_0. \quad (155)$$

При этом случайная ошибка A_{cl} в измерении глубины H расположения дефекта составит

$$A_{cl} = \frac{\Delta H}{H} \approx \Delta\varphi \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$A_{cl} \approx (0,1 \div 0,2) \varphi_0 \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (156)$$

где φ_0 — половина угла раскрытия основного лепестка диаграммы на уровне 0,8 рад.

В табл. 11 приведены величины случайных абсолютных ошибок ΔH , вычисленные по формуле (156) и полученные экспериментально на искусственных отражателях в виде полого цилиндрического отверстия в образце из стали.

Из таблицы видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными; величина случайной ошибки, обусловленная неточностью установки искателя, практически не превышает 4% от измеряемой величины.

Уменьшению величины случайной ошибки способствует увеличение направленности поля наклонного искателя и повышение точности относительного измерения амплитуды эхо-сигналов, наблюдаемых на экране дефектоскопа.

Значения ошибок ΔH

β°	α_1		φ_0		Ошибка ΔH , мм	
	Расчет	Эксперимент*	Расчет	Эксперимент*	20	
					Расчет	Эксперимент*
40	52	50	$+3,5 \div -3,0$	$+4,0 \div -3,2$	0,1—0,3	0,52
50	69	65	$+5,0 \div -4,0$	$+4,5 \div -4,0$	0,3—0,8	0,51

* Значения средних квадратических ошибок двадцати измерений погрешностью построения шкалы [90].

Величина случайной погрешности будет падать с увеличением затухания ультразвука на пути его распространения до отражателя.

Определим систематические относительные погрешности A_T , A_r , A_α и A_t измерения глубины, вызываемые соответственно отклонением величин T , C_r , α_1 и t_n от T_0 , C_{t_0} , α_{10} и t_n .

Ошибка A_T , связанная с погрешностью глубиномера, может быть определена, если известна точность ΔT , с которой производится отсчет времени T .

Из выражений (25) и (26) следует:

$$A_{TH} = A_{TL} = \frac{\Delta T}{T - 2t_n} = \frac{\Delta T}{T_0 - \Delta T - 2t_n}. \quad (157)$$

В отличие от A_T ошибки A_c и A_α будут различными для координат H и L .

Если относительное изменение скорости $\frac{C_t}{C_{t_0}} = s$, то двойное время t распространения ультразвуковой волны до отражателя, расположенного на глубине H , составит

$$t = \frac{2H}{C_t \cos \alpha_1} = \frac{2H}{s C_{t_0} \cos \alpha_1},$$

где $\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{C_t}{C_{t_0}} \sin \alpha_{10}\right) = \arcsin(s \sin \alpha_{10})$ — угол ввода луча, соответствующий скорости C_t .

Таблица 11

Измерения координаты H

при H , мм					
50		75		100	
Расчет	Эксперимент*	Расчет	Эксперимент*	Расчет	Эксперимент*
0,3—0,8	1,3	0,5—1,1	1,30	0,6—1,5	1,20
0,9—2,2	1,05	1,4—3,2	2,00	1,8—4,3	3,70

каждой координаты, обусловленные погрешностью метода и погрешностью построения шкалы [90].

При этом измеренное значение глубины

$$H_{гн} = \frac{C_{t_0} t}{2} \cos \alpha_{10} = \frac{H \cos \alpha_{10}}{s \sqrt{1 - s^2 \sin^2 \alpha_{10}}}. \quad (158)$$

Из соотношений (148) и (158) получаем выражение для расчета относительной погрешности A_{cH} измерения глубины, обусловленной отклонениями скорости распространения ультразвука:

$$A_{cH} = \frac{\cos \alpha_{10}}{s \sqrt{1 - s^2 \sin^2 \alpha_{10}}} - 1 \quad (159)$$

или после преобразования

$$A_{cH} = \frac{\cos \alpha_{10}}{\left(\frac{\Delta C_t}{C_{t_0}} + 1\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta C_t}{C_{t_0}} + 1\right)^2 \sin^2 \alpha_{10}}} - 1, \quad (160)$$

где величина $\Delta C_t = C_t - C_{t_0}$ принимается со своим знаком.

Аналогично может быть получено выражение для A_{cL} :

$$A_{cL} = \frac{1}{s^2} - 1. \quad (161)$$

На рис. 125 изображены зависимости относительной погрешности A_{cH} от угла ввода луча α_{10} при различной величине s относительного изменения скорости поперечной волны, рассчитанные по выражению (159).

Как видно из рис. 125, $A_{сн}$ зависит от соотношения $s = \frac{C_t}{C_{t_0}}$ и от угла ввода луча α_{1_0} . Величина $A_{сн}$ близка к нулю, если $\alpha_{1_0} = \arctg \frac{1}{s}$, и возрастает с увеличением угла ввода луча. При $\frac{C_t}{C_{t_0}} = 1,05$ и $\alpha_{1_0} = 50^\circ$ ошибка $A_{сн}$ $\approx 4\%$. Поэтому при углах ввода луча $\alpha_{1_0} > 50^\circ$ необходимо уделять особое внимание уточнению величины C_t .

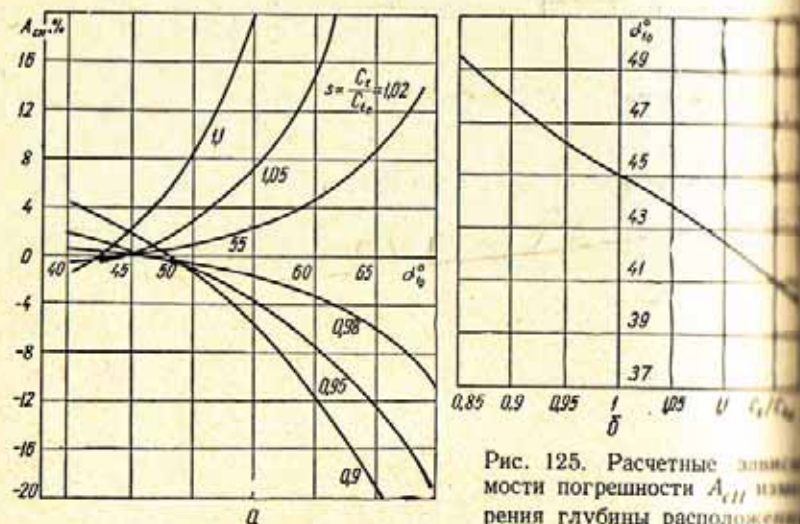


Рис. 125. Расчетные зависимости погрешности $A_{сн}$ измерения глубины расположения отражателя от угла ввода

луча α_{1_0} (а), и угла ввода луча α_{1_0} , обеспечивающего минимальную ошибку $A_{сн}$, от соотношения $\frac{C_t}{C_{t_0}}$ (б).

Если можно предопределить величину C_t , то для уменьшения ошибки $A_{сн}$ следует глубиномер настраивать так, чтобы выполнялось условие $C_t - C_{t_0} < 0$; в этом случае нужно применять искатели с углом ввода луча в металл, равным $45-47^\circ$ (рис. 125, б). Если соотношение скоростей C_t и C_{t_0} заранее не известно, то следует использовать искатели с углом $\alpha_{1_0} = 43-45^\circ$ с тем, чтобы уменьшить возможную ошибку при $C_t > C_{t_0}$.

Ошибка $A_{сл}$ в отличие от $A_{сн}$ не зависит от угла ввода луча. На рис. 126 приведена расчетная зависимость ошибки $A_{сл}$ от величины $s = \frac{C_t}{C_{t_0}}$.

Из сравнения рис. 125 и 126 видно, что при $\alpha_{1_0} > 55^\circ$ ошибка в измерении глубины H намного больше, чем в измерении расстояния L . Поэтому в некоторых случаях более целесообразно определять местоположение отражающей поверхности путем измерения координаты L . Для уменьшения погрешности измерения расстояния L целесообразно настраивать глубиномер так, чтобы истинная скорость ультразвука C_t в контролируемом металле известна была несколько выше скорости C_{t_0} , т. е. $C_t - C_{t_0} > 0$.

Относительные погрешности $A_{сн}$ и $A_{сл}$, связанные с изменением времени распространения ультразвука в призме искателя на величину $2\Delta t_n$, как это следует из соотношений (25) и (26), определяются выражениями:

$$A_{сн} = -\frac{C_{t_0} \cos \alpha_{1_0}}{2H} \cdot 2\Delta t_n; \quad (162)$$

$$A_{сл} = -\frac{C_{t_0} \sin \alpha_{1_0}}{2L} \cdot 2\Delta t_n. \quad (163)$$

где $\Delta t_n = t_n - t_0$.

Систематическая погрешность $A_{сн} = A_{сл}$ обратно пропорциональна глубине расположения отражающей поверхности и возрастает с уменьшением угла ввода луча. Поэтому при контроле листов малой толщины необходимо уделять особое внимание измерению величины акустической задержки каждого искателя t_n . На рис. 127 представлены зависимости относительной погрешности A_t от абсолютной величины $2\Delta t_n$ изменения времени распространения ультразвука в призме искателя с минимальным углом ввода луча в сталь $\alpha_{1_0} = 35^\circ$ и от износа призмы искателей Δh . Из выражений (162) и (163) следует, что для обеспечения точности измерения глубины H , равной $0,05H \pm 2$ мм

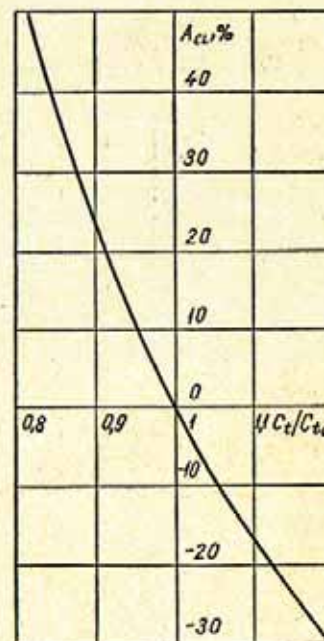


Рис. 126. Расчетная зависимость погрешности $A_{сл}$ измерения расстояния L до дефекта от соотношения s скоростей ультразвука C_t в контролируемом металле к значению скорости C_{t_0} , принятой при расчете координат.

и гарантируемой техническими условиями на типовые ультразвуковые дефектоскопы, разброс времени распространения ультразвука через призму искателя не должен превышать ± 1 мксек для искателя с углом призмы 30° и ± 2 мксек для искателя с углом призмы 50° .

Для определения относительной погрешности A_α измерения координат расположения дефекта, вызванной отклонением угла ввода луча на величину $\Delta\alpha$ от номинального

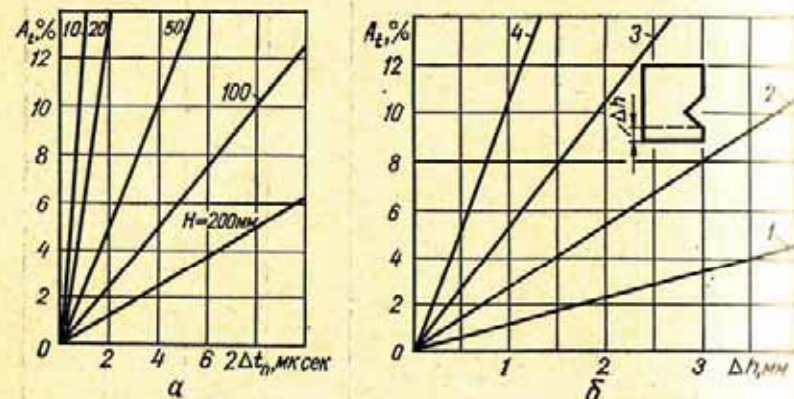


Рис. 127. Зависимость относительной погрешности A_r измерения глубины H расположения отражателей (дефектов) от изменения $2\Delta t_n$ времени распространения ультразвука через призму искателя с углом $\alpha_{10} = 35^\circ$ (а) и от износа Δh призм искателей с различными углами ввода луча α_{10} (б):

1 — $\alpha_{10} = 40^\circ$; $H = 100$ мм; 2 — $\alpha_{10} = 50^\circ$; $H = 50$ мм; 3 — $\alpha_{10} = 65^\circ$; $H = 20$ мм; 4 — $\alpha_{10} = 70^\circ$; $H = 10$ мм.

значения α_{10} , рассмотрим рис. 128, а. Из этого рисунка и выражения (25) следует, что двойное время распространения ультразвука до дефекта, расположенного на глубине H , составляет

$$t = \frac{2H}{C_{l0} \cos(\alpha_{10} - \Delta\alpha)}.$$

При этом измеренное значение глубины

$$H_{гн} = \frac{C_{l0} t}{2} \cos \alpha_{10} = \frac{H \cos \alpha_{10}}{\cos(\alpha_{10} - \Delta\alpha)},$$

откуда

$$A_{\alpha H} = \frac{\cos \alpha_{10}}{\cos(\alpha_{10} + \Delta\alpha)} - 1, \quad (164)$$

где $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_{10}$.

Аналогично может быть получено выражение для $A_{\alpha L}$.

$$A_{\alpha L} = \frac{\sin \alpha_{10}}{\sin(\alpha_{10} + \Delta\alpha)} - 1. \quad (165)$$

Относительная погрешность $A_{\alpha L}$, как и $A_{\alpha H}$, практически пропорциональна величине $\Delta\alpha$ отклонения угла ввода луча от номинального значения и в отличие от $A_{\alpha H}$ возрастает с уменьшением угла ввода луча (рис. 128, 129).

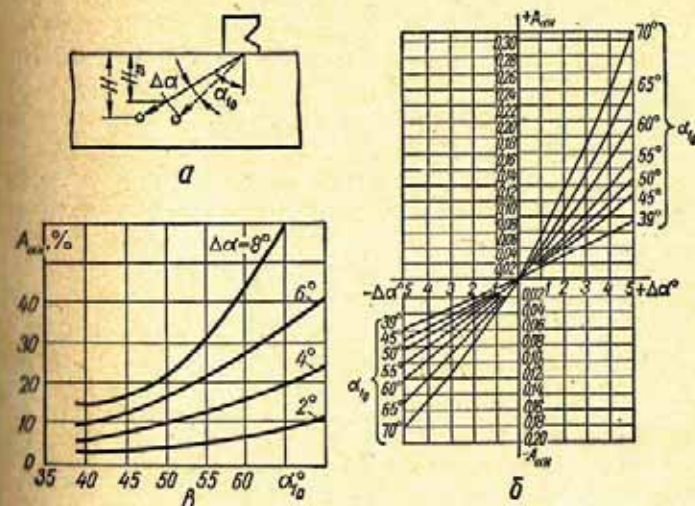


Рис. 128. Схема расчета (а) и зависимости (б, в) относительной погрешности $A_{\alpha H}$ измерения глубины расположения отражателя (дефекта).

При прочих равных условиях ошибка $A_{\alpha L}$ гораздо больше $A_{\alpha H}$ и в практике ультразвукового контроля сварных соединений составляет не более 8%. В то же время ошибка $A_{\alpha H}$ может достигать 50% и более. Из выражений (134) и (164) следует, что для обеспечения гарантируемой точности измерения глубины H , равной $0,05H \pm 2$ мм, необходимо, чтобы угол призмы был выполнен с допуском примерно $\pm 30'$.

Относительные систематические погрешности A_r , A_c , A_l , A_α могут иметь различный знак, поэтому могут компенсировать или дополнять друг друга.

Таким образом, для уменьшения суммарной величины систематической погрешности при определении координат дефектов, выявленных при сканировании наклонным искателем, необходимо стремиться к тому, чтобы принятые значения скорости распространения сдвиговой волны, угла ввода луча и времени прохождения ультразвука через призму соответствовали истинным.

Снижению величины случайной погрешности способствуют увеличение направленности поля наклонного искателя

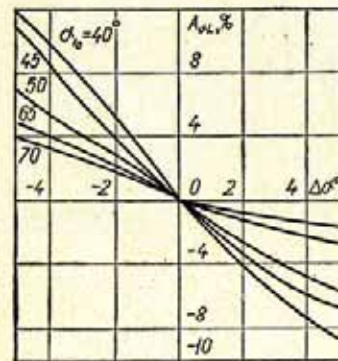


Рис. 129. Расчетная зависимость погрешности $A_{\alpha L}$ от отклонения $\Delta\alpha$ при различных углах ввода луча α_0 .

и повышение точности относительного измерения амплитуды эхо-сигналов, наблюдаемых на экране дефектоскопа. Для повышения точности относительного измерения амплитуды эхо-сигналов следует на экраны дефектоскопов наносить горизонтальную линию на максимально возможном расстоянии от линии развертки, при котором еще обеспечивается хорошее наблюдение вершины эхо-сигнала и работа приемного тракта без ограничения по максимуму; для измерения координат целесообразно вводить также максимально возможную отсечку входных эхо-сигналов и увеличивать длительность развертки.

При измерении координат с помощью глубиномеров необходимо вводить поправку к результату отсчета, величина которой может быть определена по приведенным графикам.

Для обеспечения взаимозаменяемости наклонных искателей при измерении координат с требуемой точностью отклонения угла призмы от номинальной величины не должны превышать $\pm 30'$, а отклонения времени распространения ультразвука через призму — ± 1 мксек.

7. МЕРТВАЯ ЗОНА И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Мертвая зона при контроле прямым и наклонным искателями, кроме конструкции последних и характеристик приемно-излучающего тракта дефектоскопа (см. гл. I), определяется акустическими характеристиками

контролируемого материала и эквивалентной площадью отражателей (дефектов), для которых оценивается величина этой зоны. Поэтому мертвую зону следует оценивать по выявляемости отражателей заданного размера, выполненных в образце из контролируемого материала. В практике дефектоскопии мертвую зону прямых искателей весьма часто определяют по выявлению донного эхо-импульса. При работе наклонным искателем мертвую зону в СССР принято характеризовать минимальной глубиной расположения цилиндрического отражателя, эхо-импульс от которого можно отличить от зондирующего импульса и эхо-импульсов шумов, возвращающихся из призмы. Цилиндрический отражатель диаметром 2 мм и длиной более ширины ультразвукового пучка должен быть выполнен в образце из контролируемого металла (ГОСТ 14 782—60). Очевидно, что чем больше угол призмы наклонного искателя, тем меньше мертвая зона. Так, например, мертвая зона при контроле стальных изделий на частоте 2,5 МГц составляет ≈ 8 мм для искателей с углом призмы 40° и ≈ 3 мм для искателей с углом призмы 50° .

Уменьшению мертвой зоны способствует также увеличение частоты ультразвуковых колебаний и размеров призмы. Объясняется это тем, что с увеличением частоты и габаритов призмы падает уровень реверберационных шумов, обуславливающих в основном мертвую зону наклонного искателя.

С помощью наклонных искателей можно контролировать изделия и соединения небольшой толщины, выявляя дефекты, расположенные под контактной поверхностью в пределах мертвой зоны. Достигается это тем, что такие дефекты озвучиваются лучом, претерпевшим многократные зеркальные отражения между поверхностями изделия и прошедшим путь до дефекта, превышающий мертвую зону искателя.

Разрешающая способность при ультразвуковой дефектоскопии обуславливается разрешающей способностью по дальности и по углу (фронтальная) [77]. Как первая, так и вторая разрешающие способности зависят от направленности ультразвукового поля и от скорости распространения волны в контролируемом материале. Разрешающая способность по дальности Δ определяется еще и разрешающей способностью аппаратуры T_p , т. е. минимальным временем между эхо-сигналами, еще различимыми на экране электроно-лучевой трубки.

Разрешающие способности Δ и T_p связаны соотношениями

$$\Delta_l = \frac{C_{l2} T_p}{2}; \quad \Delta_t = \frac{C_{t2} T_p}{2}, \quad (166)$$

где Δ_l и Δ_t — разрешающая способность при прозвучивании металла продольными и поперечными волнами соответственно; C_{l2} и C_{t2} — скорость продольной и поперечной волн в контролируемом металле соответственно.

Измерив разрешающую способность аппаратуры, можно вычислить разрешающую способность по дальности.

8. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Достоверность метода ультразвуковой дефектоскопии зависит от правильности выбора основных параметров контроля и точности соблюдения их в процессе прозвучивания сварных швов.

Такие параметры, как частота ультразвуковых колебаний и размеры пьезопреобразователя, определяются типом применяемых дефектоскопа и искателя и практически остаются неизменными в процессе их эксплуатации. В то же время ряд параметров (чувствительность, угол ввода луча, точность глубиномера, мертвая зона и разрешающая способность) во многом зависят от работоспособности и настройки аппаратуры. У одного и того же дефектоскопа чувствительность может резко изменяться в зависимости от срока службы радиоэлементов, напряжения питания, пьезоэлектрического модуля пластины, качества акустического контакта ее с призмой искателя и т. п. Точность работы глубиномера может уменьшаться вследствие истирания призмы (изменения угла ввода луча) и нарушения электрических параметров схемы. Разрешающая способность дефектоскопа зависит от длительности зондирующего импульса, степени демпфирования пьезоэлектрической пластины и т. д. Поэтому для наибольшей надежности в процессе дефектоскопии необходимо систематически проверять соответствие основных параметров контроля параметрам, предусмотренным инструкцией. Эта проверка часто не может быть выполнена на тест-образцах, применяемых при отработке методики дефектоскопии. Кроме того, по этим нестандартным образцам невозможно сравнивать параметры дефектоскопов различных систем.

В связи с этим необходима стандартизация методов проверки следующих основных параметров с помощью номинальных эталонов: условной чувствительности, угла ввода луча, точности работы глубиномера, разрешающей способности и мертвой зоны.

Рассмотрим способы измерения и эталонирования указанных параметров.

Стандартизация условной чувствительности. Для стандартизации условной чувствительности необходимо иметь один или несколько отражателей в эталонном образце из материала со строго регламентированными акустическими свойствами. Для дефектоскопа без аттенюатора совокупность отражателей должна обеспечивать изменение амплитуды эхо-сигналов в широком динамическом диапазоне, перекрывающем соответствующий диапазон, имеющий место при контроле сварных соединений и составляющий 40–60 дБ. При этом эталонный отражатель должен обладать круговой индикатрисой рассеяния, позволяющей оценить условную чувствительность дефектоскопа с искажениями, имеющими различный угол призмы. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют отражатели в виде сквозных цилиндрических отверстий. Однако однозначная зависимость между диаметром отверстия и амплитудой отраженного от него эхо-сигнала существует только для продольных волн (см. гл. IV)*. Продольная волна при сканировании наклонным искателем будет распространяться в образце, если он выполнен из того же материала, что и призма искателя. В связи с этим эталонный образец для стандартизации условной чувствительности целесообразно изготавливать из органического стекла. Изменение амплитуды эхо-сигналов, отраженных от цилиндрических отражателей в эталоне, может быть достигнуто при использовании отверстий разного диаметра, расположенных на одной глубине, или отверстий одного и того же диаметра, находящихся на различной глубине.

В соответствии с выражением (75), при диаметре цилиндрического отражателя $D > \lambda$, где λ — длина волны, отношение N (в децибелах) амплитуд эхо-сигналов, отраженных от цилиндрических отражателей диаметром D_i и D_{i+1} ,

* Подобная зависимость для сдвиговых волн наблюдается при зондировании импульсах малой длительности с широким частотным спектром.

расположенных в дальней зоне излучателя на одной глубине, составит

$$N = 20 (\lg \sqrt{D_{i+1}} - \lg \sqrt{D_i}). \quad (167)$$

На рис. 130 представлены расчетная и экспериментальные зависимости амплитуды эхо-сигналов от диаметра цилиндрического отверстия в органическом стекле. Как видно из графика, построенного по экспериментальным данным, амплитуды эхо-сигналов, отраженных от отверстий диаметром 20 и 1 мм, отличаются всего на 14 дБ. Некоторое

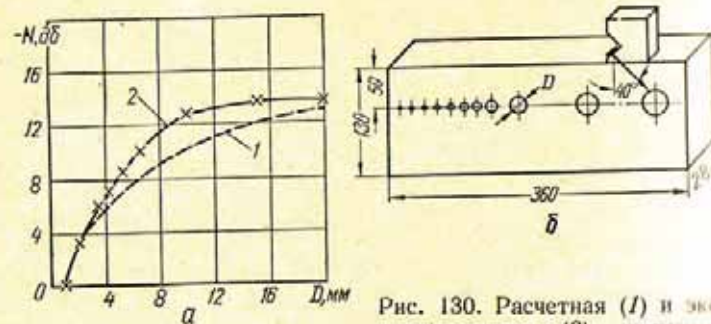


Рис. 130. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости амплитуды N эхо-сигнала от диаметра D отражателя (а) и образец для исследований (б) (частота ультразвука 2,5 МГц).

несоответствие экспериментальных данных расчетным следует отнести за счет использования отражателей, диаметр которых соизмерим с диаметром ультразвукового пучка. Дальнейшее увеличение диаметра отражателей, а следовательно, и размеров образца нецелесообразно, поскольку, согласно эксперименту, отношение амплитуд эхо-сигналов от отверстий диаметром 1 мм и от плоскости, перпендикулярной распространению ультразвуковых колебаний, имитирующей собой отверстие бесконечно большого диаметра, составляет всего примерно 19 дБ. Следовательно, эталон для определения условной чувствительности можно выполнить только путем изменения глубины залегания цилиндрического отражателя одного и того же диаметра. Диаметр отражателя следует выбирать возможно меньшим. Исходя из технологических соображений, он должен быть равным 2 мм.

Учитывая импульсный характер излучения, сглаживающий неравномерность поля в ближней зоне излучателя, не выражений, приведенных в табл. 5, можно получить соотно-

шения для приближенного расчета отношения N (в децибелах) амплитуд эхо-сигналов от двух отражателей, расположенных в ближней ($N_{б.з.}$) и дальней ($N_{д.з.}$) зонах:

$$N_{б.з.} \approx 17,4 \delta \frac{\Delta H}{\cos \beta}; \quad (168)$$

$$N_{д.з.} \approx 17,4 \delta \frac{\Delta H}{\cos \beta} + 30 \left[\lg \left(z + \frac{H}{\cos \beta} + \frac{\Delta H}{\cos \beta} \right) - \lg \left(z + \frac{H}{\cos \beta} \right) \right], \quad (169)$$

где ΔH — разница в глубине залегания отражателей; H — глубина залегания ближнего отражателя; $H + \Delta H$ — то же, дальнего отражателя; z — расстояние от преобразователя до точки ввода луча; δ — коэффициент затухания ультразвука.

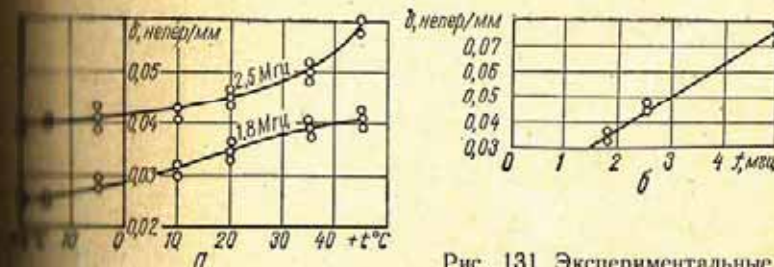


Рис. 131. Экспериментальные зависимости коэффициента затухания ультразвука δ в органическом стекле от температуры t (а) и от частоты f (б) при $t = 20^\circ \text{C}$.

В результате исследований установлено, что коэффициент затухания ультразвука в органическом стекле при температуре 20—25°С в зависимости от частоты меняется практически по линейному закону (рис. 131)

$$\delta \approx 0,035 + 0,012 (f - 1,8).$$

Температурная зависимость коэффициента затухания линейна, причем, наибольшее изменение наблюдается в области температур выше комнатной (рис. 131). Характер температурной зависимости совпадает с данными, приведенными для других марок органического стекла [11].

Расчет и эксперимент (рис. 132) подтверждают, что данный принцип построения эталона позволяет получить существенно большее изменение амплитуд при небольших

размерах эталона. Очевидно, что высота эталона определяется максимальной глубиной расположения цилиндрического отражателя, которая, в свою очередь, обуславливается максимальной условной чувствительностью дефектоскопов, используемых при контроле сварных соединений (табл. 12).

Таблица 12

Максимальная условная чувствительность
ультразвуковых дефектоскопов (эксперимент)

Тип дефектоскопа	Частота f , Мгц					
	1,8		2,5		5,0	
	Угол β					
	40°	50°	40°	50°	40°	50°
УЗД-59	—	—	40	30	—	—
УЗД-60	45	40	—	—	—	—
ДУК-11ИМ	—	—	55	50	—	—
ДУК-13ИМ	60	55	55	45	—	—
УДМ-1М	60	55	60	55	25	25

Как следует из табл. 12, в эталоне можно ограничиться максимальной глубиной расположения отражателя, равной 60 мм. Расстояние между двумя ближайшими отражателями по высоте образца с целью уменьшения его размеров

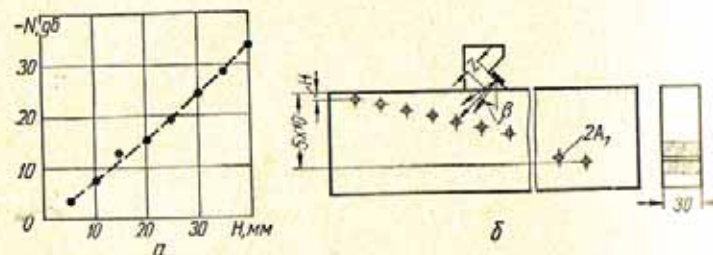


Рис. 132. Экспериментальная зависимость ослабления N амплитуды эхо-сигнала от расстояния H до отражателя в образце (а) и образец из органического стекла для исследований (б).

должно быть возможно большим и вместе с тем обеспечивать плавную настройку условной чувствительности. При контроле сварных соединений без механической обработки поверхности проката, когда амплитуда эхо-

сигнала от одного и того же дефекта может изменяться на 3 (2—3) дБ в зависимости от чистоты поверхности, в большинстве случаев достаточно выбрать расстояние $H_{\text{эхо}}$ между отражателями таким, чтобы амплитуды эхо-сигналов от этих отражателей отличались приблизительно на 3 дБ [51]. Из выражения (168) находим, что при $\beta = 40^\circ$ и $f = 2,5$ Мгц величина $\Delta H_{\text{min}} \approx 5$ мм.

Очевидно, что по совокупности цилиндрических отражателей в эталонном образце из органического стекла условная чувствительность дефектоскопа с искателем при данной частоте колебаний, угле призмы и размерах преобразователя будет определяться максимальной глубиной расположения отражателей, еще уверенно выявляемых индикаторами дефектоскопа. Затухание ультразвука при этом в эталонных образцах должно быть одинаковым и соответствовать затуханию в первичном эталонном образце; коэффициент затухания в органическом стекле не должен превышать примерно 2%. Подбор органического стекла по коэффициенту затухания должен производиться при определенной температуре, так как величина коэффициента затухания зависит от температуры. Температурные изменения коэффициента затухания могут привести к некоторым ошибкам при определении условной чувствительности. В интервале температур 10—30°С максимальная температурная погрешность не будет превышать 10%, что в большинстве случаев является вполне допустимым. При необходимости более точного определения условной чувствительности по эталону может быть введена температурная поправка.

Если в дефектоскопах имеется аттенуатор, то для калибрования условной чувствительности можно применить отражатель в виде отверстия со сферическим дном [186], бокового цилиндрического отверстия [206] или полуцилиндрической вогнутой поверхности [51, 194], изготовленный в эталоне из металла с заданным коэффициентом затухания. Автором совместно с Л. И. Кузьминой показано, что наихудшая воспроизводимость результатов измерения из-за разброса частоты ультразвука будет при эталонировании чувствительности в вогнутой полуцилиндрической поверхности [53].

Измерение погрешности глубиномера. Для определения погрешности глубиномера целесообразно использовать способ измерения интервалов времени между донными эхо-сигналами, возникающими при прозвучивании

образца из любого материала с известной скоростью распространения ультразвука в нем.

Временной интервал T_0 между зондирующим импульсом и n -м донным отражением при номинальных значениях длины l_0 образца и скорости C_{l_0} продольной волны составляет

$$T_0 = n \frac{2l_0}{C_{l_0}}.$$

На величину временного интервала могут влиять точность изготовления образца, отклонение скорости продольной волны от номинального значения и изменение температуры, приводящие к линейному расширению материала образца и отклонению скорости распространения ультразвука.

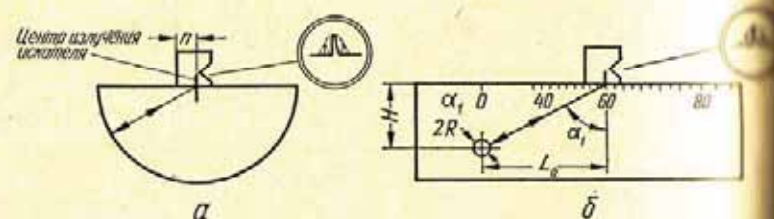


Рис. 133. Определение угла ввода луча (способ 1).

Для изготовления эталонного образца удобно применить органическое стекло, из которого должен быть выполнен эталонный образец для стандартизации условной чувствительности, или сталь, из которой изготавливается большинство металлоконструкций. Расчеты показывают, что для настройки и проверки глубиномеров с точностью до 0,1 мм могут быть использованы эталонные образцы, изготовленные из стали или органического стекла, скорость ультразвука в которых не отличается соответственно более чем на $\pm 1,0$ и $\pm 0,5\%$ от расчетной величины.

Эталонирование угла ввода луча. Для обеспечения необходимой достоверности контроля угол α_1 ввода луча должен быть установлен с точностью не менее $\pm 2^\circ$ (см. § 6 гл. V).

Угол ввода может быть измерен по одному из следующих способов. Первый способ предусматривает предварительное определение положения центра излучения искателя (точка выхода луча) по полуцилиндрическому образцу (рис. 133, а) а затем — измерение угла ввода луча по образцу с

полуцилиндрическим отражателем (рис. 133, б). Образец для определения центра излучения, очевидно, может быть изготовлен из любого металла, а образец для измерения угла ввода — только из металла, аналогичного по своим акустическим свойствам контролируемому. Центр излучения искателя лежит против центра окружности образца при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала максимальна.

Угол ввода луча вычисляется по соотношению (рис. 134, б)

$$\alpha_1 = \arctg \frac{L_0}{H}, \quad (170)$$

где L_0 — расстояние от центра отверстия до центра излучения искателя при установке последнего в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигнала от отверстия.

Для удобства измерения угла образец может быть заранее проградуирован в значениях углов ввода луча.

Для определения угла ввода луча вторым способом измеряют расстояния L_1 и L_2 от центров двух отверстий в образце (рис. 134) до какой-то условной точки на искателе. Искатель при этом устанавливают в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигналов от отверстий. Зная величины L_1 и L_2 , рассчитывают значение угла α_1 и стрелы искателя n по соотношениям, следующим из рис. 134:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{H_1 L_2 - H_2 L_1}{H_2 - H_1}; \\ \alpha_1 &= \frac{\arctg \left(\frac{L_1 - n}{H_1} \right) + \arctg \frac{L_2 - n}{H_2}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (171)$$

При втором способе исключается предварительная градуировка эталонного образца непосредственно в значениях угла ввода луча. В связи с этим в практике ультразвуковой дефектоскопии применяют первый способ измерения угла ввода луча [15, 194].

На точность определения центра излучения могут оказывать влияние радиус и ширина эталонного образца.

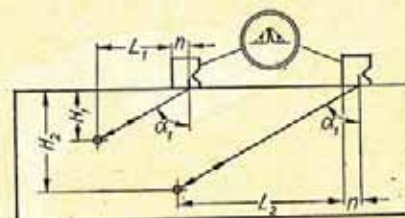


Рис. 134. Определение угла ввода луча (способ 2).

При малых случайных ошибках измерения, что имеет место на практике, величина Δx_m максимальной случайной ошибки определяется выражением

$$|\Delta x_m| = (0,03 - 0,08) \frac{\varphi_0}{\cos \alpha_0} R, \quad (172)$$

где R — радиус образца.

Из выражения (172) следует, что возможная максимальная случайная ошибка Δx_m в определении центра излучения искателя по образцу полуцилиндрической формы пропорциональна радиусу образца, возрастает с ухудшением направленности поля искателя и увеличением угла поворота луча. Ширина δ образца должна быть выбрана такой, чтобы исключить отражение ультразвукового пучка от его боковых поверхностей, т. е.

$$\delta \geq 2 \cdot 2R \lg \varphi_p,$$

где φ_p — половина угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности искателя.

Для типовых искателей с параметром $af \approx 15 \text{ мм} \times \text{МГц}$ оптимальная ширина образца должна составлять $\delta_{\text{опт}} \approx 0,9R$. При $\delta \ll \delta_{\text{опт}}$ можно неверно определить центр излучения искателя.

Как следует из анализа диаграмм направленности наклонного искателя [63, 36], акустические характеристики материала, из которого выполнен образец, не должны оказывать влияния на точность определения центра излучения искателей, угол призмы которых $\beta < \beta_{\text{кр}}$.

В табл. 13 приведены данные расчета и экспериментальных исследований точности определения центра излучения типовых искателей на образцах различных размеров, изготовленных из стали, алюминия и органического стекла.

При исследованиях расстояние n центра излучения от передней грани искателя (стрела искателя) отсчитывали с точностью 0,5 мм; стрелу искателя на каждом образце измеряли не менее 25 раз.

Из табл. 13 следует, что при оптимальной ширине образца (образцы 2, 7), приблизительно равной его радиусу, средне-квадратическая погрешность измерения стрелы искателя при радиусе образца $R = 60 \text{ мм}$ не превышает

Номер образца	Характеристика эталонного образца			$\beta = 40^\circ, \varphi_0 = 3,25^\circ$		$\beta = 50^\circ, \varphi_0 = 4^\circ$		Расстояние n центра излучения от передней грани, мм (эксперимент), при β	
	Материал	$R, \text{ мм}$	$\delta, \text{ мм}$	$\Delta x, \text{ расчет}$	$\sigma, \text{ эксперимент}$	$\Delta x, \text{ расчет}$	$\sigma, \text{ эксперимент}$	40°	50°
1	Сталь	30	50	0,08 ± 0,21	1,0	0,15 ± 0,39	0,5	14,8	20,1
2	Сталь	60	50	0,15 ± 0,42	0,7	0,30 ± 0,78	0,6	14,9	20,8
3	Сталь	120	50	0,30 ± 0,84	0,8	0,60 ± 1,56	0,8	14,3	20,9
4	Алюминий	30	30	0,08 ± 0,21	1,2	0,15 ± 0,39	0,7	14,3	19,7
5	Алюминий	50	20	0,13 ± 0,35	1,3	0,25 ± 0,55	2,9	13,8	21,6
6	Алюминий	120	50	0,30 ± 0,84	1,0	0,60 ± 1,56	1,4	14,3	19,7
7	Оргстекло	41	38	0,13 ± 0,35	0,4	0,25 ± 0,55	0,5	13,8	19,6

1,0 мм; при малой ширине образца (образец 5) погрешность измерений из-за интерференционных явлений может существенно возрасти. Значения стрелы искателя, измеренные по образцам из стали, алюминия и органического стекла, отличаются друг от друга менее чем на ± 1 мм, что соответствует среднеквадратической величине случайной погрешности измерений σ .

В связи с этим для определения центра излучения искателя эталонные образцы с цилиндрической поверхностью можно изготавливать из любого материала с малым затуханием ультразвука в нем; радиус образца должен быть возможно меньше, но не менее протяженности ближней зоны искателя (30—50 мм); ширина образца должна быть приблизительно равна радиусу.

Если радиус образца будет меньше протяженности ближней зоны, то может возникнуть систематическая ошибка, рассмотренная Карсоном [178]. Однако полученный при этом вывод о том, что погрешность определения центра излучения искателя падает с увеличением радиуса эталонного образца, неточен, так как получен автором [178] в предположении, что радиус образца всегда не превышает протяженность ближней зоны искателя.

Измерение угла ввода луча α_1 при известном положении центра излучения искателя по эталону из контролируемого металла по своей физической сущности аналогично измерению координат расположения отражателя с круговой индикатрисой рассеяния (см. § 6 гл. VI). Если предположить, что размеры отражателя в эталоне не оказывают влияния на огибающую последовательности эхо-сигналов при перемещении искателя, т. е., что радиус отражателя R намного меньше глубины H расположения этого отражателя, то максимальная случайная ошибка $\Delta\varphi$ в измерении угла α_1 будет определяться выражением (155) и в зависимости от натренированности оператора для типовых искателей составит $\Delta\varphi \approx 0,3 \div 1^\circ$. Экспериментально установлено, что среднеквадратическое отклонение не превышает $0,5^\circ$.

Если радиус R цилиндрического отражателя соизмерим с глубиной H расположения его центра, то огибающая последовательности эхо-сигналов при перемещении искателя может отличаться от огибающей при $R \ll H$. При углах α , лежащих вблизи угла α_0 , огибающая последовательности эхо-сигналов будет описываться выражением

(136), в котором расстояние r является также функцией радиуса R :

$$r(\alpha) = \left(\frac{H}{\cos \alpha} - R \right), \quad (173)$$

а показатель $n = 1,5$.

Из соотношения (126) с учетом (173) получим выражение для угла ввода луча α_1 , измеренного по эталону с цилиндрическим отражателем радиусом R , центр которого расположен на глубине H :

$$\frac{\frac{\partial \Phi(\alpha_1)}{\partial \alpha}}{\Phi(\alpha_1)} = \left[0,75 \frac{1}{1 - \frac{R}{H} \cos \alpha_1} + \frac{\partial H}{\cos \alpha_1} \right] \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (174)$$

Влияние размеров отражателя на результаты измерения угла α_1 будет тем значительнее, чем хуже направленность поля искателя, меньше угол наклона оси его диаграммы и ниже затухание ультразвука.

Анализ уравнения (174) показывает, что возможная максимальная систематическая погрешность измерения угла ввода луча, обусловленная конечной величиной радиуса цилиндрического отражателя, для типовых искателей ($R = 15$ мм · МГц) не превышает максимальной величины случайной погрешности метода измерения угла ввода луча.

Увеличение направленности поля искателя, т. е. увеличение угла раскрытия основного лепестка, приводит к возрастанию систематической погрешности. Однако если $\frac{R}{H} \ll 0,2$, то величина этой погрешности меньше $0,2^\circ$.

Результаты экспериментальных исследований точности измерения угла ввода луча, проведенные на образце из стали, в котором последовательно были выполнены цилиндрические отражатели радиусом $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 2$ мм, $R_3 = 3$ мм, $R_4 = 5$ мм, $R_5 = 9$ мм на глубине $H = 44$ мм ($\frac{R}{H} \leq 0,2$), приведены в табл. 14.

Из табл. 14 видно, что средние значения угла ввода луча, измеренные по образцам с различными радиусами отражателей при условии, что $\frac{R}{H} \ll 0,2$, отличаются друг от друга не более чем на $0,3^\circ$, что хорошо согласуется с полученными расчетным путем выводами.

Таблица 14

Результаты измерений угла ввода луча

β	Номер измерения	Угол α_1 , град, при радиусе отражателя				
		1 мм	2 мм	3 мм	5 мм	9 мм
40°	1	50	49,5	49	49	48,5
	2	49,5	50	49	49	49
	3	49,5	49,5	49	49	48,5
	4	50	49,5	49	49	48,5
	5	49,5	49,5	49,5	48,5	49
	6	50	49	49	49	49
	7	49,5	50	49	48,5	49
	8	49,5	49,5	49	49	49
	9	50	49,5	49,5	49	49
	10	50	49,5	49	49	49,5
α_{1cp}		49,75	49,55	49,1	48,9	48,9
50°	1	65,5	65,5	65,5	65,5	66
	2	66	65,5	65,5	66	66
	3	66	65,5	66	66,5	66
	4	66	65,5	65,5	66	66,5
	5	65,5	66,0	65,5	66	65,5
	6	65,5	65,5	66	66	66
	7	66	65,5	65,5	65,5	65,5
	8	65,5	66	65,5	66,5	66
	9	65,5	66	66	66,5	66,5
	10	66	66	66	66	66,5
α_{1cp}		65,75	65,7	65,7	66,15	66,15

Таким образом, если $R < 0,2 H$, влиянием размеров отражателя действительно можно пренебречь.

Ширина δ эталонного образца для измерения угла ввода луча должна быть $\delta \geq 0,9H$.

При большом затухании ультразвука, т. е. при контроле сварных соединений большой толщины, угол ввода следует измерять на образцах соединений [15].

Измерение мертвой зоны и разрешающей способности. Для измерения мертвой зоны необходимо в образце из материала, аналогичного по акустическим свойствам контролируемому, выполнить на разной глубине цилиндрические отражатели диаметром 2 мм. Если необходимо

проверить только соответствие мертвой зоны дефектоскопа искателями заданной величины, то достаточно выполнить в образце по одному отверстию на заданной глубине для каждого искателя. Очевидно, что такие отверстия могут быть изготовлены в эталоне, предназначенном для измерения угла ввода луча.

Разрешающая способность в направлении прозвучивания может быть измерена по выявлению отражателей, расположенных один за другим таким образом, что эхосигналы от них сдвинуты во времени на известную величину. Для проверки разрешающей способности достаточно иметь два подобных отражателя. Отражатели для измерения и проверки разрешающей способности могут быть выполнены в любом материале с известной скоростью распространения ультразвука.

Эталонные для измерения и проверки основных параметров. Эталонные для измерения основных параметров контроля (условной чувствительности, точности глубиномера, угла ввода луча, разрешающей способности и мертвой зоны) должны быть достаточно удобными как для оценки возможностей и сравнения различных дефектоскопов, так и для настройки режима работы и систематической проверки параметров в процессе контроля сварных соединений в заводских и полевых условиях.

В практике ультразвуковой дефектоскопии за рубежом для эталонирования некоторых параметров контроля применяют эталонный блок (рис. 135), разработанный в 1956—1958 годах и рекомендованный Комиссией V Международного института сварки [194, 172]. Согласно указаний

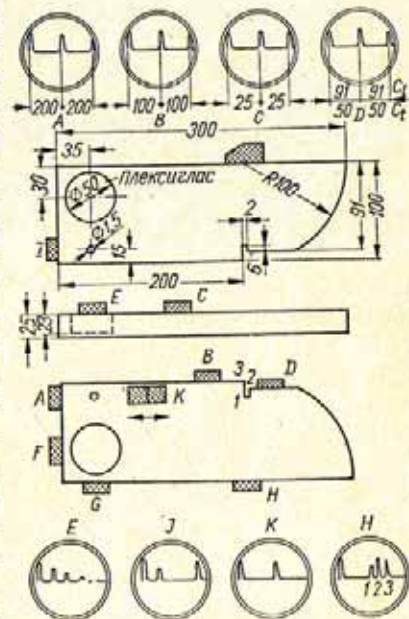


Рис. 135. Эталонный блок для настройки ультразвуковых дефектоскопов, рекомендованный Международным институтом сварки.

Комиссии, он предназначен для выполнения следующих операций:

1. Калибровки развертки по глубине и проверки линейности развертки. При этом прямой искатель устанавливают в положение *A*, *B* или *C* в зависимости от толщины контролируемого изделия. Калибровка развертки для случая контроля поперечными волнами выполняется также с помощью прямого искателя, установленного в положение *D*. При этом предполагается, что время прохождения продольной волной расстояния 91 мм в стали равно времени прохождения поперечной волной расстояния 50 мм.

2. Настройки и проверки чувствительности. При использовании прямого искателя его устанавливают в положение *E* при большой чувствительности или в положение *I* при малой чувствительности. В первом случае мерой чувствительности является число донных эхо-сигналов, а во втором случае — амплитуда эхо-сигнала от отверстия диаметром 1,5 мм. Если контроль ведется поперечными волнами, призматический искатель устанавливают в положение *K* и о чувствительности судят по величине эхо-сигнала от отверстия диаметром 1,5 мм.

3. Проверки разрешающей способности только при контроле продольными волнами. Искатель должен находиться в положении *H*.

4. Контроля мертвой зоны только при работе продольными волнами. Прямой искатель устанавливают в положение *F* и *G*.

5. Определения центра излучения и угла ввода луча.

6. Определения положения начальной точки на развертке и оценки направленности поля призматического искателя.

Безусловно, рассмотренный эталонный блок в ряде случаев может оказаться весьма полезным. Однако при использовании совершенной ультразвуковой аппаратуры, сконструированной с учетом требований, рассмотренных в гл. III, этот эталон нельзя признать достаточно эффективным. Действительно, по этому эталонному блоку не может быть воспроизведена или измерена условная чувствительность дефектоскопа с временной коррекцией усиления приемного тракта, так как для стандартизации чувствительности в блоке предусматривается всего один отражатель, да и то не обеспечивающий однозначной зависимости между диаметром отражателя и амплитудой эхо-сигнала при различ-

ной частоте ультразвука [186]. Точность определения центра излучения и угла ввода луча по данному блоку несколько ниже возможной, так как толщина блока, радиус полуцилиндрической поверхности и радиус цилиндрического отражателя далеки от оптимальных.

Рассмотренный эталон не позволяет также оценивать разрешающую способность и величину мертвой зоны дефектоскопа при работе с наклонными искателями. Наконец, необходимость изготовления каждого блока из металла, близкого по акустическим свойствам к контролируемому, сложная конфигурация блока, большие размеры и вес затрудняют его использование в производственных условиях. Очевидно, габариты и конфигурация эталона были выбраны из условий обеспечения возможности калибровки развертки по глубине. В современных отечественных дефектоскопах, имеющих глубиномеры, необходимость в калибровке развертки отпадает, что делает возможным упрощение конструкции эталона и уменьшение его веса. Еще меньшими возможностями обладают эталонные блоки [174], представляющие собой модификацию блока Международного института сварки.

По мнению автора, в ряде случаев более целесообразным является применение комплекта эталонов, разработанных НИИ мостов ЛИИЖТ с учетом изложенных принципов эталонирования [31, 51].

При разработке эталонов исходили из того, что в процессе прозвучивания швов на объекте необходимо систематически проверять только чувствительность и точность глубиномера. Остальные параметры контроля (углы ввода луча, величина мертвой зоны и разрешающая способность) достаточно измерять периодически в лабораторных условиях.

В связи с этим предложен комплект из трех эталонов (рис. 136, 137 и 138).

Эталон № 1 (рис. 136) позволяет выполнять следующие операции: определять условную чувствительность, необходимую для контроля данного соединения (искатель в положении *A*); настраивать дефектоскоп с искателем на заданную условную чувствительность; проверять точность работы глубиномера (искатель в положении *B*); оценивать разрешающую способность по дальности (искатель в положении *D*); измерять угол падения луча (искатель в положении *C*). Вес эталона № 1 около 0,3 кг, габариты 295 × 80 × 33 мм.

ному производству и ввести в ГОСТ 14782—69 «Швы сварных соединений. Методы ультразвуковой дефектоскопии».

Следует отметить, что после введения в дефектоскопы имитаторов дефектов [49] для настройки дефектоскопов на заданную условную чувствительность можно будет использовать модифицированные эталоны № 3 вместо эталонов № 1.

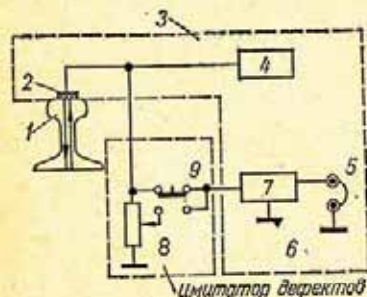


Рис. 139. Имитатор дефектов для количественной оценки условной чувствительности зеркально-теневого дефектоскопа с искателем:

1 — контролируемое изделие; 2 — искатель; 3 — типовой дефектоскоп; 4 — генератор УЗК; 5 — индикатор; 6 — регулятор чувствительности; 7 — приемный тракт; 8 — аттенюатор; 9 — кнопка.

Для эталонирования соответствующих параметров зеркально-теневого метода, кроме чувствительности, могут быть использованы те же эталоны. Эталонирование условной чувствительности зеркально-теневого дефектоскопа может быть выполнено с помощью калиброванного аттенюатора, включаемого на вход приемного тракта дефектоскопа, как показано на рис. 139 [42]. При нажатии кнопки амплитуда донного импульса на входе приемного тракта уменьшается до величины U_m , определяемой положением движка аттенюатора. Если движок аттенюатора установить в положение, при котором срабатывает индикатор дефектоскопа, то по шкале аттенюатора можно будет отсчитать величину ослабления $\frac{U_m}{U_0}$ донного сигнала, т. е. условную чувствительность. Предложенный аттенюатор, являющийся по существу имитатором дефектов в зеркально-теновом дефектоскопе, позволяет производить безэталонную настройку дефектоскопа на заданную чувствительность, проверять условную чувствительность дефектоскопа в процессе его эксплуатации, измерять коэффициент выявляемости обнаруженного дефекта и тем самым оценивать его эквивалентные размеры.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ

Под оптимальными параметрами следует понимать основные параметры такой величины, при которых обеспечивается наибольшая достоверность контроля.

Выбирать оптимальные параметры контроля нужно на основе теории статистических решений. В качестве характеристики полезных сигналов при этом могут быть использованы амплитуда эхо-сигналов, временное расположение этих эхо-сигналов, индикатриса рассеяния отражателя, спектральный состав и фаза эхо-сигнала и др.

Основными характеристиками полезного сигнала при ультразвуковом контроле эхо-методом в настоящее время являются амплитуды эхо-сигналов от дефекта, а также их временное распределение. Для количественной оценки амплитуды полезных эхо-сигналов и помех удобно ввести условный коэффициент выявляемости дефектов K_d и условный коэффициент помехи K_n при эхо-методе:

$$K_d = \frac{U_d}{U_0}, \quad (175)$$

$$K_n = \frac{U_n}{U_0}, \quad (176)$$

где U_d , U_n — амплитуда эхо-сигнала от дефекта и помехи соответственно; U_0 — амплитуда эхо-сигнала от бесконечной плоскости (донного эхо-сигнала), сдвинутого во времени по отношению к зондирующему импульсу так же, как эхо-сигнал от дефекта или помеха (рис. 140, а).

Бесконечная плоскость, ориентированная нормально к акустической оси искателя, в данном случае моделирует собой бесконечно большой, оптимальный с точки зрения выявляемости, дефект, расположенный на той же глубине, что и выявленный.

Если амплитуды U_d , U_n и U_0 выражены в децибелах, то

$$K_d = N_d - N_0;$$

и

$$K_n = N_n - N_0,$$

где N_d , N_0 и N_n — амплитуда эхо-сигнала от дефекта, от донной плоскости и амплитуда помехи соответственно.

Условный коэффициент выявляемости, характеризуемый выражением (175), лежит в пределах от 0 до 1. Как качественно, так и количественно он отличается от коэффициента выявляемости, введенного ранее Л. С. Шрайбером [160] и являющегося при контроле изделий, размеры прозвучиваемого сечения которых превышают размеры ультразвукового пучка, более точной характеристикой отражающих свойств дефекта. Однако предлагаемое понятие условного коэффициента выявляемости дефекта обладает несомненным преимуществом, позволяющим существенно упростить

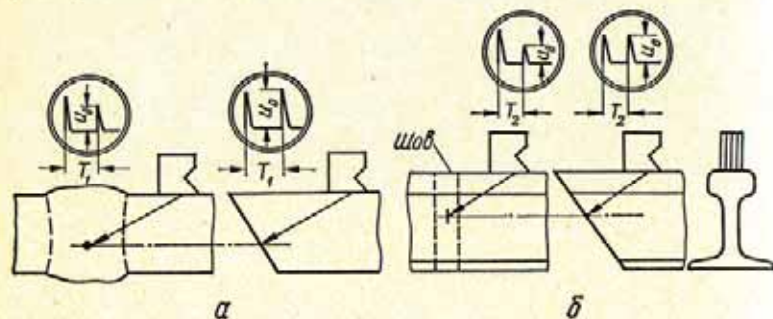


Рис. 140. Схема определения условного коэффициента выявляемости дефекта.

экспериментальное определение оптимальных параметров контроля, особенно при использовании наклонных искателей. Физический смысл этого коэффициента состоит в том, что он показывает, во сколько раз амплитуда эхосигнала от выявляемого дефекта меньше амплитуды эхосигнала от возможного, оптимального с точки зрения выявляемости, дефекта максимальных размеров, расположенного на той же глубине, что и выявляемый. Если размеры прозвучиваемого сечения равны или меньше размеров ультразвукового пучка, то тест-образец для измерения амплитуды U_0 от модели максимального дефекта должен быть изготовлен из образца контролируемого соединения (рис. 140, б).

Следует отметить, что разница в ординатах на АРД-диаграмме между любой точкой на линии донного эхосигнала и соответствующими точками линий дефектов есть не что иное, как условный коэффициент выявляемости дефектов в виде диска, нормального к акустической оси искателя. Если величину основных параметров выбирают по

амплитудному признаку, то оптимальными будут такие, которым соответствуют максимальные значения условных коэффициентов выявляемости дефектов и минимальные коэффициенты помех. Величина условных коэффициентов выявляемости дефектов при этом должна существенно превышать порог чувствительности аппаратуры по амплитуде эхо-сигналов.

Аналогично можно определить оптимальные параметры по другим характеристикам полезного сигнала и помехи. При этом под чувствительностью аппаратуры следует

понимать минимальную величину характеристики, которая может быть измерена этой аппаратурой.

Очевидно, что выбор оптимальных параметров следует начинать с определения оптимальных частот колебаний f , размеров преобразователя a и угла ввода луча α_1 . Для этого при необходимости проводят дефектоскопирование серии соединений данного вида при различных сочетаниях параметров f , a и α_1 и измеряют характеристики сигналов и помех, возникающих при прозвучивании каждого образца. Затем образцы просвечивают и при необходимости подвергают металлографическому исследованию.

Анализ данных исследований целесообразно проводить с помощью гистограмм, построенных для каждого сочетания параметров контроля f , a и α_1 . На оси абсцисс гистограммы откладывают значения характеристики сигнала и помехи (рис. 141). Если при эксперименте было использовано n частот, m пьезопреобразователей различного диаметра и k различных значений углов ввода луча, то общее число гистограмм $N = nmk$.

Сравнивая гистограммы, можно выбрать оптимальные параметры $f_{\text{опт}}$, $a_{\text{опт}}$ и $\alpha_{\text{опт}}$ для контроля сварных соединений данного вида и размеров. Безусловно, экспериментальные исследования нужно ограничивать таким диапазоном частот, размеров преобразователя и углов ввода

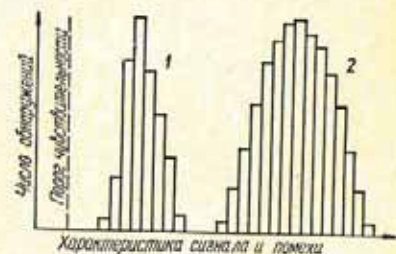


Рис. 141. Гистограммы результатов контроля сварных соединений при частоте ультразвука $f = f^1$, угле ввода луча $\alpha_1 = \alpha_1^1$ и диаметре пьезопреобразователя $a = a^1$: 1 — помехи; 2 — полезные сигналы.

луча, среди которых на основании расчетов и опыта ожидаются оптимальные значения [197].

При выбранных $f_{\text{опт}}$, $a_{\text{опт}}$ и $\alpha_{\text{опт}}$ чувствительность контроля будет обуславливаться только настройкой приемно-передающего тракта дефектоскопа. Оптимальная чувствительность, при которой оценивают качество сварного соединения, выбирают также на основе эксперимента из условия выполнения одного из критериев [149], например минимизации функции среднего риска (см. § 5 гл. VII). Однако в процессе поиска дефектов для повышения надежности обнаружения чувствительность увеличивают в 1,5—2 раза [119]. Такую чувствительность в отличие от оптимальной или исходной называют поисковой. Как оптимальную, так и поисковую чувствительности измеряют в единицах предельной (мм^2) или условной (мм) чувствительности.

Глава VII

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Методика ультразвукового контроля сварных швов во многом обуславливается типом и размерами соединений. Однако при этом существует ряд общих положений по прозвучиванию сварных швов, определению размеров и конфигурации дефектов, а также по оценке качества сварных соединений и сочетанию метода ультразвуковой дефектоскопии с другими методами контроля.

1. ПРОЗВУЧИВАНИЕ МЕТАЛЛА ШВА

При контроле качества сварных соединений необходимо обеспечивать тщательное прозвучивание металла шва. Ультразвуковые колебания вводятся в металл шва через основной металл с помощью наклонных искателей. Различают способы прозвучивания прямым, однократно, двукратно и многократно отраженными лучами (рис. 142).

Тип искателя, способ прозвучивания и метод перемещения искателя определяются типом и размерами сварного соединения, а также характером встречаемых в нем дефектов. Угол ввода колебаний выбирают таким, чтобы

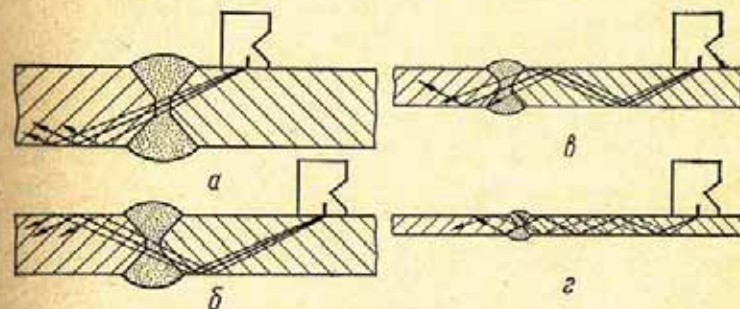


Рис. 142. Способы прозвучивания металла шва лучом:
а — прямым; б — однократно отраженным; в — двукратно отраженным;
г — многократно отраженным.

расстояние от искателя до шва было как можно меньшим, а направление луча — возможно близким к нормали к такому сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальна. Поэтому двукратно и многократно отраженным лучом контролируют в том случае, если размеры валика усиления шва не позволяют прозвучивать шов прямым или однократно отраженным лучом при оптимальном угле ввода луча.

Особое внимание должно быть уделено тем дефектам, отражение от которых можно получить лишь тогда, когда их поверхность перпендикулярна акустической оси искателя (рис. 143).

Контроль сварных швов, как правило, осуществляют эхо-методом с включением искателя по совмещенной схеме. Раздельную и раздельно-совмещенную схемы включения искателей применяют, если контроль по совмещенной схеме не обеспечивает достаточную надежность и достоверность.

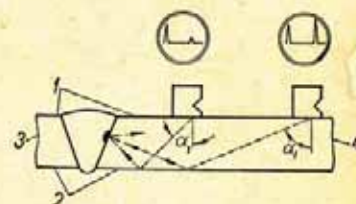


Рис. 143. Выявление дефекта при различных углах ввода луча α_1 .
1 и 2 — поверхности соединения;
3 и 4 — стороны соединения.

Надежность прозвучивания во многом определяется качеством акустического контакта между изделием и искателем. С целью обеспечения акустического контакта производят соответствующую подготовку поверхности металла и смачивание ее слоем контактирующей среды. В случае применения призматических искателей подготовка поверхности сводится лишь к удалению выпуклостей и брызг металла, отслаивающейся ржавчины и грязи.

Во избежание быстрого износа призмы в процессе прозвучивания нажим на искатель должен быть минимальным, лишь обеспечивающим плотное прилегание призмы к поверхности металла.

Эффективным средством снижения интенсивности износа призм является применение полиэтиленовых прокладок, через которые вводятся ультразвуковые колебания в металл [32].

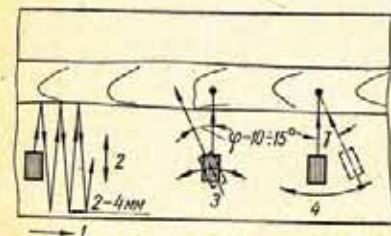


Рис. 144. Схемы сканирования шва: 1 — продольное; 2 — поперечное; 3 — вращательное; 4 — поворотное.

Качество акустического контакта зависит также от формы рабочей поверхности искателя и конфигурации изделия. При прозвучивании поперечных сварных соединений металла цилиндрической формы с радиусом кривизны свыше 100 мм применяют искатели с плоской поверхностью. При малых радиусах цилиндрических поверхностей для улучшения акустического контакта рабочую поверхность искателя притирают к цилиндрической поверхности изделия. Если прозвучивание шва производят в направлении, перпендикулярном к образующей цилиндрической поверхности, то искатели с плоской поверхностью можно использовать лишь при радиусе кривизны более 300 мм. Продольные швы в конструкциях цилиндрической формы с радиусом кривизны менее 300 мм ультразвуком не контролируют, так как достичь при этом удовлетворительного контакта даже путем притирки искателей не удается.

Прозвучивание всего объема наплавленного металла, как правило, обеспечивается за счет продольно-поперечного сканирования искателем (рис. 144). Шаг поперечного сканирования должен быть меньше размеров сечения

ультразвукового пучка на уровне 0,8 диаграммы направленности и практически составляет 2—4 мм. Для повышения надежности контроля в процессе сканирования осуществляют непрерывные вращательные движения искателя на угол $|\varphi| \approx 10-15^\circ$ от положения, при котором ось луча нормальна к продольной оси шва (рис. 144).

Для выявления ориентированных различным образом дефектов сварной шов при возможности прозвучивают с двух сторон. Следует различать термины стороны и поверхности сварного соединения (рис. 143).

Прозвучивание соединений вначале осуществляют при поисковой чувствительности, превышающей оптимальную. На вход приемного тракта дефектоскопа, кроме полезных эхо-сигналов, могут поступать помехи. Если частота ультразвука выбрана верно, то, как правило, главным видом помех являются ложные эхо-сигналы от подрезов допустимых размеров и от неровностей на поверхности валика усиления. Распределение во времени возможных сигналов, поступающих в общем случае на вход приемного тракта дефектоскопа, показано на рис. 145 на примере прозвучивания стыкового шва.

Сигналы помех в отдельности ничем не отличаются от полезных сигналов, отраженных от дефектов. Их появление не может быть предугадано и в этом отношении они являются случайными. Однако при контроле соединений заданного типоразмера можно предопределить вероятные области временного сдвига помех по отношению к зондирующему импульсу.

В связи с этим основным способом выделения полезного сигнала из совокупности ложных в настоящее время оказывается способ временного селектирования. Длительность t_c селектирующего импульса и временной сдвиг T его по отношению к зондирующему импульсу при идеализации ультразвукового пучка нерасходящимся лучом, совпадающим с осью диаграммы направленности искателя, можно определить из выражения (рис. 145, б, г)

$$t_c = \frac{2H}{C_{\text{из}}} \sec \alpha_0;$$

при контроле отраженным лучом —

$$T = \frac{2(n^2 + \Delta_n)}{C_{\text{из}}} \sec \alpha_0 + 2t_n; \quad (177)$$

при контроле прямым лучом —

$$T = 2t_n,$$

где $H = \delta - (\Delta_n + \Delta_v)$ — толщина контролируемого слоя; Δ_n и Δ_v — расстояния границ контролируемого слоя соответственно от поверхности, ближней по ходу луча и дальней; δ — толщина листа; n — число отражений, претерпеваемых ультразвуковым лучом между поверхностями металла до входа в шов.

Если принять $H = \delta$, т. е. $\Delta_n = \Delta_v = 0$, то через селектирующую систему будут проходить сигналы помехи. В действительности сигналы помехи могут проникать на выход селектирующей системы также при $\Delta_n > 0$ и $\Delta_v > 0$, что связано с расхождением ультразвукового пучка. В связи с этим для повышения помехоустойчивости метода необходимо так выбирать параметры сканирования (пределы перемещения искателя и угол ввода луча) и параметры селектирующей системы (величины T , t_c , H , Δ_n и Δ_v), чтобы вероятность проникновения сигналов на индикаторы дефектоскопа была минимальной.

Для снижения вероятности регистрации сигнала помехи, вызванного подрезом, целесообразно устанавливать точку отражения оси луча от поверхности металла (точка a на рис. 145, δ) так, чтобы подрез озвучивался под углом ψ_n к акустической оси искателя, соответствующим ослаблению помехи в $\Phi^2(\psi_n)$ от возможного максимального значения $\Phi^2(0)$. Минимально допустимое расстояние L_{min} между центром излучения искателя и валиком усиления при прозвучивании отраженным лучом, удовлетворяющее поставленному условию, определяется выражением

$$L_{min} = n\delta \operatorname{tg} \alpha_0 + z.$$

Здесь и далее в гл. VII $\alpha_1 \approx \alpha_0$. Из Δabc (рис. 145, δ) находим

$$z = ac = ab \frac{1}{\sin [90^\circ - (\alpha_0 + \psi_n)]} = ob \operatorname{tg} \psi_n \frac{1}{\cos (\alpha_0 + \psi_n)}.$$

Учитывая, что $ob \approx oa \approx n\delta \frac{1}{\cos \alpha_0}$,

$$\psi_n \ll 9^\circ, \operatorname{tg} \psi_n \approx \sin \psi_n \approx \psi_n, \cos \psi_n \approx 1, \\ \cos (\alpha_0 + \psi_n) \approx \cos \alpha_0 - \psi_n \sin \alpha_0,$$

получим

$$z \approx n\delta \frac{\psi_n}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_0 - \psi_n \sin \alpha_0}. \quad (178)$$

Для полного прозвучивания верхней половины шва угол α_0 ввода луча должен быть таким, чтобы при расстоянии L_{min} искателя от кромки шва ось луча пересекала

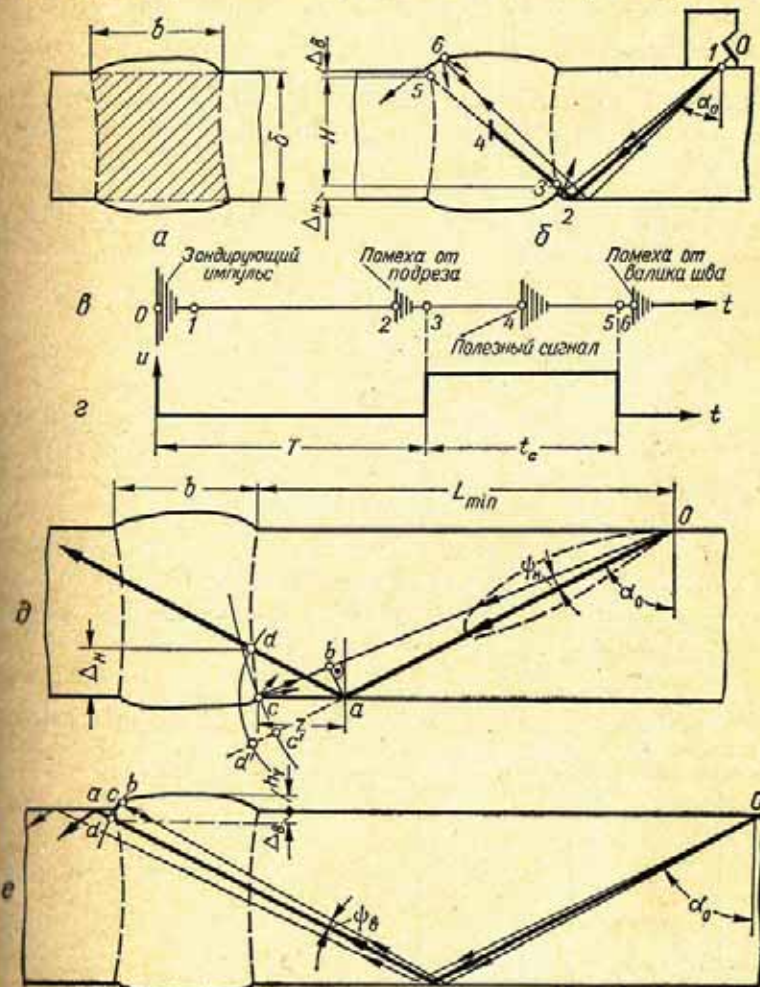


Рис. 145. Схема расчета параметров сканирования сварного соединения.

ось симметрии соединения на глубине $\approx 0,5 \delta$, т. е.

$$\alpha_0 > \arctg \frac{0,5\delta + z}{0,5\delta} = \arctg \left[\frac{b}{\delta} + \frac{2n\psi_n}{(\cos \alpha_0 - \psi_n \sin \alpha_0) \cos \alpha_0} \right]. \quad (179)$$

Значение ψ_n выбираем с учетом особенностей выявляемости подреза максимально допустимой глубины по сравнению с минимальным дефектом, подлежащим обнаружению. Для количественной оценки выявляемости введем коэффициент $K_m = \frac{U_n}{U_d}$, где U_n и U_d — максимальные амплитуды эхо-сигналов от подрезов и минимального дефекта соответственно при расположении их на акустической оси искателя.

При озвучивании подреза под углом ψ_n отношение амплитуды эхо-сигнала от подреза (амплитуда помехи) к максимальной амплитуде эхо-сигнала от минимального дефекта (амплитуда сигнала) будет

$$\frac{U_n \Phi^2(\psi_n)}{U_d} = K_m \Phi^2(\psi_n).$$

Задаваясь отношением помеха/сигнал, равным N , где $N < 1$, получаем выражение для расчета угла ψ_n :

$$K_m \Phi^2(\psi_n) \leq N. \quad (180)$$

Величина K_m зависит от угла ввода луча, толщины соединения и должна определяться экспериментально с учетом требований к качеству сварных соединений данного типоразмера.

Таблица 15

Результаты экспериментальных исследований отражающих свойств подрезов и отверстий с плоским дном

α_0	Амплитуда эхо-сигнала, отр. дб			$K_m = \frac{U_{n1}}{U_d}$	$K_m = \frac{U_{n2}}{U_d}$
	от дна отверстия площадью $S_0 = 4,5 \text{ мм}^2$ U_d	от подреза глубиной 0,5 мм U_{n1}	от подреза глубиной 1,0 мм U_{n2}		
39	18,0	10,5	1,5	2,4	6,7
50	20,1	18,2	14,1	1,3	2,0
65	28,5	42,0	29,5	0,2	1,0

Примечания: 1. Приведены усредненные значения 20 измерений.
2. Измерения выполнены искателем с параметрами: $f = 2,5 \text{ МГц}$, $a = 6 \text{ мм}$.

Согласно действующим нормативным документам [116], ультразвуковому контролю подвергаются соединения, не имеющие подрезов глубиной 0,5—1 мм. Как показывают измерения (см. табл. 15), при толщине соединения 30 мм такие подрезы по своим отражающим свойствам эквивалентны отверстиям с плоским дном, площадь которых в зависимости от угла ввода луча приблизительно составляет $(0,2 \div 7,0) S_0$, где $S_0 = 4,5 \text{ мм}^2$ — площадь отверстия, соответствующего эквивалентной площади минимального дефекта, подлежащего выявлению во многих сварных соединениях, в частности, в некоторых соединениях, используемых в конструкциях железнодорожного транспорта.

Как видно из табл. 15, для углов ввода луча $\alpha_0 = 50 \div 65^\circ$, применяемых при контроле сварных соединений, $K_m = 0,2 \div 2$.

Если расстояние $L_{\min}$ и угол α_0 выбраны в соответствии с выражениями (178) и (179), то ось ультразвукового луча будет входить в наплавленный металл на расстоянии Δ_n от отражающей плоскости (точка d на рис. 145, б):

$$\Delta_n = z \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_0) = \frac{n\delta\psi_n}{\sin \alpha_0 (\cos \alpha_0 - \psi_n \sin \alpha_0)}. \quad (181)$$

При этом минимальный временной сдвиг между полезным сигналом и помехой (см. рис. 145, б)

$$\Delta t \approx \frac{2ad'}{c_{t2}} - \frac{2ac'}{c_{t2}}$$

$$\Delta t \approx \frac{2}{c_{t2}} (ad - bc) = \frac{2}{c_{t2}} \left[\frac{z}{\sin \alpha_0} - z \sin(\alpha_0 + \psi_n) \right]. \quad (182)$$

Если $\Delta t \geq \tau$, где τ — длительность эхо-сигнала, то отраженный от подреза импульс не пройдет через селективную систему. Из выражений (178) и (182) легко получить значение τ_d , при котором исключается индикация помехи при любой ее амплитуде:

$$\tau_d \leq \frac{2n\delta\psi_n}{c_{t2} \sin \alpha_0}. \quad (183)$$

Таким образом, принципиально возможны два способа снижения вероятности индикации помехи, вызываемой подрезом:

1) предусматривающий снижение соотношения помеха/сигнал до необходимого заданного уровня N ; ψ_n рассчитывают по выражению (180);

2) предусматривающий увеличение временного интервала между сигналом и помехой до значения, равного или превышающего длительность импульсов на входе селектирующей системы; ψ_n рассчитывают по выражению (183).

Оба способа равноценны и в каждом отдельном случае предпочтение следует отдавать тому, который реализуется при меньшем значении ψ_n .

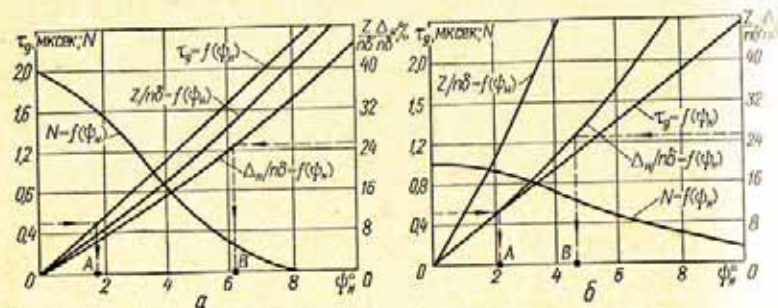


Рис. 146. Графики для расчета угла ψ_n озвучивания подреза шва:
а — при $\alpha_0 = 50^\circ$; б — при $\alpha_0 = 65^\circ$.

На рис. 146 в качестве примера представлены расчетные зависимости отношения помеха/сигнал N , максимальной длительности зондирующего импульса τ_δ и отношений $\frac{\Delta_n}{n\delta}$ и $\frac{z}{n\delta}$ от угла ψ_n . Функции $N = f_1(\psi_n)$ и $\tau_\delta = f_2(\psi_n)$ рассчитаны для типовых искателей и для наименее благоприятных случаев: $K_m = K_{m\max}$ и $\delta = \delta_{\min} = 20$ мм.

Из всей совокупности углов ψ_n , изображенных на рис. 146, практически могут быть использованы углы, при которых $\frac{\Delta_n}{n\delta} < 0,25$, что обеспечивает возможность наиболее полного прозвучивания наплавленного металла одним искателем, т. е. $\psi_n < B$. При этом соотношение помеха/сигнал оказывается равным $N \geq 0,6$ для $\alpha_0 \approx 65^\circ$ и $N \geq 0,3$ для $\alpha_0 \approx 50^\circ$, что является недостаточным для полного исключения индикации помех. Индикация помех будет исключена, если длительность эхо-сигналов на входе се-

лектирующей системы при заданном угле ψ_n не превышает соответствующей ему величины τ_δ . При $\psi_n < B$, $\tau_\delta < 1$ мксек. В связи с тем, что длительность зондирующего импульса обычно превышает полученное значение, предложено преобразовывать эхо-сигналы в импульсы малой длительности, совпадающие с передним фронтом эхо-сигналов, и только затем подавать их на вход селектирующей системы [22]. При преобразовании без особого усложнения схемы дефектоскопа могут быть получены импульсы длительностью примерно 0,5 мксек. Принимая $\tau_{\delta\min} = 0,5$ мксек, по графикам, приведенным на рис. 146, находим минимальные значения углов $\psi_{n\min} = A$. Таким образом, рабочая область углов ψ_n лежит в пределах $A < \psi_n < B$. Выбрав на этой области угол ψ_n , удовлетворяющий выражению (183), по графикам (рис. 146) можно определить параметры z и Δ_n , соблюдение которых при прозвучивании шва существенно снизит вероятность индикации помех, вызванных подрезами.

Для снижения вероятности регистрации ложных эхо-сигналов, вызванных неровностями валика усиления, дальнего по ходу луча (см. рис. 145, е), необходимо так выбрать величину Δ_n , чтобы амплитуда ложного сигнала, совпадающего по времени с концом селектирующего импульса, была бы ослаблена в $\Phi^2(\psi_n)$ раз по сравнению с возможной максимальной величиной $\Phi^2(0)$. Из рис. 145, е находим величину Δ_n , соответствующую поставленной условию

$$\Delta_n = cd = ad \cos \alpha_0,$$

$$ad = oa - ob = \delta(n+1) \frac{1}{\cos \alpha_0} - [\delta(n+1) + h_y] \frac{1}{\cos(\alpha_0 - \psi_n)}.$$

Учитывая, что практически $h_y \approx (0 \div 3)$ мм и что $\Delta_n \ll \delta(n+1)$, получаем

$$\Delta_n \approx \delta(n+1) \left[1 - \frac{\cos \alpha_0}{\cos(\alpha_0 - \psi_n)} \right]. \quad (184)$$

Очевидно, что чем больше ψ_n , тем меньше амплитуда ложного сигнала, совпадающего с задним фронтом стро-бирующего импульса. Однако чрезмерное увеличение ψ_n может привести к пропуску дефектов, расположенных

вблизи поверхности. В связи с этим величину ψ_a следует выбирать такой, чтобы с одной стороны максимально снизить амплитуду помехи, а с другой — обеспечить выявление недопустимых дефектов, расположенных у поверхности соединения. При этом следует учитывать, что такие дефекты совместно с поверхностью соединения образуют сложный отражатель, амплитуда U_d эхо-сигнала от которого будет в q раз превышать амплитуду U_0 эхо-сигнала от такого же дефекта, но не граничащего с поверхностью изделия.

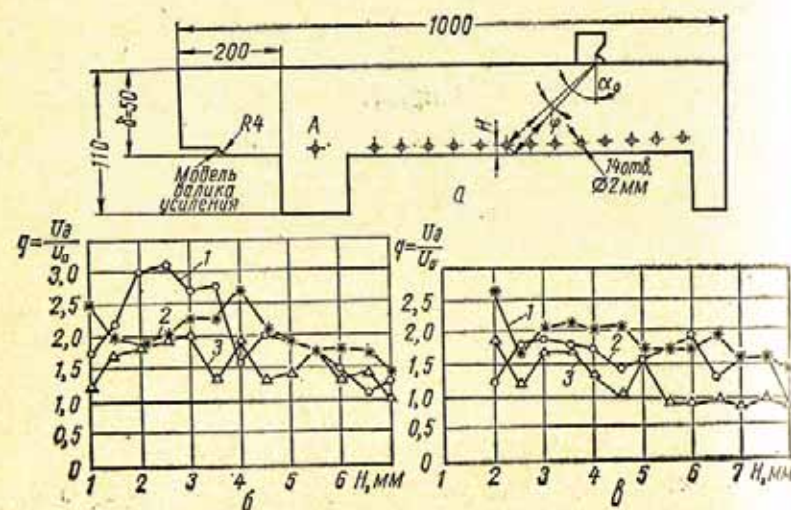


Рис. 147. Образец для экспериментальных исследований (а) и зависимости амплитуды U_d эхо-сигналов от расстояния H (U_0 — амплитуда эхо-сигнала при $H = \infty$, дефект А):

б — измерения производились на аппарате ДУК-11ИМ с частотой $f = 2,5$ МГц (1 — при $\beta = 30^\circ$; 2 — при $\beta = 40^\circ$; 3 — при $\beta = 50^\circ$); б — измерения производились на аппарате ДУК-5В с $\beta = 40^\circ$ (1 — при $f = 1,8$ МГц; 2 — при $f = 2,5$ МГц; 3 — при $f = 5,0$ МГц).

Очевидно, что значение q будет зависеть от соотношения длины волны λ и расстояния H между дефектом и поверхностью, а также от угла α_0 , т. е. $q = F(H, \lambda, \alpha_0)$. Максимальное значение q при данном расстоянии H может быть получено подбором соответствующей длины волны.

Исследования отражающих свойств дефектов в зависимости от расстояния H до поверхности, выполненные на образце из стали (рис. 147, а), подтверждают немонотонную зависимость величины q от расстояния H (рис.

147, б, в) и показывают, что применение частотно-модулированных ультразвуковых колебаний позволит улучшить выявляемость дефектов, расположенных у поверхности изделия. Из рис. 147 видно, что для искателей с углом $\beta = 30 + 40^\circ$ амплитуды эхо-сигналов от дефектов, образующих с поверхностью сложный отражатель, превышают в 2—3 раза амплитуду эхо-сигнала от аналогичного дефекта А, удаленного от поверхности ($q \geq 2$). В случае применения искателей с углом $\beta = 50^\circ$ амплитуда эхо-сигнала в меньшей степени зависит от расстояния между дефектом и поверхностью ($q \leq 1,5$), что связано с частичной трансформацией поперечной волны при образовании дефектом и поверхностью изделия сложного отражателя. Это согласуется с результатами исследований отражающих свойств угловых отражателей (см. гл. IV). В то же время амплитуда U_n эхо-сигнала от валика усиления шва, сваренного автоматом, как правило, в p раз меньше амплитуды U_0 эхо-сигналов от внутренних дефектов. Измерения уровня превышения полезных эхо-сигналов U_d от отверстия с плоским дном $S_0 = 4,5$ мм² и эхо-сигналов U_n от модели валика усиления, форма и размеры которого приведены на рис. 147, а, показывают, что уровень p возрастает с увеличением угла ввода луча и составляет:

β , град	p , db
30	5
40	7
50	28

Тогда отношение K_c сигнал/помеха при озвучивании рассматриваемых дефектов и валика шва акустической осью искателя составит

$$K_c = \frac{U_d}{U_n} = \frac{U_d}{U_0} \cdot \frac{U_0}{U_n} = qp.$$

В случае озвучивания дефекта акустической осью искателя ($\psi = 0$), а валика шва боковой частью луча под углом $\psi = \psi_n$, соотношение сигнал/помеха будет равно

$$K_c = \frac{U_d}{U_n \Phi^2(\psi_n)} = \frac{qp}{\Phi^2(\psi_n)}. \quad (185)$$

Полагая достаточным, чтобы амплитуда U_d полезного сигнала превышала в 10 раз амплитуду $U_n \Phi^2(\psi_n)$

помехи, совпадающей по времени с задним фронтом селектирующего импульса, т. е. чтобы $K_c \geq 10$, из выражения (185) получаем

$$\Phi(\psi_n) \approx 0,3 \sqrt{qr}. \quad (186)$$

На рис. 148 приведены зависимости, рассчитанные по выражениям (184) и (186). Зная qr , по этим выражениям можно определить величины ψ_n и $\frac{\Delta_n}{\delta(n+1)}$, снижаю-

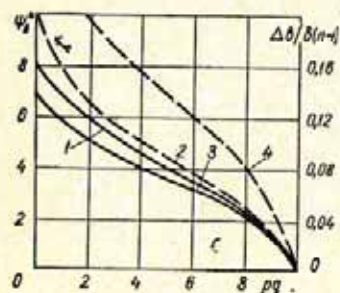


Рис. 148. Графики для определения величин ψ_n и $\frac{\Delta_n}{\delta(n+1)}$, снижающих вероятность индикации ложных эхо-сигналов от неровностей валика усиления:
1 — $\psi_n = F(qr)$, $\alpha_n = 50^\circ$; 2 — $\psi_n = F(qr)$, $\alpha_n = 65^\circ$; 3 — $\frac{\Delta_n}{\delta(n+1)}$, $\alpha_n = 50^\circ$; 4 — $\frac{\Delta_n}{\delta(n+1)}$, $\alpha_n = 65^\circ$.

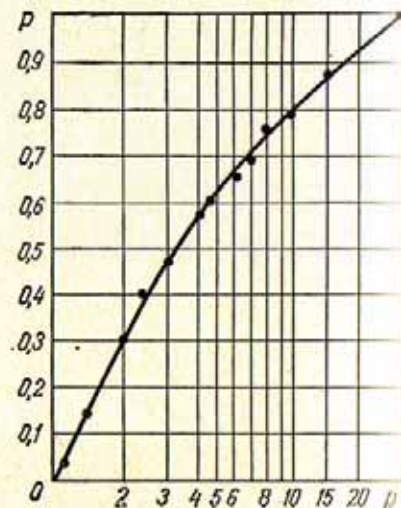


Рис. 149. Эмпирическая функция распределения, характеризующая частоту P обнаружения дефектов, амплитуда от которых в r раз и менее превышает амплитуду эхо-сигнала от валика усиления шва.

щие вероятность индикации ложных эхо-сигналов от неровностей валика усиления. Значение qr следует определять экспериментально для каждого вида сварного соединения и каждого угла ввода луча.

На рис. 149 приведена эмпирическая функция распределения для группы стыковых швов толщиной 20—50 мм, характеризующая частоту P обнаружения дефектов, амплитуда от которых в r раз и менее превышает амплитуду эхо-сигнала от валика усиления шва. Из рис. 149 следует, что с вероятностью $P \approx 0,5$ значение $r \approx 3,5$.

Полагая, что для рассматриваемого вида соединений $p \approx 4$ и $q \approx 2$, по рис. 148 легко найти соответствующие значения Δ_n и ψ_n , снижающие вероятность индикации ложных эхо-сигналов от неровностей валика усиления.

Таким образом, применяя частотно-модулированные колебания, нормализацию по длительности эхо-сигналов перед подачей их на вход селектирующей системы, а также оптимальные параметры сканирования (угол ввода луча и пределы перемещения искателя) и селектирования (длительность и задержку стробимпульса), можно существенно повысить помехоустойчивость ультразвукового контроля сварных швов.

Способ контроля сварных швов, использующий описанные рекомендации, здесь и далее будем называть способом контроля швов по слоям*.

Очевидно, что выбор оптимальных с точки зрения помехоустойчивости параметров этого способа требует постановки серьезного эксперимента на многочисленных образцах сварных швов и на реальных сварных соединениях. Если это сделать трудно, можно воспользоваться данными, полученными на основе накопленного опыта дефектоскопирования (табл. 16).

Таблица 16

Экспериментальные значения параметров способа контроля сварных соединений по слоям

Толщина свариваемых листов δ , мм	α_1 , град	z , мм	Δ_n	Δ_n
15—25	70—65	2—4	1—2	1—2
25—35	65—60	3—6	2—3	2—3
35—60	65—50	5—9	2—6	2—5
60—150	65—40	8—10	6—10	5—10

Примечание. Швы выполнены автоматической сваркой.

Следует отметить, что при прозвучивании стыковых соединений малой толщины ($\delta < 15$ мм) способ контроля по слоям может оказаться малоэффективным. В этом слу-

* Принцип способа контроля швов по слоям зарегистрирован в Государственном комитете по делам изобретений и открытий СССР с приоритетом от 18 мая 1958 г.

чае следует использовать другие меры по повышению помехоустойчивости [120, 121, 181].

Перед прозвучиванием соединений необходимо проверять соответствие основных параметров параметрам, заданным инструкцией. Признаком обнаружения дефектов при прозвучивании является срабатывание индикаторов дефектоскопа. Очевидно, что срабатывание индикаторов может произойти и при воздействии импульсов помехи, вызванной отражениями зондирующего импульса от неровностей поверхности соединения. Чтобы отличить полезный эхо-сигнал от ложного, нужно прежде всего измерить координаты отражающей поверхности. Измеряя координаты, можно, кроме того, получить информацию о характере предполагаемого дефекта, если известны области, в которых наиболее вероятно образование дефектов определенного типа.

Чтобы определить, является ли выявленная несплошность допустимым или недопустимым дефектом, в ряде случаев необходимо знать характер и размеры этого включения.

Основными измеряемыми характеристиками выявленных при ультразвуковом контроле дефектов, кроме координат расположения, являются эквивалентная площадь дефекта, его конфигурация, ориентация и условные размеры.

Рассмотрим методы и особенности измерения этих характеристик дефектов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ

В практике ультразвукового контроля для определения координат H и L применяют глубиномеры, встроенные в дефектоскопы, координатные линейки или шаблоны, а также шкалы или маски, размещаемые на экранах электронно-лучевых трубок дефектоскопов с предварительно прокалиброванной по длительности разверткой.

При любом виде глубиномера расстояние L от точки ввода луча до дефекта при прозвучивании однократно и многократно отраженными лучами отсчитывают непосредственно по шкале. Глубину расположения дефекта от поверхности, на которой установлен искатель, определяют непосредственно по показаниям глубиномера линии при прозвучивании прямым лучом. Если прозвучивание

ведется отраженным лучом, то истинное значение глубины рассчитывают по следующим формулам:

при нечетном n

$$H = (1 + n)\delta - H_{г\lambda}; \quad (187)$$

при четном n

$$H = H_{г\lambda} - n\delta,$$

где H — глубина расположения дефекта от поверхности прозвучивания; $H_{г\lambda}$ — показания глубиномера; δ — толщина металла; n — число отражений.

Определяя координаты, необходимо принимать все возможные меры, предотвращающие или уменьшающие случайную и суммарную систематическую ошибки измерения.

Для уменьшения случайной ошибки на время измерения координат наклонным искателем целесообразно вводить максимально возможную отсечку (ограничение) эхосигналов и увеличивать длительность развертки.

Если случайная ошибка не превышает 4% измеряемой координаты, то суммарная систематическая погрешность может иногда достигать 100% и более. Суммарная систематическая погрешность A_2 алгебраически складывается из возможных систематических ошибок, связанных с погрешностью глубиномера (A_T) и отклонением истинных значений скорости (A_c), времени акустической задержки (A_t) и угла ввода луча (A_a) от значений, принятых при градуировке глубиномера:

$$A_2 = A_T + A_c + A_t + A_a. \quad (188)$$

В свою очередь, ошибка A_a образуется из ошибок A_a^I , A_a^{II} , A_a^{III} и A_a^{IV} , возникающих вследствие причин, приводящих к изменению угла ввода луча:

а) изменение угла призмы на величину $\Delta\beta$ вследствие истирания; б) случайный подъем призмы на угол θ ; в) изменение температуры призмы; г) затухание ультразвука на пути до дефекта.

Погрешности A_a^I и A_a^{II} следует учитывать, если угол наклона призмы $\Delta\beta > 1^\circ$ или угол ее подъема $\theta > 0,5^\circ$. Если величина α_{10} задана при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, то погрешностью A_a^{III} в диапазоне температур $t = 5-40^\circ\text{C}$ можно пренебречь при $\alpha_{10} < 55^\circ$.

Ошибка A_{α}^{IV} , связанная с затуханием ультразвука, возрастает с увеличением коэффициента затухания, глубины H и угла ввода луча α_{10} . Ее величина оказывается значительной только при контроле соединений толщиной более 150 мм; при меньших толщинах этой погрешностью можно пренебречь.

Для оценки влияния различных факторов на величину суммарной погрешности измерения координат расположения дефектов в сварных швах рассмотрим вполне реальные для практики дефектоскопии обстоятельства, при которых складываются отдельные систематические ошибки.

Предположим, что в заводских условиях выполняется контроль сварных соединений различной толщины δ из металлов с коэффициентом затухания ультразвука примерно $0,001 \text{ мм}^{-1}$; возможное отклонение скоростей C_t ультразвука в этих металлах составляет не более 2% от номинальной величины. Для прозвучивания выбраны искатели, угол ввода луча α_1 , у которых при температуре $t_n = 10^\circ\text{C}$ указан в табл. 17 и 18. Температура в цехе, где выполняется контроль, $t_k = 25^\circ\text{C}$. В процессе прозвучивания произошел некоторый износ призмы, в связи с чем их высота уменьшилась на $\Delta h = 1 \text{ мм}$, а угол призмы β увеличился на величину $\Delta\beta = 1^\circ$; вследствие отдельных неровностей величиной $0,1-0,2 \text{ мм}$ на поверхности наблюдается систематический подъем призмы на угол $\theta \approx 0,5^\circ$.

Максимальные значения этих погрешностей для изложенных условий контроля, рассчитанные по приведенным в главе VI формулам, сведены в табл. 17 и 18.

Таблица 17

Ошибки измерения глубины H , вызванные различными факторами при контроле соединений листов толщиной δ

$\delta, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	$\beta,^\circ$	$\alpha_{10},^\circ$	Ошибка, %								Суммарная ошибка	
				A_T	A_C	A_t	A_{α}^I	A_{α}^{II}	A_{α}^{III}	A_{α}	A_{α}^{IV}	A_{Σ}	$\Delta H, \text{мм}$
5—10	7	52	70	8	17	-9,5	16	20	12	48	63,5	4,4	
30—50	40	50	65	1,5	9	-2	10	13	9	32	40,5	16	
60—150	100	40	50	1	1	-1	4	4	2,5	10,5	11,5	11,5	
200—400	300	30	40	0,4	-1	-0,3	2	2	1	5	4	12	

Таблица 18

Ошибки измерения расстояния L , вызванные различными факторами при контроле соединений листов толщиной δ

$\delta, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	$\beta,^\circ$	$\alpha_{10},^\circ$	Ошибка, %							Суммарная ошибка $A_{\Sigma}, \%$
				A_T	A_C	A_t	A_{α}^I	A_{α}^{II}	A_{α}^{III}	A_{α}	
5—10	7	52	70	8	-4	-9,5	-1	-1,5	-1	-3,5	-9
30—50	40	50	65	1,7	-4	-2	-1,5	-2	-1,5	-5	-9
60—150	100	40	50	1	-4	-1	-3	-3	-2	-8	-12
200—400	300	30	40	0,4	-4	-0,3	-3	-3	-1	-7	-11

Как видно из табл. 17, величина систематических ошибок измерения глубины H возрастает с уменьшением измеряемой глубины и с увеличением угла ввода луча. Поэтому при

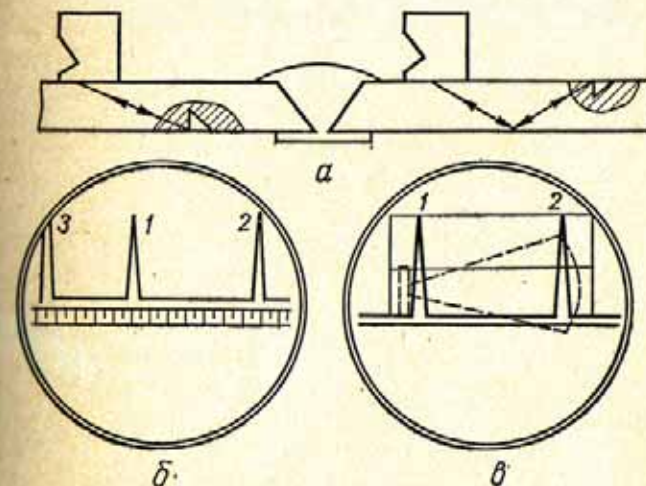


Рис. 150. Измерение координат дефектов при контроле сварных швов малой толщины:

а — тест-образец для калибровки развертки; б — экран со шкалой; в — экран с маской; 1 — эхо-сигнал от нижнего контрольного отражателя; 2 — эхо-сигнал от верхнего контрольного отражателя; 3 — зондирующий импульс.

контроле швов малой толщины, где применяются большие углы ввода луча, возникновение существенных погрешностей измерения координат отражающих поверхностей наиболее вероятно.

Для обеспечения необходимой точности измерения при контроле швов малой толщины определять координаты удобно непосредственно по развертке трубки, систематически калибруя ее по тест-образцу с моделями дефектов в виде угловых или сегментных отражателей (рис. 150) [121, 171].

При контроле швов средней толщины (25—100 мм) вероятность возникновения серьезных систематических ошибок мала. Эта вероятность вновь возрастает при контроле соединений большой толщины (более 150 мм) из металла со значительным коэффициентом затухания. В этом случае необходимо вводить поправку к показанию глубиномера, учитывающую изменение угла ввода луча вследствие затухания ультразвука.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ

Эквивалентным размером дефекта называется размер модели дефекта типа плоскодонного отверстия, расположенного на том же расстоянии от искателя, что и естественный дефект и дающего эхо-сигнал такой же амплитуды. При этом для получения удовлетворительной точности измерений образец с моделями дефектов должен быть изготовлен из того же материала, что и изделие. Поверхность изделия и образца должна иметь одинаковую чистоту обработки.

Соотношение между эквивалентной площадью модели дефекта S_e и площадью S_0 реального дефекта называется коэффициентом выявляемости. Если дефект объемный, то имеется в виду площадь его поперечного сечения. Этот коэффициент отличается от условного. Величина его зависит от формы, ориентации и отражающих свойств дефекта. Практика ультразвукового контроля показала, что эквивалентный размер дефекта является весьма полезной характеристикой для оценки качества сварного соединения.

Необходимость изготовления и использования наборов тест-образцов с моделями дефектов весьма затрудняет проведение ультразвукового контроля. В связи с этим разработана методика определения эквивалентных размеров дефектов без применения тест-образцов. Для этого нужно иметь измеритель амплитуд входных эхо-сигналов (имитатор дефектов) и АРД-диаграмму [76, 181, 185, 207]. Удобнее использовать специальную АРД-диаграмму, построенную для

искателя, которым выполняется контроль. Такая диаграмма строится с помощью общей АРД-диаграммы (см. рис. 84) и отличается от нее тем, что диаметр дефекта и расстояние до него откладываются не в миллиметрах, а в безразмерных величинах. На рис. 151 приведена специализированная АРД-диаграмма для серийно выпускаемого искателя. Специализированную АРД-

диаграмму для удобства работы вставляют в планшет, у которого имеется прозрачный диск с нанесенной сеткой горизонтальных линий. Диск может поворачиваться на некоторый угол и это позволяет учитывать затухание ультразвука. Если коэффициент затухания ультразвука δ известен, то следует повернуть диск так, чтобы ось абсцисс на шкале «Затухание» планшета указывала на деление, соответствующее значению δ . При дальнейших расчетах пользуются косоугольной системой координат, образуемой вертикальными линиями АРД-диаграммы и наклонными линиями диска.

Затем необходимо совместить показания шкал аттенуатора или имитатора дефектов с делениями оси ординат АРД-диаграммы. В результате этой операции значение «0 децибел» на шкалах измерителя амплитуд сигналов будет соответствовать максимальной величине эхо-сигнала, равной $P_0 D_{i,1}$. Совмещение шкал удобно выполнять по донному сигналу для нормальных искателей, по сигналу от двугранного угла для наклонных плексигласовых искателей с углами β , равными 30 и 40°, или по сигналу от образца с цилиндрической отражающей поверхностью —

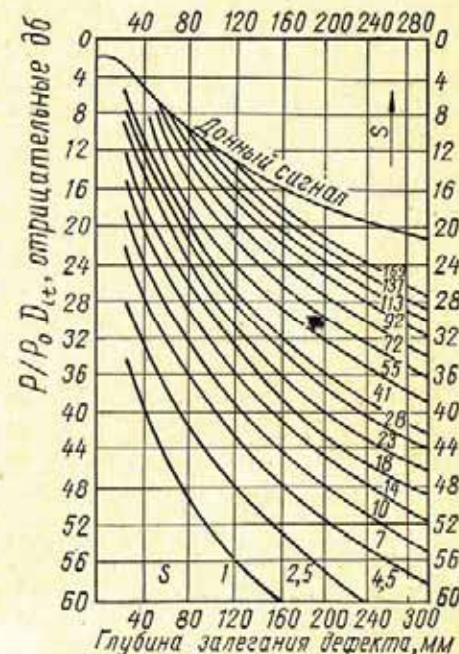


Рис. 151. АРД-диаграмма наклонного искателя для стали $\beta = 40^\circ$; $f = 2,5$ МГц; $a = 6$ мм.

эталона № 3. Амплитуды сигналов, отраженных от дна изделия или двугранного угла образца, определяются по АРД-диаграмме. Амплитуда сигнала от эталона № 3 обычно близка к $P_0 D_{1,1}$ и может быть уточнена по формулам табл. 5. Найденное значение откладывают на шкале устройства для измерения амплитуд сигналов. Затем некалиброванной ручкой регулировки чувствительности амплитуду указанного эхо-сигнала регулируют таким образом, чтобы высота соответствующего импульса на экране достигала некоторой заданной отметки. В случае измерения имитатором дефектов, высота этого импульса должна совпадать с высотой импульса имитатора.

После проведения подготовительной работы эквивалентные размеры дефектов измеряют очень просто. Определяют амплитуду максимального эхо-сигнала от исследуемого дефекта. По амплитуде сигнала и глубине залегания дефекта находят положение соответствующей точки на АРД-диаграмме. По параметрам ближайших к точке кривых АРД-диаграммы определяют эквивалентный размер дефекта.

Для применения АРД-диаграмм в практике контроля необходимо уметь измерять коэффициент затухания волн. Основная трудность измерения затухания связана с необходимостью разделения двух неизвестных множителей: коэффициента чувствительности искателя, зависящего от качества акустического контакта искателя с изделием, и множителя $e^{-2\delta r}$, учитывающего затухание. Для разделения этих множителей необходимо два раза измерять амплитуды сигналов в разных условиях, т. е. при разном пути ультразвука.

Наиболее простым способом измерения затухания продольных волн является способ замера амплитуд многократных отражений ультразвука между поверхностями плоскопараллельного образца. Однако в действительности при измерении этим способом требуется разделить потери на затухание и на переход энергии из изделия в искатель при каждом отражении ультразвука от контактной поверхности. Рассмотрим более точные методы измерения затухания, которые могут быть осуществлены без создания сложной аппаратуры.

Измерение затухания продольных волн по двум образцам требует наличия одного исследуемого и одного тест-образца. Обычно исследуемый образец или изделие

в зоне, где дефекты отсутствуют, имеет большую толщину, а тест-образец — малую толщину и известное или пренебрежимо малое затухание ультразвука. Поверхности образцов должны иметь одинаковую обработку (не ниже $\nabla 6$), непараллельность поверхностей не более 0,01, а поперечное сечение должно превосходить максимальный диаметр пучка ультразвуковых лучей.

Воспользовавшись формулой из табл. 5, отношение амплитуд U донных сигналов от образцов можно записать в виде

$$\frac{U^I}{U^{II}} = \frac{\varphi(r)}{\varphi(r_1)} e^{-2(\delta r - \delta_1 r_1)}.$$

Здесь $\varphi(r)$ и $\varphi(r_1)$ — функции, характеризующие ослабление донных сигналов исследуемого и тест-образцов.

Выразив ослабление в децибелах, найдем выражение для искомой величины δ :

$$\delta = \frac{1}{2r} \{ [N^I - N^{II} + \varphi(r_1) - \varphi(r)] + 2\delta_1 r_1 \}, \quad (189)$$

где r и r_1 — толщина исследуемого образца и тест-образца, см. Амплитуды N выражены в отрицательных децибелах, а δ и δ_1 — в *отр. дб/см*.

Пусть, например, при измерении затухания ультразвука в изделии толщиной 150 мм искателем с параметрами $2a = 12$ мм, $f = 2,5$ МГц с помощью образца толщиной 30 мм с $\delta_1 = 0,1$ *отр. дб/см* получено, что разница амплитуд сигналов равна 18 *отр. дб*. По АРД-диаграмме (см. рис. 84) находим $\varphi(r) = 16$ *отр. дб*, $\varphi(r_1) = 2,5$ *отр. дб*. Потери на затухание в образце $2\delta_1 r_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot 3 = 0,6$ *дб*. Отсюда

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot 15} [18 - 16 + 2,5 + 0,6] = 0,17 \text{ отр. дб/см} = 0,0196 \text{ непер/см}.$$

Измерение коэффициента затухания поперечных волн обычно выполняют следующим образом. Два наклонных искателя с углом $\beta = 40^\circ$ включаются по раздельной схеме и располагаются на поверхности изделия так, чтобы получить максимальную амплитуду U^I сигнала от поверхности изделия (рис. 152). Затем искатели раздвигают так, чтобы ультразвук испытывал двойное отражение. При этом измеряют максимальную амплитуду второго сигнала U^{II} .

Угол падения ультразвука на поверхности изделия больше третьего критического, поэтому отражение происходит без трансформации волн и полученные сигналы соответствуют донным. Зная амплитуды U^I и U^{II} , определяя коэффициент δ по выражению

$$\delta = \frac{1}{2r} [U^I - U^{II} + \varphi(2r + r_2) - \varphi(r + r_2)] \frac{\text{отр. } \delta\delta}{\text{см}}.$$

Функции φ определяют с помощью графика, приведенного на рис. 84. Если расстояние в изделии значительно больше пути ультразвука в призме r_2 и $\frac{a^2 \cos \alpha}{\lambda \cos \beta}$, то с достаточной точностью можно считать $\varphi(2r + r_2) - \varphi(r + r_2) = 6 \text{ отр. } \delta\delta$ и коэффициент δ определить по формуле

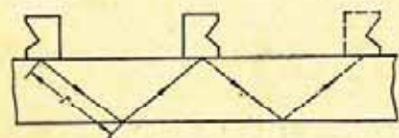


Рис. 152. Схема расположения искателя при измерении коэффициента затухания поперечных волн.

Например, если измерение выполняют серийными искателями с параметрами $\beta = 40^\circ$, $f = 2,5 \text{ МГц}$, а толщина образца $H = 70 \text{ мм}$, то

$$r = \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{70}{\cos 50^\circ} = 110 \text{ мм},$$

что в 17 раз превосходит $r_2 = 6,3 \text{ мм}$ и в 5 раз — $\frac{a^2 \cos \alpha}{\lambda \cos \beta} = 23,4 \text{ мм}$.

Предположим, что в результате измерений получили $U^I - U^{II} = 11 \text{ отр. } \delta\delta$, тогда

$$\delta \approx \frac{1}{2 \cdot 11} (11 - 6) = 0,228 \frac{\text{отр. } \delta\delta}{\text{см}}.$$

Образец для выполнения измерений должен иметь достаточно большую длину, а ширину — больше раскрытия пучка ультразвуковых лучей. Чистота его поверхности должна быть сделана $\nabla 6$, а параллельность — 0,01.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ ДЕФЕКТОВ

Измеряя эквивалентную площадь дефекта, тем самым получаем информацию лишь о его возможной минимальной величине, а не о действительных размерах. Естественно, что дефекты совершенно разной величины и конфигурации могут давать одну и ту же максимальную амплитуду эхо-сигнала, т. е. иметь одну и ту же эквивалентную площадь (рис. 153).

Объем информации о выявленном дефекте может быть существенно повышен путем введения дополнительной характеристики — индикатрисы рассеяния [54].

Индикатриса рассеяния дефекта, как новый вид информации о его характере, была впервые предложена в НИИ мостов ЛИИЖТ.

Под индикатрисой рассеяния отражателя (дефекта) будем понимать нормированную функцию, описывающую поле отражаемой в направлении к искателю ультразвуковой волны, падающей на дефект. Косвенной характеристикой индикатрисы рассеяния при заданной диаграмме направленности искателя может служить огибающая последовательности эхо-сигналов, получаемая при перемещении искателя. Из рис. 153 видно, что огибающие последовательности эхо-сигналов от разных отражателей различны, зависят от размеров, места расположения, а также формы отражателей, и позволяют таким образом получить дополнительную информацию о характере выявленного дефекта.

В настоящее время в процессе контроля, как правило, измеряют не всю огибающую последовательности эхо-сигналов, а лишь ширину ее на определенном уровне ΔU , т. е. измеряют условную высоту отражателя. Условная высота L_1 , L_2 и L_3 показанных на рис. 153 дефектов, различных по форме и расположению, одинакова. Следовательно, эта характеристика дефекта не определяет его однозначно.

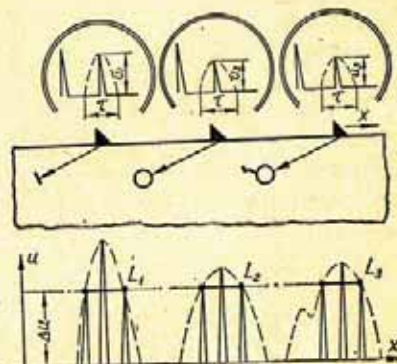


Рис. 153. Зависимость амплитуд U эхо-сигнала и условной высоты L от характера дефекта ($U_2 = U_3$; $L_1 = L_2 = L_3$).

Чтобы точнее характеризовать дефект, надо рассчитать его индикатрису рассеяния и сравнить с индикатрисой известных отражателей, например, сферы, диска и т. п.

Индикатриса рассеяния отражателя может быть определена, если известна огибающая последовательности эхо-сигналов от отражателя. Амплитуда $U_{\text{в}}(\alpha_i)$ эхо-сигнала от отражателя на выходе приемного тракта при линейной динамической характеристике усилителя и озвучивании отражателя лучом, преломляющимся под углом α_i , равна (рис. 154)

$$U_{\text{в}}(\alpha_i) = K [QU_{\text{вх}}(\alpha_i) - \Delta U], \quad (191)$$

где $U_{\text{в}}(\alpha_i)$ — амплитуда эхо-сигнала на выходе дефектоскопа; $U_{\text{вх}}(\alpha_i)$ — то же, на входе приемного тракта; $K = \text{const}$ — коэффициент усиления видеоусилителя в дефектоскопах; Q — то же усилителя высокой частоты, регулируется ручкой «Чувствительность»; ΔU — величина напряжения отсечки.

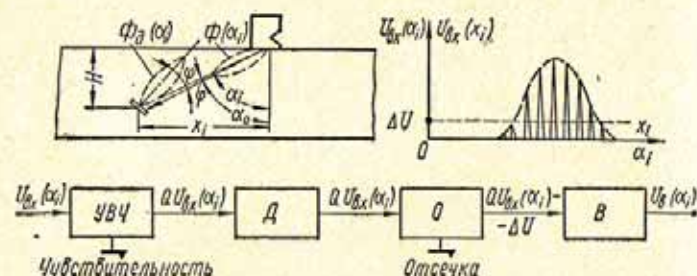


Рис. 154. К расчету индикатрисы рассеяния отражателей:
УВЧ — усилитель высокой частоты; Д — детектор; О — ограничитель;
В — видеоусилитель.

Амплитуда входного сигнала от отражателя, расположенного в дальней зоне искателя,

$$U_{\text{вх}}(\alpha_i) \approx k\Phi_{\text{д}}(\alpha_i)\Phi^2(\alpha_i)r^{-n}(\alpha_i)e^{-2\delta r(\alpha_i)}, \quad (192)$$

где k — коэффициент пропорциональности, учитывающий амплитуду зондирующего импульса, эквивалентную площадь дефекта, чувствительность искателя и т. п.; $\Phi_{\text{д}}(\alpha_i)$ — функция, описывающая индикатрису рассеяния отражателя (рис. 154); $\Phi(\alpha_i)$ — функция, описывающая диаграмму направленности искателя; $r(\alpha_i)$ — расстояние от центра из-

лучения искателя до отражателя; δ — коэффициент затухания ультразвука в исследуемом материале; n — коэффициент, учитывающий форму отражающей поверхности.

Подставляя выражение (192) в (191) и приняв $K = 1$, получаем

$$U_{\text{в}}(\alpha_i) = kQ\Phi_{\text{д}}(\alpha_i)\Phi^2(\alpha_i)r^{-n}(\alpha_i)e^{-2\delta r(\alpha_i)} - \Delta U. \quad (193)$$

Из выражения (193) можно определить индикатрису рассеяния отражателя $\Phi_{\text{д}}(\alpha_i)$. Диаграмма направленности искателя $\Phi(\alpha_i)$ описывается весьма сложным выражением [63], применение которого возможно только при использовании ЭВМ. В связи с этим при рассмотрении индикатрис воспользуемся выражением (124), аппроксимирующим рабочую часть основного лепестка диаграммы направленности, положив $\varphi = \alpha_i - \alpha_0$.

Огибающую эхо-сигналов $U_{\text{в}}(\alpha_i)$ можно получить при использовании искателя с плавно меняющимся углом наклона акустической оси, расположенного на определенном расстоянии от дефекта, или путем перемещения искателя с постоянным углом наклона акустической оси. Учитывая, что в практике используются искатели с постоянным углом наклона акустической оси, огибающую эхо-сигналов удобнее измерять как функцию расстояния x_i от точки выхода луча до отражателя (см. рис. 154).

Текущее значение угла α_i связано с соответствующей величиной расстояния x_i соотношением

$$\alpha_i = \arctg x_i/H. \quad (194)$$

Выражение для огибающей $U_{\text{в}}(x_i)$ получим из соотношения (193) с учетом (124) и (194):

$$U_{\text{в}}(x_i) = kQ\Phi_{\text{д}}(\arctg x_i/H) \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\arctg x_i/H - \alpha_0) \right] \times \\ \times (x_i^2 + H^2)^{-n/2} e^{-2\delta (x_i^2 + H^2)^{1/2}} - \Delta U. \quad (195)$$

Амплитуда эхо-сигнала будет максимальна при определенном значении $x_i = x_1$. Координата точки выхода луча x_1 соответствует углу α_1 ввода ультразвука в изделие. В общем случае $\alpha_1 \neq \alpha_0$. Разделив соотношение (195) на выражение для $U_{\text{в}}(x_1)$ и положив $\Delta U = 0$, получим нормированную функцию $F(x_i)$ огибающей последовательности эхо-сигналов от отражателя:

$$F(x_i) = \frac{U_n(x_i)}{U_n(x_1)} = \Phi_\theta(\arctg x_i/H) \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\arctg x_i/H - \alpha_0) \right] \times \\ \times \frac{(x_i^2 + H^2)^{-n/2} \exp[-2\delta(x_i^2 + H^2)^{1/2}]}{\Phi_\theta(\arctg \frac{x_1}{H}) \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\arctg \frac{x_1}{H} - \alpha_0) \right] (x_1^2 + H^2)^{-n/2} \times \\ \times \exp[-2\delta(x_1^2 + H^2)^{1/2}]} \quad (196)$$

Из полученного выражения можно вычислить индикатрису рассеяния отражателя, если известна огибающая последовательности эхо-сигналов $F(x_i)$, и, наоборот, рассчитать огибающую последовательности эхо-сигналов $F(x_i)$, зная индикатрису рассеяния отражателя и диаграмму направленности искателя. Если отражатель имеет круговую индикатрису рассеяния, т. е. $\Phi_\theta(\alpha_i) = 1$, нормированная огибающая последовательности эхо-сигналов зависит только от характеристики направленности искателя. Если отражатель имеет индикатрису рассеяния, отличную от круговой, то, очевидно, огибающая последовательности эхо-сигналов станет уже или шире, а положение ее максимума будет зависеть от ориентации и глубины расположения отражателя. Сравнивая форму и положение нормированной огибающей последовательности эхо-сигналов для выявленного дефекта с формой и положением нормированной огибающей от ненаправленного отражателя, расположенного на той же глубине, что и дефект, можно получить дополнительную информацию об ориентации и конфигурации дефекта. На целесообразность изучения огибающих последовательности эхо-сигналов указывали ранее ряд исследователей [122, 195, 196]. В табл. 19 приведены рекомендации по оценке характера дефектов путем их озвучивания с разных сторон и измерения огибающих последовательности эхо-сигналов [122].

Для сравнения огибающих введем следующие основные числовые характеристики: число максимумов m огибающей, коэффициент формы W и эксцесс ε (рис. 155):

$$W = \frac{\sum_{i=1}^m L_{i_c} - \sum_{i=1}^m L_{i_d}}{\sum_{i=1}^m L_{i_c}}; \quad (197)$$

$$\varepsilon = x_{1_d} - x_{1_c}, \quad (198)$$

где x_{1_c} и x_{1_d} — координаты, соответствующие максимуму нормированной огибающей последовательности эхо-сигналов от отражателя с круговой индикатрисой рассеяния и от направленного отражателя соответственно; L_{i_c} — ширина нормированной огибающей последовательности эхо-сигналов для отражателя с круговой индикатрисой рассеяния на i -ом уровне; L_{i_d} — ширина нормированной огибающей последовательности эхо-сигналов от направленного отражателя на i -ом уровне; m — число рассматриваемых уровней. На практике представляется достаточным принимать $m = 3$ и i равным 0,2; 0,5 и 0,8.

Коэффициент формы W определяет собой изменение ширины огибающей, обусловленное как индикатрисой рассеяния дефекта, так и его ориентацией, т. е. углом ψ между акустической осью искателя и акустической осью индикатрисы рассеяния (см. рис. 154). Если $\psi = 0$, то величина W будет определяться только индикатрисой рассеяния дефекта и возрастать с увеличением его, так как с увеличением размеров плоского отражателя сужается его индикатриса рассеяния. При прочих равных условиях в отрицательных значениях угла ψ величина коэффициента формы W тем больше, чем больше $|\psi|$, так как с увеличением $|\psi|$ сужается огибающая от диска. При положительных значениях угла ψ величина W существенно зависит как от величины $|\psi|$, так и от размеров дефекта, принимая положительные и отрицательные значения [54].

В данном случае с увеличением $|\psi|$ огибающая от диска расширяется. При определенных значениях $|\psi|$ эта огибающая может стать шире огибающей от соответствующей сферы, в результате чего коэффициент формы W будет иметь отрицательные значения. Эксцесс ε огибающей характеризуется разностью (в мм) положения x_{1_d} максимума

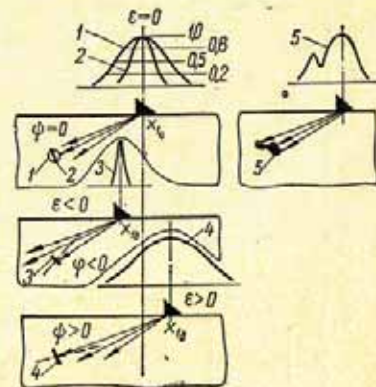
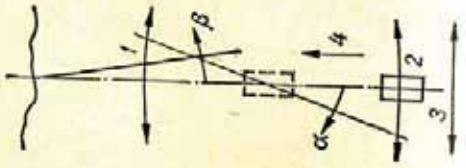
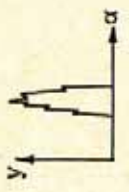
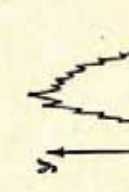
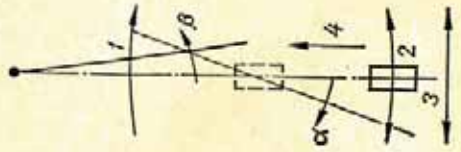
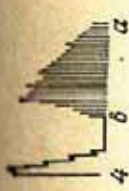
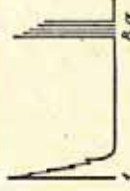
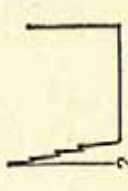
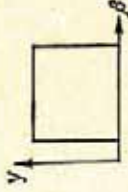
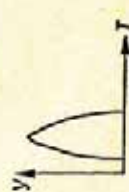


Рис. 155. Огибающие последовательности эхо-сигналов от отражателей в виде сферы (1); диска при $\psi = 0$ (2), $\psi < 0$ (3), $\psi > 0$ (4) и отражателя сложной конфигурации (5).

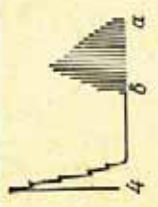
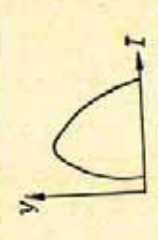
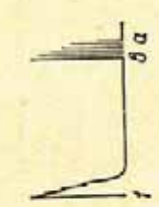
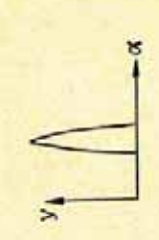
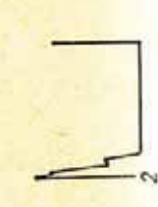
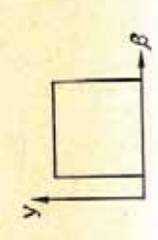
Таблица 19
Особенности выявления дефектов различной конфигурации при озвучивании наклонным искателем [122, 134]

Тип дефекта	Чередуемые эхо-сигналов		Огибающая (Y — высота сигнала)	Примечание
	Направление движения	Экзз		
Трещина (шероховатость) 	От a к b , затем от b к a . Вращение искателя			«Разная» форма огибающей свидетельствует о дифракции ультразвука, что соответственно вызывает уменьшение сигнала
	От a к b , от b к a . Орбитальное перемещение искателя $\beta - 0 - \beta$			
	Очень небольшое продольное перемещение искателя			

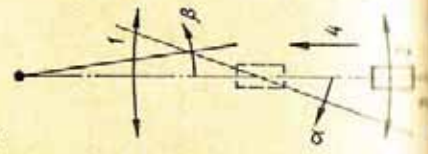
Длина огибающей зависит только от протяженности дефекта. Спад амплитуды характеризует изменение расстояния от искателя до дефекта (I — функция протяженности дефекта)

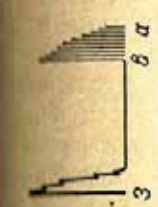
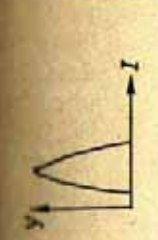
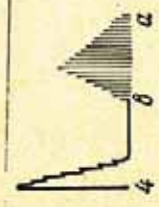
Единичная трубка (округлая поверхность) 	От a к b . Поперечное перемещение искателя			При движении искателя к дефекту край луча совмещается с дефектом и эхо-сигнал резко возрастает. Спад сигнала быстрый (I — функция высоты дефекта; зависит также от угла искателя)
	От a к b , от b к a . Вращение искателя			—
	Движения нет. Орбитальное перемещение искателя			—
	От a к b , от b к a . Продольное перемещение искателя			—

При движении искателя к дефекту край луча совмещается с дефектом и эхо-сигнал резко возрастает. Спад сигнала быстрый (I — функция высоты дефекта; зависит также от угла искателя)

Тип дефекта	Чередование эхо-сигналов		Огибающая (Y — высота сигнала)	Примечание
	Направление движения	Эскиз		
Единичная пара или округлое включение	От a к b . Поперечное перемещение излучателя			При движении излучателя к дефекту и сопряженности края луча с ним вначале происходит быстрый рост амплитуды; спад — быстрый
	От a к b , от b к a . Вращение излучателя			Любая неровность огибающей, не связанная с качеством акустического контакта, объясняется неровной формой дефекта
	Движения нет. Орбитальное перемещение излучателя			От дефекта правильной формы постоянный сигнал. Нет медленного спада.

Единичная пара или округлое включение



Огибающая такая же, как при перемещении I , но несколько шире и с округлой вершиной	От a к b , от b к a . Продольное перемещение излучателя		
	От a к b . Поперечное перемещение излучателя		

Огибающая такая же, как при перемещении I , но несколько шире и с округлой вершиной

огибающей от исследуемого дефекта и положения X_{1c} максимума огибающей от сферического отражателя, расположенного на той же глубине, что и исследуемый дефект. Для дефектов округлой формы, а также для дефектов плоских, ориентированных перпендикулярно акустической оси излучателя, $\varepsilon = 0$ (рис. 155). Экспесс ε будет положительным, если дефект имеет индикатрису рассеяния, ось которой повернута относительно акустической оси излучателя по часовой стрелке на угол ψ ; при повороте против часовой стрелки (угол ψ отрицательный) ε будет отрицательным. Коэффициент формы W , а также экспесс ε достаточно полно будут характеризовать огибающие последовательности эхо-сигналов с одним максимумом. Такие огибающие соответствуют дефектам, размеры которых не превышают диаметра излучателя, т. е. наиболее часто встречаются на практике (рис. 155).

Многовершинные огибающие могут быть получены от дефектов, соизмеримых или превышающих размеры излучателя, а также от дефектов сложной конфигурации или от скопления отдельных дефектов (рис. 155).

Затухание ультразвука в контролируемом изделии может привести к изменению формы огибающей [54].

Очевидно, что по одной одновершинной огибающей последовательности эхо-сигналов от выявленного дефекта нельзя судить о его характере, так как положение огибающей и коэффициент формы W зависят не только от конфигурации и ориентации дефекта, но и от его глубины расположения, которую в общем случае измерить невозможно.

Простейшими дефектами с точки зрения определения их формы и ориентации являются дефекты с круговой индикатрисой рассеяния. К ним относятся любые дефекты размером менее длины волны и дефекты в виде сферы или цилиндра любых размеров. Чтобы отличить указанные дефекты от дефекта с направленной индикатрисой рассеяния, предлагается способ сравнения двух огибающих, полученных при озвучивании этого дефекта двумя искателями с различными диаграммами направленности $\Phi_1(\alpha_1)$ и $\Phi_2(\alpha_2)$. Диаграммы направленности подбирают таким образом, чтобы формы огибающих от сферического отражателя максимально приближались друг к другу, т. е. чтобы коэффициент формы для этих огибающих был близок к нулю ($W \approx 0$).

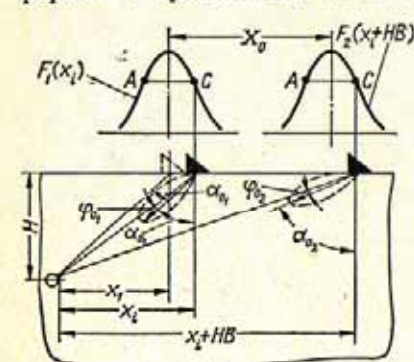


Рис. 156. Схема расчета параметров искателей, обеспечивающих получение идентичных огибающих последовательности эхо-сигналов от отражателя с круговой индикатрисой рассеяния.

Диаграммы направленности искателей задаются величинами α_{01} , φ_{01} и α_{02} , φ_{02} . Тогда для $\alpha_{02} > \alpha_{01}$ условие совпадения по форме огибающих $F_1(x_1)$ и $F_2(x_1)$ может быть выполнено при $\varphi_{02} < \varphi_{01}$ и выражено равенством (рис. 156).

$$F_1(x_1) = F_2[x_1 + HB] = F_2[x_1 + H(\operatorname{tg} \alpha_{02} - \operatorname{tg} \alpha_{01})]. \quad (199)$$

Решение уравнения (199) сводится к отысканию такого значения φ_{01} при заданных α_{01} , φ_{02} , α_{02} , при котором огибающие от сферы при использовании искателей с параметрами α_{01} , φ_{01} и α_{02} , φ_{02} совпадают по форме. При этом

расстояние x между максимумами огибающих эхо-сигналов от отражателей с ненаправленной индикатрисой будет пропорционально глубине расположения дефекта и разности тангенсов углов:

$$x = x_0 = H(\operatorname{tg} \alpha_{02} - \operatorname{tg} \alpha_{01}). \quad (200)$$

Результаты измерений, выполненные искателями с параметрами, рассчитанными по изложенной методике, хорошо подтверждают данное положение (рис. 157).

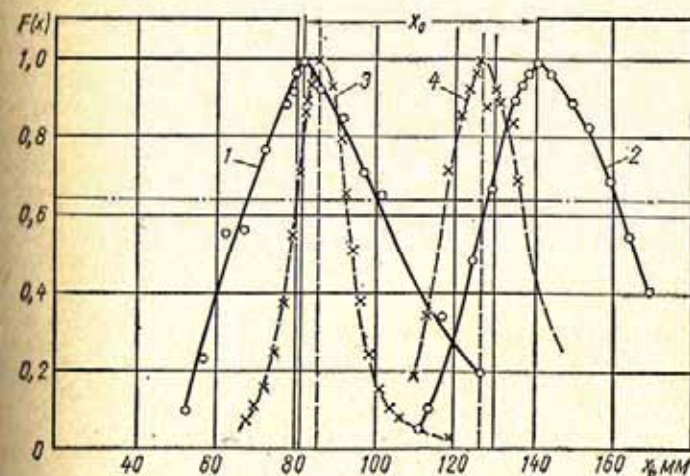


Рис. 157. Огибающие последовательности эхо-сигналов от цилиндрического отражателя (1, 2) и плоского дна отверстия (3, 4), измеренные искателями с параметрами $\alpha_{01} = 50^\circ$; $a_1 = 3$ мм (1, 3) и $\alpha_{02} = 65^\circ$; $a_2 = 9$ мм (2, 4); $f = 2,5$ МГц.

Если отражатель имеет направленную индикатрису рассеяния, то огибающие от него по своей форме и расположению будут отличаться от огибающих для сферы (цилиндра), расположенной на той же глубине (рис. 157). В табл. 20 приведены ожидаемые формы и расположение огибающих, измеренных указанными искателями, для отражателей с ненаправленной и направленными индикатрисами рассеяния, расположенных на одной и той же глубине H .

Как видно из таблицы, огибающие эхо-сигналов от ненаправленного и направленных отражателей существенно отличаются по ширине L , расстоянию X и эксцессу ϵ

Очевидно, что по одной одновершинной огибающей последовательности эхо-сигналов от выявленного дефекта нельзя судить о его характере, так как положение огибающей и коэффициент формы W зависят не только от конфигурации и ориентации дефекта, но и от его глубины расположения, которую в общем случае измерить невозможно.

ческого отражателя максимально приближались друг к другу, т. е. чтобы коэффициент формы для этих огнивающих был близок к нулю ($W \approx 0$).

$$F_1(x_i) = F_2[x_i + HB] = F_2[x_i + H(\operatorname{tg} \alpha_{0_2} - \operatorname{tg} \alpha_{0_1})]. \quad (199)$$

расстояние x между максимумами огибающих эхо-сигналов от отражателей с ненаправленной индикатрисой будет пропорционально глубине расположения дефекта и разности тангенсов углов:

$$x = x_0 = H (\operatorname{tg} \alpha_{0_2} - \operatorname{tg} \alpha_{0_1}). \quad (200)$$

Результаты измерений, выполненные искателями с параметрами, рассчитанными по изложенной методике, хорошо подтверждают данное положение (рис. 157).

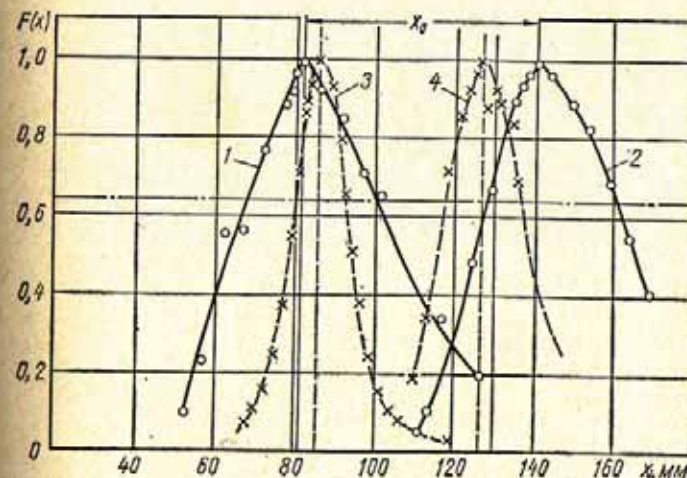


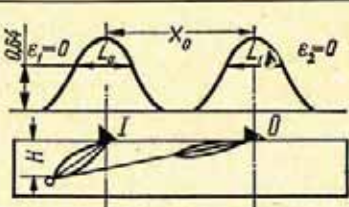
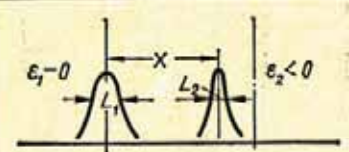
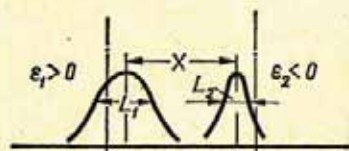
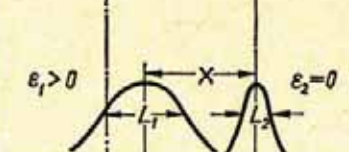
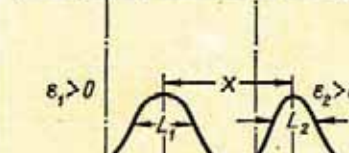
Рис. 157. Обгибающие последовательности эхо-сигналов от цилиндрического отражателя (1, 2) и плоского дна отверстия (3, 4), измеренные искателями с параметрами $\alpha_{01} = 56^\circ$; $a_1 = 3$ мм (1, 3) и $\alpha_{02} = 65^\circ$; $a_2 = 9$ мм (2, 4); $f = 2,5$ МГц.

Если отражатель имеет направленную индикатрису рассеяния, то огибающие от него по своей форме и расположению будут отличаться от огибающих для сферы (цилиндра), расположенной на той же глубине (рис. 157). В табл. 20 приведены ожидаемые формы и расположение огибающих, измеренных указанными искателями, для отражателей с ненаправленной и направленными индикатрисами рассеяния, расположенных на одной и той же глубине H .

Как видно из таблицы, огибающие эхо-сигналов от ненаправленного и направленных отражателей существенно отличаются по ширине L , расстоянию X и эксцессу e .

Таблица 20

Огибающие эхо-сигналов от дефектов различной конфигурации и ориентации

Индикатриса	Характеристика дефекта	Формы и расположение огибающих	Измеренные характеристики
Ненаправленная	Сфера, цилиндр, любой дефект размером $b < \lambda$		$L_1 = L_2 = L_0$ $H_1 = H_2 = H$ $X = X_0$
Направленная	$\psi_1 = 0;$ $\psi_2 < 0$		$L_1 < L_0$ $L_2 < L_0$ $H_1 > H_2$ $X < X_0$
	$\psi_1 > 0;$ $\psi_2 < 0$		$L_1 \leq L_0$ $L_2 > L_0$ $H_1 > H_2$ $X < X_0$
	$\psi_1 > 0;$ $\psi_2 = 0$		$L_1 > L_0$ $L_2 \leq L_0$ $H_1 > H_2$ $X < X_0$
	$\psi_1 > 0;$ $\psi_2 > 0$		$L_1 \leq L_0$ $L_2 \leq L_0$ $X \leq X_0$
	$\psi_1 < 0;$ $\psi_2 < 0$		$L_1 < L_0$ $L_2 < L_0$ $X < X_0$

и могут дать достаточно полную информацию о конфигурации и ориентации отражателя, если известна глубина его расположения H . Однако глубина H расположения отражателя с направленной индикатрисой рассеяния не может быть определена с помощью одного искателя, так как значение угла, соответствующего максимальной амплитуде сигнала, в данном случае оказывается неизвестным. Для определения глубины H может быть использована нормированная кривая зависимости максимальной амплитуды эхо-сигналов U от угла ввода луча α_1 . Вид этой зависимости при малом коэффициенте затухания и небольшой глубине расположения отражателя практически не зависит от величины H . Нормированная кривая для отражателя с ненаправленной индикатрисой рассеяния при малом затухании ультразвука в контролируемом металле может быть построена по выражению

$$U \approx k_1 D_{i,i_1}(\alpha_1) \frac{1}{r^2} = k_1 \frac{1}{H^2} D_{i,i_1}(\alpha_1) \cos^2 \alpha_1, \quad (201)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий чувствительность искателя и размеры отражателя; $D_{i,i_1}(\alpha_1)$ — коэффициент прозрачности по энергии при данном угле α_1 .

На рис. 158, а приведены зависимости множителей, входящих в правую часть уравнения (201). Функция $D_{i,i_1}(\alpha)$ построена по данным Д. Б. Дианова [62]. Нормированная кривая $\frac{U}{U_{\max}} = F(\alpha_1)$ для ненаправленного отражателя показана на рис. 158, б (кривая 1).

Аналогичная кривая для отражателя с направленной индикатрисой будет отличаться от указанной: максимум ее будет наблюдаться при $\alpha_1 = \alpha_{1m}$, для которого угол $\psi \approx 0$, т. е. когда акустическая ось индикатрисы рассеяния отражателя совпадает с акустической осью диаграммы направленности искателя. Тогда глубина H расположения отражателя может быть определена по выражению (25) в соответствии с измеренными значениями угла α_{1m} и времени T между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от отражателя.

На рис. 158, б показаны экспериментальные зависимости $F(\alpha_1) = U(\alpha_1)/U_{\max}$ для цилиндрического (кривая 2) и дискового (кривая 3) отражателей, расположенных в стальном образце на глубине $H = 75$ мм. Угол между нормалью к дисковому отражателю и нормалью к контактной поверхности составлял 50° . Как видно из рис. 158, б, описанная

методика принципиально позволяет различать отражатели с направленной и ненаправленной индикатрисами рассеяния.

На рис. 159 показаны огибающие, полученные экспериментально и рассчитанные на электронно-счетной машине для сферического (кривые 1 и 3) отражателя и дискового (кривая 2, 4) радиусом 5 мм при $\psi = 0$, расположенных в стали ($H = 75$ мм) с малым коэффициентом затухания и озвучиваемых искателями с преобразователями радиусом $a_1 = 3$ мм и $a_2 = 6$ мм и с параметрами $\alpha_0 = 50^\circ$ и $f = 2,5$ МГц.

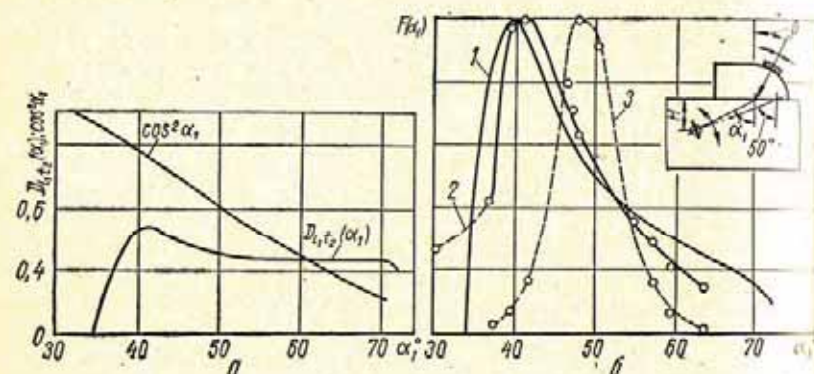


Рис. 158. К определению ориентации дефекта с направленной индикатрисой рассеяния:

1 и 2 — расчетная и экспериментальная зависимости $F(\alpha_1)$ для отражателя с направленной индикатрисой рассеяния; 3 — экспериментальная зависимость $F(\alpha_1)$ для отверстия с плоским дном ($H = 75$ мм).

В результате числовые характеристики огибающих для дискового отражателя составляют (рис. 159):

при $a_1 = 3$ мм $W_{\text{расч}} = 0,48$; $\varepsilon_{\text{расч}} = 0$;
 $W_{\text{эксп}} = 0,64$; $\varepsilon_{\text{эксп}} = 6$ мм;
 при $a_2 = 6$ мм $W_{\text{расч}} = 0,18$; $\varepsilon_{\text{расч}} = 0$.

Из полученных данных следует, что для повышения селективности при оценке ориентации и конфигурации дефектов следует применять искатели с пониженной направленностью поля поперечной волны. В этом случае форма огибающей последовательности эхо-сигналов от дефекта и ее числовые характеристики (W и ε) будут в большей степени определяться индикатрисой рассеяния дефекта.

Таким образом, оценка конфигурации и ориентации дефекта по его индикатрисе рассеяния сводится к следующему. Предварительно определяют степень направленности индикатрисы рассеяния дефекта. Для этого снимают огибающие последовательности эхо-сигналов от дефекта двумя искателями, диаграммы направленности которых выбраны из условия, чтобы огибающие от ненаправленного отражателя совпадали по ширине на заданном уровне, т. е. $L_1 = L_2$. Если по результатам измерений $H_1 \approx H_2$, $L_1 \approx L_2$ и $x \approx \frac{H_1 + H_2}{2} (\lg \alpha_{02} - \lg \alpha_{01})$, то выявленный отражатель

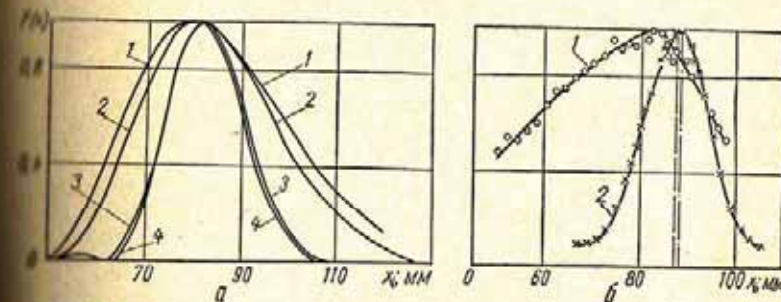


Рис. 159. Расчетные (а) и экспериментальные (б) огибающие последовательности эхо-сигналов от сферического и дискового отражателей при озвучивании искателями:

1, 2 — $a_1 = 3$ мм; 3, 4 — $a_2 = 6$ мм.

имеет ненаправленную индикатрису. Это значит, что форма дефекта округлая (в виде сферы или цилиндра) или его размеры близки к длине волны (если амплитуда эхо-сигнала весьма мала) при любой его конфигурации.

Если в результате измерений не соблюдаются приведенные выше равенства, то нет оснований утверждать, что дефект имеет ненаправленную индикатрису рассеяния. В этом случае определяют направление акустической оси индикатрисы рассеяния дефекта. Для этого снимают нормированную огибающую последовательности эхо-сигналов искателем с переменным углом ввода луча. Ось индикатрисы рассеяния дефекта будет совпадать с акустической осью искателя при угле ввода α_{1m} , которому соответствует максимум на нормированной кривой. Величину α_{1m} измеряют по эталону № 2. При угле ввода луча α_{1m} измеряют глубину H расположения дефекта. Зная глубину расположения исследуемого дефекта, снимают или рассчитывают огибающую

последовательности эхо-сигналов от ненаправленного отражателя, расположенного на той же глубине, что и исследуемый дефект.

Сравнивая огибающие от исследуемого дефекта и от отражателя с ненаправленной индикатрисой рассеяния, полученные при озвучивании одним и тем же искателем, делают вывод о конфигурации и ориентации дефекта.

Методика определения конфигурации и ориентации дефекта в плане сварного соединения несколько упрощается в связи с тем, что дефект может быть озвучен под различными углами путем поворота искателя.

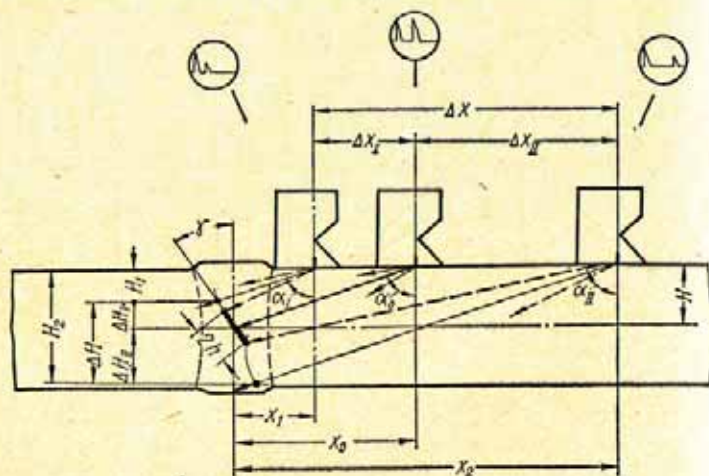


Рис. 160. Схема расчета условной высоты дефектов.

В связи со сложностью измерения огибающих последовательности эхо-сигналов и озвучивания дефекта под различными углами в практике дефектоскопии пока ограничиваются измерением условных размеров дефектов — условной высоты, условной ширины и условной протяженности.

Условную высоту и ширину следует рассматривать как вспомогательные числовые характеристики огибающих последовательности эхо-сигналов, несущие в себе лишь часть информации, содержащейся в основных числовых характеристиках.

Условная высота и ширина дефекта. Условную высоту дефекта при контроле сварных швов характеризуют разностью

ΔH глубин H_2 и H_1 , измеренных с помощью глубиномера в крайних положениях искателя при перемещении его перпендикулярно оси шва (рис. 160). За крайние положения принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала от дефекта составляет определенную, наперед заданную величину (ГОСТ 14782—69). В ряде случаев, особенно при отсутствии глубиномера, более удобно измерять ширину Δx , определяемую протяженностью зоны перемещения искателя между этими крайними положениями (рис. 160). Так, например, при автоматическом контроле обычно измеряют и фиксируют на ультразвукограммах I вида величину Δx , а не ΔH (см. гл. XI). Крайним положениям искателя соответствуют определенные углы преломления α_1 и α_{11} , под которыми при этом озвучивается дефект (рис. 160).

Если известны значения углов преломления α_1 и α_{11} , соответствующих границам указанной зоны, то условные ширина и высота дефекта, имеющего в сечении шва протяженность $2h$, расположенного на глубине H и развернутого на угол γ относительно вертикальной оси, будут равны [56]:

$$\Delta x = \frac{(H + h \cos \gamma) \operatorname{tg} \alpha_{11} - (H - h \cos \gamma) \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_{11} - \operatorname{tg} \alpha_1} + 2h \sin \gamma \quad (202)$$

$$\Delta H = H (\sec \alpha_{11} - \sec \alpha_1) \cos \alpha_0 + h (\sec \alpha_{11} + \sec \alpha_1) \times \cos \alpha_0 \cos \gamma. \quad (203)$$

Для дефектов типа вертикальных непроваров и трещин ($\gamma = 0$)

$$\Delta x = H (\operatorname{tg} \alpha_{11} - \operatorname{tg} \alpha_1) + h (\operatorname{tg} \alpha_{11} + \operatorname{tg} \alpha_1) \quad (204)$$

$$\Delta H = H (\sec \alpha_{11} - \sec \alpha_1) \cos \alpha_0 + h (\sec \alpha_{11} + \sec \alpha_1) \cos \alpha_0. \quad (205)$$

Для дефектов типа горизонтальных несплавов и расщелений ($\gamma = 90^\circ$)

$$\Delta x = H (\operatorname{tg} \alpha_{11} - \operatorname{tg} \alpha_1) + 2h; \quad (206)$$

$$\Delta H = H (\sec \alpha_{11} - \sec \alpha_1) \cos \alpha_0. \quad (207)$$

Для дефектов малой протяженности в сечении шва (поры, шлаковые включения, $h \approx 0$)

$$\Delta x = H (\operatorname{tg} \alpha_{11} - \operatorname{tg} \alpha_1); \quad (208)$$

$$\Delta H = H (\sec \alpha_{11} - \sec \alpha_1) \cos \alpha_0. \quad (209)$$

Сравнивая соотношения (202), (204), (206), (208) и (203), (205), (207), (209) соответственно видим, что параметр Δx содержит в себе информацию о протяженности дефекта при любой его ориентации ($0 \leq \gamma \leq 90^\circ$).

Величина условной ширины дефектов при выражении ее через любой параметр должна обуславливаться их индикатрисой рассеяния, т. е. конфигурацией и ориентацией отражающей поверхности, и глубиной расположения. В то же время величина условной ширины одного и того же дефекта будет определяться способом измерения условной ширины.

Возможны два принципиально различных способа измерения условной ширины.

При первом способе считают крайними те положения искателя, где амплитуда эхо-сигнала уменьшается в определенное наперед заданное число раз от максимума. Для этого перед измерением условной ширины, сохраняя постоянным положение ручки «Отсечка», устанавливают чувствительность дефектоскопа такой, чтобы максимальная амплитуда эхо-сигнала от исследуемого дефекта соответствовала заданной величине, а за крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала уменьшается до определенного значения. Таким образом, при первом способе условную ширину дефектов измеряют на постоянном относительном уровне отсечки, но при систематически изменяемой чувствительности.

Второй способ основан на том, что за крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала от исследуемого дефекта уменьшается до некоторого заданного абсолютного значения независимо от величины максимальной амплитуды эхо-сигнала. В связи с этим при втором способе условную ширину любых дефектов измеряют при постоянной чувствительности дефектоскопа, но на разном относительном уровне отсечки.

Очевидно, что наилучшим будет тот способ измерения условной ширины, который позволит получить больший объем информации, дополняющей информацию, уже содержащуюся в максимальной амплитуде эхо-сигнала*.

Сравним два способа измерения условной ширины дефектов. Для расчета углов α_1 и α_{11} , определяющих

* Последними исследованиями [58] установлена целесообразность введения новой информационной характеристики $\Delta x/\Delta H$ о конфигурации и ориентации дефекта.

условную ширину дефекта, воспользуемся выражением (193). Значения α_1 и α_{11} , соответствующих границам условной ширины дефектов округлой формы, для которых $n=2$, $\Phi_0(\alpha_1) = 1$, получим из условий $U_{\text{в}}(\alpha_1) = 0$ и $U_{\text{в}}(\alpha_{11}) = 0$, т. е.

$$kQ\Phi^2(\alpha_{1,11})r^{-2}(\alpha_{1,11})\exp[-2\delta r(\alpha_{1,11})] - \Delta U = 0. \quad (210)$$

При этом

$$r(\alpha_1) = \frac{H}{\cos \alpha_1}; \quad (211)$$

$$k = \chi s, \quad (212)$$

где χ — коэффициент пропорциональности, зависящий от амплитуды зондирующего импульса генератора, чувствительности искателя, качества акустического контакта и т. д.; s — коэффициент, зависящий от размеров дефекта.

Для приближенного решения уравнения (210) воспользуемся выражением (124), аппроксимирующим основной лепесток диаграммы направленности.

Подставляя соотношение (124), (211) и (212) в выражение (210), получаем

$$Q\chi s \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_{1,11} - \alpha_0) \right] \left(\frac{\cos \alpha_{1,11}}{H} \right)^2 \times \\ \times \exp \left(-2\delta H \frac{1}{\cos \alpha_{1,11}} \right) = \Delta U. \quad (213)$$

Левая часть выражения (213) является функцией $F_1(\alpha)$, зависящей от огибающую последовательности эхо-сигналов от сферического отражателя на выходе линейного усилителя высокой частоты. Функция $F_1(\alpha)$ принимает максимальное значение $U_{\text{в.т}}$ при $\alpha = \alpha_1$, где α_1 — угол ввода луча:

$$F_1(\alpha_1) = Q\chi s \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_1 - \alpha_0) \right] \left(\frac{\cos \alpha_1}{H} \right)^2 \times \\ \times \exp \left(-2\delta H \frac{1}{\cos \alpha_1} \right) = U_{\text{в.т}}. \quad (214)$$

Разделив почленно выражение (213) на (214), получим уравнение для определения значений α_1 и α_{11} :

$$\frac{\cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_{1,11} - \alpha_0) \right] \cos^2 \alpha_{1,11}}{\cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_1 - \alpha_0) \right] \cos^2 \alpha_1} \times \\ \times \exp \left[-2\delta H \left(\frac{1}{\cos \alpha_{1,11}} - \frac{1}{\cos \alpha_1} \right) \right] = \frac{\Delta U}{U_{\text{в.т}}}, \quad (215)$$

где левая часть представляет собой функцию $F_2(\alpha_1)$, описывающую приведенную к максимальному значению огибающую последовательности эхо-сигналов. Правая часть выражения (215) определяет уровень отсечки сигналов в приемном тракте дефектоскопа по отношению к максимальному эхо-сигналу от данного дефекта. Отношение $\Delta U/U_{н.т.}$ есть относительный уровень отсечки и обозначается через A (см. § 1 гл. III).

Если условную ширину дефектов измеряют первым способом, то относительный уровень отсечки определяется только величиной порога ограничения ΔU . При втором способе измерения относительный уровень отсечки определяется также максимальной амплитудой эхо-сигнала $U_{н.т.}$, которая в данном случае является функцией размеров дефекта s , коэффициента затухания δ и, при отсутствии ВРЧ, глубины H расположения дефекта, т. е. $\Delta U/U_{н.т.} = F_3(s, \delta, H)$.

Функция $F_3(s, \delta, H)$ согласно выражению (214) равна

$$F_3(s, \delta, H) = A = \frac{\Delta U}{U_{н.т.}} = \frac{\Delta U \exp\left(\frac{2\delta H}{\cos \alpha_1}\right)}{\pi Q s \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_1 - \alpha_0) \right] \left(\frac{\cos \alpha_0}{H} \right)^2}. \quad (216)$$

Коэффициенты πQ в соотношении (216) определим, приняв, что уровень отсечки при выявлении дефекта с эквивалентной площадью s_0 , расположенного на минимальной глубине H_0 , составляет A_0 . Если при этом коэффициент затухания ультразвука $\delta_m \leq 0,02 \text{ см}^{-1}$, что справедливо для дефектоскопии сварных соединений, и $\delta_m H_{\max} \leq 0,2 \text{ непер}$, то $\alpha_1 \approx \alpha_0$ (см. гл. VI). Тогда из выражения (216) получим уравнение для расчета относительного уровня отсечки A при выявлении дефектов с некоторой эквивалентной площадью s на любой глубине H :

$$A \approx \frac{A_0 \frac{s_0}{s} \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \left(\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_1} \right)^2}{\cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_1 - \alpha_0) \right] \exp \left[-2\delta \left(\frac{H}{\cos \alpha_1} - \frac{H_0}{\cos \alpha_0} \right) \right]} = A_0 \frac{s_0}{s} F_4(\delta, H). \quad (217)$$

Уравнения (215) и (217) целесообразно исследовать графоаналитически. Соответствующие номограммы, рассчитанные для типового искателя ($\alpha_0 = 65^\circ$, $af = 15 \text{ мм} \cdot \text{Мгц}$, $\varphi_0 \approx 4^\circ$), и для $H_0 = 20 \text{ мм}$, приведены на рис. 161. Значения углов α_1 и α_{11} , при которых появляются и исчезают эхо-сигналы на выходе приемного тракта, определяются точками пересечения кривой $F_2(\alpha_1)$ для определенного затухания δH , с прямой, параллельной оси абсцисс и пересекающей ось ординат на заданном уровне A (рис. 161, а). Относительный уровень отсечки A

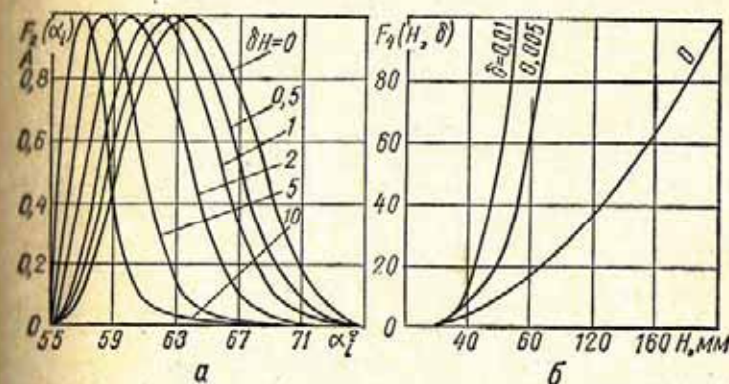


Рис. 161. Номограммы для приближенного расчета условной ширины отражателей с круговой индикатрисой рассеяния.

при измерении условной ширины по первому способу не зависит от размеров и глубины расположения отражателя. При втором способе измерения относительный уровень отсечки следует рассчитывать по соотношению (217), пользуясь графиками, приведенными на рис. 161, б.

На рис. 162 и 163 представлены расчетные зависимости условной ширины Δx дефекта с круговой индикатрисой рассеяния и с эквивалентной площадью $S = S_0$ от уровня отсечки A и глубины H расположения дефекта. На рис. 164 представлены результаты эксперимента по измерению условной ширины цилиндрических отражателей двумя способами.

Анализ полученных зависимостей показывает, что условная ширина дефектов в сильной степени определяется способом ее измерения, затуханием ультразвука, претерпеваемым им на пути к дефекту, и относительным уровнем

Если измерение ведется вторым способом, то между условной шириной и истинными размерами дефекта

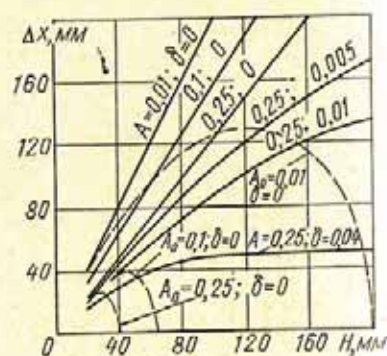


Рис. 163. Расчетные зависимости условной ширины отражателя с круговой индикатриссой рассеяния от глубины его расположения: сплошные линии — первый способ измерения; пунктирные — второй способ.

The figure consists of two graphs. The left graph plots $\Delta X, \text{MM}$ on the y-axis (ranging from 0 to 25) against D, MM on the x-axis (ranging from 0 to 16). It shows two curves: curve 1 (triangles) is relatively flat around 12-13 mm, and curve 2 (squares) increases from about 14 mm at $D=0$ to about 23 mm at $D=16$. The right graph plots $\Delta X, \text{MM}$ on the y-axis (ranging from 5 to 25) against H, MM on the x-axis (ranging from 0 to 60). It shows two curves: curve 1 (triangles) increases from about 9 mm at $H=0$ to about 18 mm at $H=60$, and curve 2 (squares) increases from about 17 mm at $H=0$ to a peak of about 26 mm at $H=50$ before decreasing to about 8 mm at $H=60$.

1 и 2 — способы измерения.

293

дефекта. Условная ширина эквивалентного дискового отражателя должны быть рассчитаны на ЭВЦМ или измерены экспериментально. В связи со сложностью таких расчетов и эксперимента целесообразно по аналогии с АРД-диаграммами ввести в практику дефектоскопии ВРД-диаграммы (высота условная — расстояние — диаметр). Для упрощения работы с АРД и ВРД-диаграммами их можно совместить в единую АВРД-диаграмму. Учитывая, что селективность

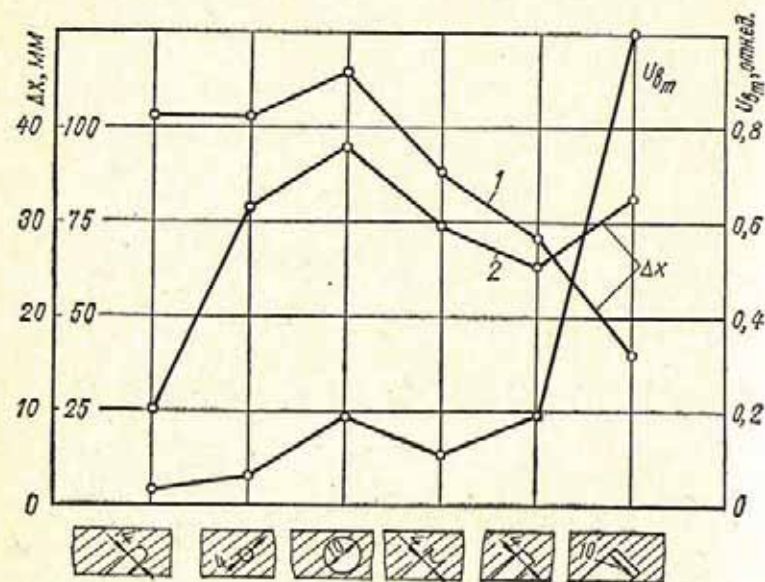


Рис. 165. Эмпирические зависимости амплитуды эхо-сигнала $U_{э}$ и условной ширины Δx моделей дефектов в стали на глубине 75 мм от их конфигурации и размеров:

1, 2 — способы измерения условной ширины; $a = 3$ мм; $f = 2,5$ МГц; $\alpha_s = 50^\circ$.

в оценке конфигурации дефекта по его условным размерам растет с увеличением ширины диаграммы направленности искателя, ВРД-диаграмму следует строить для преобразователя радиусом a_1 , меньшим, чем радиус a_2 преобразователя, для которого рассчитана АРД-диаграмма. В этом случае для контроля сварных соединений может быть использован наклонный искатель с составным преобразователем (рис. 166). Преобразователь выполняется в виде диска диаметром $2a_1$, расположенного в кольце с наружным диаметром $2a_2$. При поиске дефектов и оценке их экви-

валентных размеров по АРД-диаграмме дисковый и кольцевой преобразователи включены параллельно и образуют единый дисковый преобразователь диаметром $2a_2$. Для оценки конфигурации выявленного дефекта по ВРД-диаграмме кольцевой преобразователь с помощью кнопочного выключателя отключается, в результате чего диаметр дискового преобразователя уменьшается до величины $2a_1$.

Условные размеры могут быть использованы, как основная измеряемая характеристика дефекта взамен амплитуды эхо-сигнала. В этом случае условные размеры нужно измерять по второму способу, т. е. при постоянной заданной условной чувствительности дефектоскопа или постоянной предельной чувствительности во всем диапазоне контролируемых толщин. Очевидно, что в этом случае для правильности разбраковки дефектов также целесообразно иметь заранее построенные ВРД-диаграммы второго вида (ВРД-11) [55]. На ВРД-диаграмме как первого, так и второго вида должны быть указаны параметры искателя (β , a , f), материал (коэффициент затухания δ) и относительный уровень отсечки A_0 , для которых построены данные диаграммы. Для диаграмм первого вида вместо

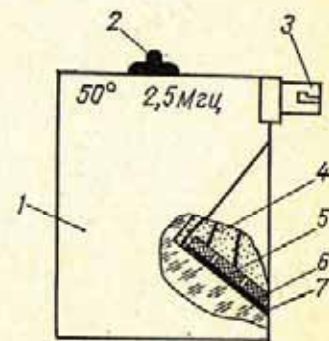


Рис. 166. Искатель конструкции НИИ мостов ЛИИЖТ с составным преобразователем для контроля сварных соединений:

1 — пьезоэлемент; 2 — выключатель; 3 — разъем; 4 — демпфер; 5 — дисковый преобразователь; 6 — кольцевой преобразователь; 7 — фольга.

величины A_0 может быть задана такая настройка чувствительности дефектоскопа, при которой амплитуда эхо-сигнала от эталонного отражателя в эталоне № 1 на глубине H_1 соответствует некоторой величине U_1 (в мм) на экране трубки, а от отражателя на глубине H_2 ($H_2 > H_1$) — величине U_2 , причем $H_2 = H_1 + 5$ мм.

Условная протяженность дефекта. Условную протяженность дефекта характеризуют длиной $2x_1$ пути перемещения искателя вдоль шва, в пределах которой фиксируется эхо-сигнал от исследуемого дефекта при заданной чувствительности дефектоскопа. Способы измерения условной

протяженности дефектов при работе прямым искателем исследованы И. Н. Ермоловым и В. Г. Щербинским [76]. При контроле наклонным искателем условная протяженность дефекта с круговой индикатрисой рассеяния, расположенного в дальней зоне искателя на глубине H в материале с затуханием δ , при угле ввода луча α_0 , диаграмме направленности искателя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча $\Phi(\varphi)$, и относительном уровне отсечки A определяется выражением [57]:

$$\Phi^2 \left[\arcsin \frac{\frac{\cos \alpha_0}{H} x_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\cos \alpha_0}{H} \right)^2 x_1^2}} \right] \frac{1}{1 + \left(\frac{\cos \alpha_0}{H} \right)^2 x_1^2} \times \exp \left[-2\delta \frac{H}{\cos \alpha_0} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\cos \alpha_0}{H} \right)^2 x_1^2} - 1 \right) \right] = A. \quad (218)$$

Применяемые на практике наклонные искатели имеют небольшой угол раскрытия основного лепестка диаграммы направленности ($\varphi_p < 9^\circ$); поэтому величина $\left(\frac{\cos \alpha_0}{H} x_1 \right)_{\max}$ составляет около 0,01 и двумя последними сомножителями в выражении (218) можно пренебречь, приняв их равными единице.

При контроле наклонным искателем возможны два основных способа измерения условной протяженности. При первом способе амплитуда сигнала на экране поддерживается постоянной путем изменения чувствительности дефектоскопа. Соответственно, относительный уровень отсечки A остается также постоянным и определяется положением ручки «Отсечка». Условная протяженность в этом случае определяется из выражения (218), в правую часть которого должно быть подставлено конкретное для данной настройки прибора значение относительного уровня отсечки A .

При втором способе измерения задается постоянная условная чувствительность K , соответствующая получению импульса от дефекта заданных размеров на определенной глубине H_0 с амплитудой в пределах экрана дефектоскопа. Этому положению соответствует какой-то начальный относительный уровень отсечки A_0 . При изменении глубины H расположения дефекта или его размеров амплитуда сигнала $U_{\text{вых, max}}$ от него будет изменяться

и, соответственно, будет меняться относительный уровень отсечки A . В связи с этим для расчета условной протяженности дефекта необходимо в правую часть выражения (218) подставлять значение относительного уровня отсечки A с учетом глубины H расположения и размера дефекта [57].

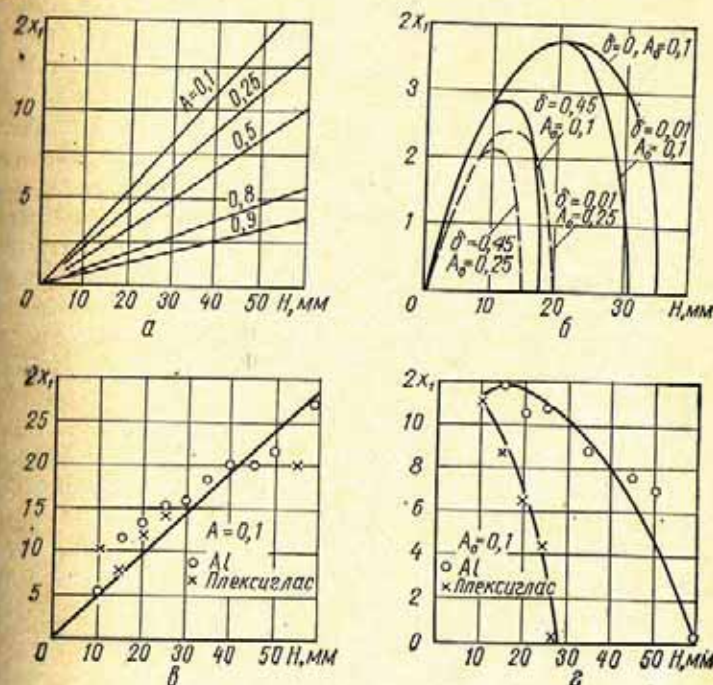


Рис. 167. Расчетные (а, б) и экспериментальные (в, г) зависимости условной протяженности $2x_1$ отражателя с круговой индикатрисой рассеяния от глубины H расположения отражателя:

а, в — первый способ; б, г — второй способ измерения.

На рис. 167 приведены рассчитанные по выражению (218) и экспериментальные зависимости условной протяженности отражателя с круговой индикатрисой рассеяния от глубины его расположения [57]. При расчете диаграммы направленности аппроксимирована соотношением (124).

Результаты расчета и эксперимента качественно совпадают. Видно, что при измерении первым способом ($K = \text{var}, A = \text{const}$) условная протяженность не зависит

от затухания и линейно возрастает с увеличением глубины расположения дефекта. При измерении условной протяженности вторым способом ($K = \text{const}$, $A = \text{var}$) ее величина существенно зависит от уровня относительной отсечки, глубины залегания дефекта и от коэффициента затухания ультразвука, что обычно не учитывается на практике [116]. Причем зависимость от глубины в общем случае нелинейна и имеет максимум.

Условная протяженность дефектов, истинные размеры которых меньше ширины ультразвукового пучка, изменяется в зависимости от их эквивалентной площади аналогично изменению условной ширины при соответствующих способах измерения. Поэтому первый способ измерения условной протяженности подобных дефектов так же, как и их условной ширины, позволяет получать больше дополнительной информации о выявленном дефекте. В то же время при контроле сварных соединений представляет также интерес оценка истинной длины дефектов, протяженность которых значительно превышает ширину ультразвукового пучка. Для этого необходимо возможно точнее определить границы дефектного участка. Меньшая погрешность в определении границ может быть получена при использовании первого способа измерения. При этом граница дефектного участка приблизительно совпадает с осью искателя в положении, соответствующем ослаблению амплитуды эхо-сигнала в половину. Поэтому измерение условной протяженности дефектов первым способом целесообразно вести при относительном уровне отсечки $A = 0,5$.

При контроле прямым искателем может быть применен также вариант второго способа измерения [76], при котором задается постоянной не условная, а предельная чувствительность во всем диапазоне контролируемых толщин. Постоянство предельной чувствительности по глубине в этом случае должно обеспечиваться применением системы временной регулировки чувствительности (ВРЧ) в дефектоскопе или тест-образца с набором эталонных отражателей, расположенных во всем диапазоне контролируемых толщин. При этом относительный уровень отсечки зависит только от эквивалентной площади дефекта, как и при втором способе измерения, и остается постоянным с изменением глубины расположения дефекта, как при первом способе [76].

При контроле наклонными искателями практическая реализация этого варианта затрудняется из-за отсутствия соответствующих систем ВРЧ в дефектоскопах и сложности изготовления и применения тест-образцов.

Из сравнения исследованных способов видно, что при ручном контроле измерение условной протяженности небольших дефектов и определение границ протяженных дефектов в ряде случаев целесообразно выполнять по первому способу.

Для получения наименьшей погрешности, связанной с флуктуацией уровня отсечки, измерения следует производить при значении относительного уровня отсечки $A = 0,2 \div 0,8$.

Сравнивая на одинаковом уровне A условную протяженность дефекта с условной протяженностью $2X_1$ ненаправленного отражателя, можно получить дополнительную информацию о размерах и конфигурации дефекта. Зависимость $2X_1/H = F(A)$ можно легко рассчитать заранее и представить графически (см. рис. 162).

Для удобства работы значения условных размеров ненаправленных отражателей на уровне $A = 0,5$ целесообразно нанести на соответствующие шкалы глубиномера.

Следует отметить, что индикатриса рассеяния и условные размеры, очевидно, могут быть использованы и для повышения помехоустойчивости ультразвукового контроля к реверберационным структурным помехам. Для этого целесообразно модель структуры, вызывающей реверберационную помеху, представить совокупностью полупрозрачных отражателей, расположенных по ходу ультразвукового пучка, имеющих многолепестковые индикатрисы рассеяния с «игольчатыми» лепестками и непрерывно меняющих свою ориентацию в процессе перемещения искателя (рис. 168). В этом случае огибающие последовательности

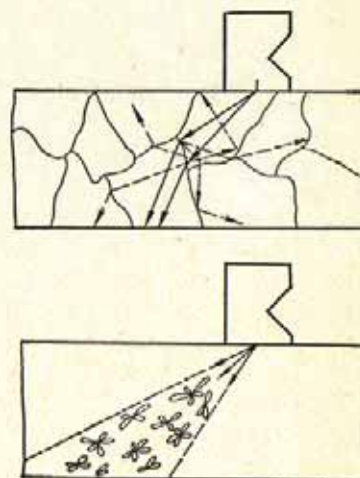


Рис. 168. Схема распространения луча в структуре, вызывающей реверберационные шумы, и модель структуры.

эхо-сигналов и условные размеры структуры и сосредоточенной несплошности (дефекта), расположенных на одинаковой глубине, будут существенно различаться. Данное различие может быть использовано для выделения полезного сигнала из совокупности реверберационных помех. Для этого при дефектоскопии крупнозернистых металлов может оказаться полезным вести послыйный контроль.

5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Разбраковка изделий по дефектам производится на основании требований к качеству изделия по сплошности, которые составляют конструкторы или технологи.

Составление норм разбраковки изделий по результатам ультразвукового контроля требует введения шкалы предельно допустимых значений измеряемых характеристик дефектов, обеспечивающих правильную разбраковку изделий в соответствии с требованиями к их качеству.

Наиболее просто измеряется амплитуда эхо-сигнала. Мерой амплитуды сигнала является эквивалентная площадь дефекта или коэффициент выявляемости дефекта.

Настройку дефектоскопа на заданную поисковую чувствительность следует рассматривать как определение некоторого минимального значения амплитуды эхо-сигнала U , соответствующей эквивалентной площади $S_{эв}$, начиная с которого необходимо проводить исследование дефектов, т. е. измерение их количественных характеристик. Уровень этой чувствительности должен быть таким, чтобы обеспечить выявление всех опасных дефектов.

Далее следует установить значение амплитуды U^I эхо-сигнала, при которой изделие подлежит забраковке. Для этого следует определить, какое наибольшее значение амплитуды может быть получено от допустимых дефектов при наиболее благоприятном их расположении для выявления ультразвуком. Например, техническими условиями установлена допустимая величина шлаковых включений и пор — 3 мм, а все другие дефекты допускаются, если они имеют меньшие размеры. Наилучшая вы-

являемость дефектов будет достигнута, если они дают практически полное отражение ультразвука и ориентированы перпендикулярно к его направлению. Очевидно, что при установлении браковочного значения амплитуды эхо-сигнала нельзя допускать, чтобы оно превосходило эхо-сигнал от плоскодонного отверстия диаметром 3 мм.

Более точно браковочное значение амплитуды можно установить на основании накопления статистических данных по сопоставлению результатов ультразвукового контроля с действительным наличием дефектов в изделии и обработки этих данных на основании теории игр [118]. Для этого необходимо тщательно продефектоскопировать партию изделий и записать максимальные значения амплитуд всех обнаруженных эхо-сигналов. Затем изделия разрезать, сделать шлифы и определить действительное наличие в них дефектов.

Возможны 4 ситуации: 1) дефект (имеется ввиду недопустимый) обнаружен ультразвуком и подтвержден при вскрытии; 2) дефект не обнаружен ультразвуком и не найден при вскрытии; 3) дефект обнаружен ультразвуком, но не найден при вскрытии (перебраковка); 4) дефект не обнаружен ультразвуком, но найден при вскрытии (недобраковка). Каждой из этих ситуаций может быть присвоена определенная плата за ошибку.

В двух первых ситуациях ошибки нет, для них плата равна нулю. Для третьей ситуации плата за ошибку m равна стоимости ошибочно забракованного изделия или стоимости работ по его ремонту. Для четвертой ситуации плата n определяется стоимостью затрат, которые могут произойти, если дефект пропущен. Это может быть средняя величина расходов по оплате рекламаций или стоимость ремонтных расходов в процессе эксплуатации, умноженная на некоторый коэффициент (меньше единицы), характеризующий вероятность того, что данный дефект окажется действительно опасным. Очень часто при отсутствии достаточного количества экономических данных можно приравнять платы за ошибки m и n . Тогда эти величины (как постоянный коэффициент) можно вообще не учитывать. Такой подход называется критерием идеального наблюдателя [149].

Вероятность ситуаций перебраковки P и недобраковки Q зависят от браковочного значения амплитуды

эхо-сигнала U^1 . По результатам ультразвукового контроля и вскрытия изделий строят график зависимости функции среднего риска R от амплитуды U^1 :

$$R = mP(U^1) + nQ(U^1). \quad (219)$$

Очевидно, что если значение U^1 очень мало, то это приведет к резкому возрастанию R вследствие увеличения P . Наоборот, если U^1 очень большое, R резко возрастет за счет величины Q . При некотором промежуточном значении U_m^1 функция R имеет минимум. Значение U_m^1 следует рассматривать как оптимальное значение браковочной амплитуды сигнала.

В этом случае шов будет бракованным, если амплитуда U эхо-сигнала от какого-либо дефекта превышает U_m^1 , т. е. $U \geq U_m^1$.

Для более точной разбраковки изделий можно ввести в систему оценки дефекта вторую измеряемую величину, например, условную высоту Δx . Если система оценки качества изделий по амплитуде сигнала приводит к чрезмерно большой перебраковке, то следует ввести условие: изделие бракуется только тогда, когда для него $U > U_m$ и, кроме того, $\Delta x > \Delta x_m$. Функция среднего риска R_n в этом случае имеет вид:

$$R_n = mP_n(U_m, \Delta x_m) + n[Q(U_m) + Q_n(U_m, \Delta x_m)]. \quad (220)$$

Здесь Q_n — вероятность ситуации недобраковки; P_n — вероятность ситуации перебраковки при условии $U > U_m$ и $\Delta x > \Delta x_m$.

Очевидно, $P(U_m) > P_n(U_m, \Delta x_m)$, т. е. вероятность ситуации, при которой изделие бракуется, меньше, чем раньше.

По результатам ультразвукового контроля и вскрытия изделия строят график R_n в функции от Δx при $U = U_m$ и определяют значение Δx_m , соответствующее минимуму R_n , которое является оптимальным. Исследования по выбору оптимального значения Δx целесообразно вести одновременно с определением U_m^1 , тогда количество изделий, подлежащих разрезке, не увеличивается.

Рассмотренный способ использования дополнительной информации — величины Δx — значительно сокра-

шает вероятность ложной забраковки, несколько увеличивая вероятность пропуска дефекта. Этот отрицательный фактор можно существенно снизить, введя дополнительное ограничение: U_m^1 должно быть меньше максимально возможной амплитуды сигнала от допустимого дефекта. При таком подходе величина U_m^1 фактически приобретает значение поисковой чувствительности, так как она указывает эхо-сигнал, начиная с которого необходимо исследовать дефект.

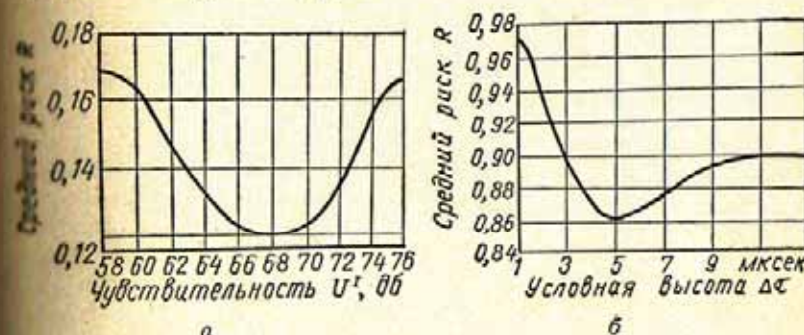


Рис. 169. Функция среднего риска в зависимости от чувствительности (а) и условной высоты дефектов (б) для сварных швов паропроводов.

На рис. 169, а показана функция среднего риска R (при $m = n$) в зависимости от амплитуды сигнала U_m^1 , измеренной в децибелах, построенная по данным измерений амплитуд сигналов на 1500 участках сварного шва с последующей их разрезкой. Минимум функции R позволяет определить оптимальное значение $U_m^1 = 68$ дБ, соответствующее плоскодонному отверстию площадью примерно 10 мм^2 .

При выбранной чувствительности U_m^1 вероятность пропуска дефектов $Q = 0,115$, а вероятность ложной забраковки — $P = 0,131$ от общего числа проверенных участков. Реальный шов состоит из 60 подобных участков. В результате получается, что в каждом стыке отмечается около 8 ложных сигналов.

На рис. 169, б показана функция среднего риска R_n в зависимости от условной высоты дефекта Δx , определенной при выбранном уровне чувствительности U_m^1 . Величина Δx измерялась в микросекундах пробега ультразву-

кового импульса по линии развертки. Минимальное значение R_n достигается при $\Delta t_m = 5$ мксек. Подсчеты показали, что при введении дополнительного условия забраковки $\Delta t > \Delta t_m$ вероятность пропуска дефектов увеличилась незначительно ($Q = 0,122$), а вероятность ложной забраковки сильно уменьшилась (до $P = 0,004$). Однако даже в этом случае будет перебраковываться около $(0,004 \times 60 = 0,24)$ 24% сварных стыков.

6. СОЧЕТАНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

К качеству сварных соединений ответственных металлоконструкций обычно предъявляют весьма жесткие технические требования, обуславливающие необходимую долговечность создаваемой конструкции. В связи с этим одной из конечных технологических операций при изготовлении сварных конструкций является контроль качества сварных соединений. Под контролем качества в данном случае понимают совокупность операций с целью установления степени соответствия готовых сварных соединений техническим требованиям. Среди этих операций основное место, как правило, занимают операции по выявлению недопустимых дефектов, т. е. дефектоскопия.

Дефектоскопичность сварных соединений обуславливается рядом факторов:

- 1) возможностью применить существующие неразрушающие методы для выявления недопустимых дефектов в сварных соединениях и надежностью этих методов;
- 2) количеством информации, которое должно быть получено при дефектоскопии о выявленных дефектах для правильного заключения о качестве проконтролированного соединения;
- 3) стоимостью дефектоскопии.

Если конструкция спроектирована так, что для выявления недопустимых дефектов нельзя применить известные неразрушающие методы контроля, то такая конструкция является недефектоскопичной и поэтому не должна быть принята к изготовлению.

Количество информации о выявленных при дефектоскопии дефектах зависит не только от возможностей применяемых методов контроля, но и от того, насколько учтены эти возможности при формулировании требований к качеству сварных соединений. Если при проектировании конструкции допуски на внутренние дефекты сварки были чрезмерно дифференцированы, то может оказаться, что даже по результатам комплексного контроля соединений несколькими методами невозможно однозначно оценить допустимость (или недопустимость) некоторых дефектов. В этом случае все подобные дефекты заранее должны быть отнесены к группе недопустимых, что, естественно, приведет к перебраковке определенного количества сварных соединений. Поэтому, проектируя сварные конструкции, следует стремиться к тому, чтобы число признаков, достаточное для отбраковки дефектных участков, было бы минимальным и чтобы эти признаки достаточно легко интерпретировались на «языке» тех методов, которые предполагается применить для контроля качества данных соединений. Однако при этом нельзя привязывать допуски на внутренние дефекты к результатам контроля соединений каким-либо одним методом, например, методом просвечивания, как это часто делается.

Стоимость дефектоскопии конструкции складывается из затрат на контроль и из убытков на ремонт участков швов, ошибочно, но вынужденно перебракованных из-за отсутствия достаточно полной информации о характере и размере выявленных дефектов.

Для оценки стоимости дефектоскопирования введем обозначения: N_j — количество погонных метров швов сварных соединений вида j , подлежащих контролю; Q_{ij} — стоимость контроля методом i 1 пог. м сварного соединения вида j , включающая и стоимость возможного пропуска отдельных дефектов; q_{ij} — стоимость вспомогательных операций, связанных с контролем методом i сварных соединений вида j , приходящаяся на 1 пог. м длины шва; в стоимость вспомогательных операций входят стоимость транспортировки соединения к месту контроля или аппаратуры к соединению, а также убытки, связанные с прекращением работ на одном или нескольких рабочих местах на время контроля качества сварного соединения;

m_j — число методов и их вариантов ($m_j \geq 1$), применяемых для контроля качества соединений вида j ; число m_j применяемых методов во многом зависит от числа n_j признаков ($n_j \geq 1$), определяющих допустимость выявленных при контроле дефектов (уменьшению n_j обычно соответствует ужесточение допусков на внутренние дефекты в соединениях); P_j — вероятность образования таких дефектных участков в соединении вида j , которые должны быть перебракованы при контроле соединения m_j методами;

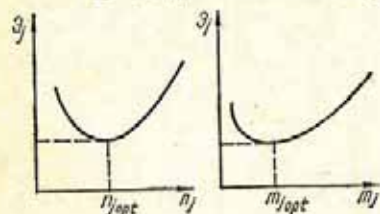


Рис. 170. Зависимости, характеризующие стоимость дефектоскопии.

Если предположить, что каждый последующий метод вводится только для получения дополнительной информации о характере дефектов, выявленных предшествующими методами, то стоимость $\mathcal{E}_j$ дефектоскопирования сварных соединений вида j составит:

$$\mathcal{E}_j = \sum_{i=1}^{m_j} N_i Q_{ij} + \sum_{i=1}^{m_j} N_i q_{ij} + N_j P_j F_j. \quad (221)$$

Первые два слагаемых в выражении (221) определяют стоимость контроля. Их сумма тем больше, чем больше число m_j применяемых при контроле методов и способов и, как правило, растет с увеличением n_j . Третье слагаемое выражает затраты на ремонт всех участков швов, перебракованных по результатам комплексного контроля. Эти затраты, очевидно, будут падать по мере увеличения m_j .

Таким образом, в общем случае функция стоимости дефектоскопии $\mathcal{E}_j$ от числа n_j признаков, определяющих допустимость выявленных дефектов, или от числа m_j применяемых методов будет описываться кривой, аналогичной кривым, приведенным на рис. 170. Увеличение стоимости дефектоскопии при $n_j < n_{j\text{опт}}$ и $m_j < m_{j\text{опт}}$ обусловливается возрастанием убытков из-за перебраковки соединений, а при $n_j > n_{j\text{опт}}$ и $m_j > m_{j\text{опт}}$ — возрастанием затрат на контроль.

Случай, когда соединения не подлежат контролю ($m_{\text{опт}} = 0$) или абсолютно недефектоскопичны ($m_{\text{опт}} \rightarrow \infty$), не учитываются.

В рассматриваемом варианте решение задачи обеспечения наилучшей дефектоскопичности сварной конструкции по существу сводится к отысканию таких значений $n_{j\text{опт}}$ и $m_{j\text{опт}}$, при которых стоимость дефектоскопии $\mathcal{E}_j$ будет минимальной, т. е. к определению таких значений $n_{j\text{опт}}$ и $m_{j\text{опт}}$, когда выполняется условие

$$\frac{\partial \mathcal{E}_j(m_{j\text{опт}})}{\partial m_j} = 0. \quad (222)$$

При этом, естественно, что величинами m_j и n_j можно варьировать только в пределах, при которых обеспечивается заданная долговечность сварной конструкции и не меняется стоимость ее изготовления. Подобная ситуация всегда имеет место, когда требуется решить задачу дефектоскопирования уже спроектированных и изготавливаемых конструкций.

Если анализ дефектоскопичности сварной конструкции, насчитывающей j видов сварных соединений, ведется на стадии ее проектирования, то величинами n_j и m_j можно варьировать в более широких пределах, рассматривая варианты конструкций, имеющие различную стоимость изготовления. При этом критерием оптимальности значений n_j и m_j будет служить минимальная стоимость конструкции в целом.

Для выявления внутренних дефектов в сварных соединениях, кроме ультразвуковой дефектоскопии, используют методы просвечивания (бетатронную дефектоскопию, рентгено- и гаммаграфирование) и магнитографию. Оптимальность того или иного метода контроля обуславливается видом сварного соединения, его размерами, маркой металла, характером дефектов, подлежащих выявлению, а также условиями, в которых выполняется контроль.

При выборе методов контроля следует учитывать, что ультразвуковая дефектоскопия в настоящее время не может быть рекомендована для выявления дефектов в соединениях большой толщины из сталей аустенитного класса, а также дефектов в виде слипаний в любых соединениях контактной сварки. Методы магнитографии можно применять для контроля только стыковых соеди-

нений из малоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной от 4 до 18 мм; при этом надежность обнаружения трещин и непроваров выше, чем дефектов округлой формы.

Методом ультразвуковой дефектоскопии хорошо выявляются трещины, непровары, имеющие обычно достаточную протяженность, а также крупные газовые и шлаковые включения. Одиночные включения малой величины, иногда недопустимые в сварных швах, могут быть пропущены оператором при ручном перемещении искателя вследствие невнимательности или нарушения акустического контакта.

Методы просвечивания (рентгено- и гаммаграфирование) при контроле сварных швов толщиной менее 80 мм являются более надежными с точки зрения выявления объемных дефектов, но обладают значительно меньшей чувствительностью к трещинам и непроварам, чем метод ультразвуковой дефектоскопии. Результаты просвечивания и магнитографии швов фиксируются на документе контроля, по которому можно определить размеры, характер и расположение дефектов в шве. Такими возможностями пока не обладает метод ультразвуковой дефектоскопии. В то же время производительность ультразвукового контроля (в большинстве случаев) несравненно выше производительности контроля рентгено- и гаммаграфированием.

Из сравнения возможностей метода ультразвуковой дефектоскопии и методов просвечивания видно, что в ряде случаев они могут дополнять друг друга. Разумное их сочетание может способствовать повышению надежности и производительности контроля, а также снижению его стоимости.

Принципы количественной оценки эффективности систем неразрушающего контроля качества сварных соединений с учетом надежности отдельных методов вероятности возникновения и потенциальной опасности дефектов рассмотрены автором в работе [37].

Ультразвуковой контроль можно применять для окончательной оценки качества сварных соединений при условии, что он обеспечивает необходимую надежность и достоверность выявления недопустимых дефектов или является единственно возможным методом. Надежность выявления недопустимых дефектов определяется эксперимен-

тально путем сопоставления данных ультразвукового контроля с данными металлографического анализа и методов просвечивания. Ультразвуковая дефектоскопия является единственно возможным методом выявления трещин и тонких непроваров в стыковых швах толщиной более 80 мм, в угловых швах крестовых, тавровых и нахлесточных соединений, а также в стыках соединений листов и профилей, сваренных электроконтактной сваркой.

Ультразвуковую дефектоскопию можно применять в сочетании с методами просвечивания только для контроля стыковых соединений при необходимости: уточнить размеры и характер выявленных ультразвуком несплошностей; повысить надежность и объективность контроля путем выборочного просвечивания участков, в которых по данным ультразвуковой дефектоскопии отсутствуют дефекты; проверить качество работы оператора при ультразвуковом контроле.

При решении вопроса о целесообразности уточнения с помощью методов просвечивания размеров и характера некоторых дефектов, которые по данным ультразвуковой дефектоскопии не могли быть отнесены к недопустимым, следует стремиться к обеспечению наименьшей стоимости затрат [37, 59].

При сочетании ультразвуковой дефектоскопии с методами просвечивания окончательная оценка качества каждого в отдельности участка шва производится на основе результатов того метода, который в данном конкретном случае обеспечивает наибольшую вероятность и достоверность выявления недопустимых дефектов.

Использование метода ультразвуковой дефектоскопии даже в сочетании с методами просвечивания для контроля качества швов позволяет не только расширить объем контроля и гарантировать более высокое качество сварных конструкций, но и снизить трудоемкость и время контроля [32].

Комплексный контроль швов ультразвуком в сочетании с гаммаграфированием в целях уточнения характера выявленных ультразвуком дефектов в некоторых случаях на 65% дешевле и на 55% быстрее, чем контроль только гамма-лучами.

Естественно, что внедрение ультразвуковой дефектоскопии, как самостоятельного метода, вместо методов

просвечивания дает еще большую экономическую выгоду. Так, например, годовая экономия от внедрения ультразвуковой дефектоскопии взамен гаммаграфирования при изготовлении сварных рам электровагонов только на одном заводе составила более 15 тыс. руб. [158]. Замена методов просвечивания ультразвуковой дефектоскопией при изготовлении пролетных строений на мостовых заводах снизила стоимость контроля примерно в 7 раз. Однако в ряде случаев, например при контроле кольцевых сварных швов труб большого диаметра и с малой (10—20 мм) толщиной стенки, введение ультразвуковой дефектоскопии вместо просвечивания может оказаться экономически неоправданным.

Методика оценки экономической эффективности дефектоскопии рассмотрена в работе [73].

7. ОРГАНИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

При организации и проведении ультразвукового контроля следует уделять особое внимание подготовке операторов, созданию условий, способствующих максимальной сосредоточенности оператора в процессе прозвучивания, а также стандартизации основных параметров контроля.

К ультразвуковому контролю сварных соединений могут быть допущены специалисты, имеющие соответствующую квалификацию. Согласно действующего в СССР «Временного положения» [15], квалификация оператора считается достаточной, если он прошел теоретическую и практическую подготовку по ультразвуковой дефектоскопии в соответствии с утвержденной Программой [140] и успешно выдержал испытания. Операторам, выдержавшим испытания, выдается удостоверение на право выполнения в течение года ультразвукового контроля сварных соединений, типы которых перечислены в удостоверении.

В последующем операторы, как правило, должны проходить проверочные испытания на контрольных образцах сварных соединений. Если оператор получил неудовлетворительную оценку или имел перерыв в работе от 4 до 12 месяцев, он лишается права на выполнение контроля до тех пор, пока не пройдет проверочные испытания. Операторы, имеющие перерыв в работе по ультразвуко-

вой дефектоскопии более 12 месяцев, лишаются права на выполнение контроля до прохождения полного курса обучения в соответствии с Программой [15].

Программа подготовки операторов по ультразвуковой дефектоскопии рассчитана на теоретическое (≈ 370 ч) и практическое (≈ 110 ч) обучение и предусматривает изучение следующих предметов;

1. Основы металловедения и сварки — 26 ч;
2. Методы неразрушающего контроля сварных соединений — 16 ч;
3. Физические основы ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений — 56 ч;
4. Аппаратура ультразвуковой дефектоскопии — 68 ч;
5. Технология ультразвукового контроля сварных соединений — 181 ч;
6. Основы электро- и радиотехники — 40 ч;
7. Радиотехнические устройства ультразвуковых дефектоскопов — 99 ч;
8. Техника безопасности — 8 ч.

Сосредоточенность оператора в процессе работы обуславливается многими факторами. Отрицательно сказываются неблагоприятные метеорологические условия и отсутствие удобного доступа к сварному соединению. Поэтому, согласно «Временному положению» [15], ультразвуковой контроль, как правило, должен выполняться при температуре не ниже $+5^{\circ}\text{C}$. При этом сварное соединение по возможности должно быть установлено в удобное для прозвучивания положение. Сосредоточенности оператора способствует также применение дополнительных индикаторов в дефектоскопе и приспособлений для перемещения искателя.

Для повышения достоверности ультразвукового контроля необходимо проведение ревизии аппаратуры и проверочных испытаний операторов. При ревизии аппаратуры проверяются чувствительность, точность работы глубиномера и другие параметры дефектоскопа. Измерение параметров производится с помощью специальных эталонов и электрорадиоизмерительных приборов.

Проверочные испытания оператора сводятся к сопоставлению данных ультразвукового контроля с результатами рентгенографирования или макроструктурного анализа.

Очевидно, что испытания целесообразно проводить систематически и непосредственно на сварных соединениях

контролируемого объекта. Если условия производства не позволяют применить рентгенографирование и макроструктурный анализ для исследования качества швов на объекте, то проверочные испытания могут проводиться на контрольных образцах сварных соединений. Во избежание ожогов рук оператора контроль сварного соединения должен выполняться после остывания металла в зоне перемещения искателя до 60°C и ниже.

Предпосылкой к введению предприятием ультразвукового контроля для оценки качества любых сварных соединений является наличие данных, подтверждающих достаточную надежность и воспроизводимость ультразвуковой дефектоскопии. Эта данные могут быть получены в результате предварительных экспериментальных исследований, проведенных данным предприятием по контролю этих соединений, или в результате практического применения ультразвуковой дефектоскопии на другом предприятии для контроля качества аналогичных по всем параметрам (вид и размеры соединения, марка металла, технология сварки) соединений. Если проверка показала, что еще не достигнута достаточная надежность выявления всех недопустимых дефектов, то метод ультразвуковой дефектоскопии может быть применен лишь в сочетании с методами рентгено- или гаммаграфирования. При этом каждое сварное соединение предварительно подвергают ультразвуковому контролю с целью отбраковки швов с крупными дефектами. Эти швы подлежат исправлению и повторному ультразвуковому контролю. Рентгенографирование (гаммаграфирование) соединения производится лишь тогда, когда по результатам ультразвуковой дефектоскопии в нем отсутствуют недопустимые дефекты. Использование ультразвуковой дефектоскопии для заблаговременной отбраковки швов сокращает объем рентгенографирования, что часто способствует снижению трудоемкости и времени контроля.

Разрешение на введение ультразвукового контроля предприятию выдает соответствующая координирующая организация на основе представленных предприятием материалов, подтверждающих надежность ультразвукового контроля, справки о наличии операторов и инструкции на контроль, составленной в соответствии с «Временным положением» [15].

Длительные сравнительные исследования выявляют возможности дефектов методами ультразвуковой дефектоско-

пии, рентгенографирования и макроструктурного анализа показывают, что при правильной организации может быть достигнута достаточно высокая достоверность и надежность ультразвукового контроля.

Глава VIII

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль стыковых сварных соединений осуществляют эхо-методом по совмещенной схеме (рис. 171, а, б, в, г, д). Значительно реже применяют теневой метод (рис. 171, е).

Вводить ультразвуковые колебания с помощью прямых искателей непосредственно в наплавленный металл нельзя, так как между грубой неплоской поверхностью усиления и искателем не удается создать удовлетворительный акустический контакт. Поэтому прозвучивание швов ведут с помощью призматических искателей, зигзагообразно перемещаемых в определенных пределах вдоль шва (рис. 171, а); шаг продольного перемещения составляет 2—5 мм. Для выявления дефектов, различным образом ориентированных в металле, шов следует прозвучивать с двух сторон усиления. При этом исключается также пропуск рядом расположенных дефектов, который может быть вызван интерференцией отраженных от них колебаний.

Швы толщиной более 150 мм прозвучивают прямым лучом с двух противоположных поверхностей металла (при возможности доступа к обеим поверхностям).

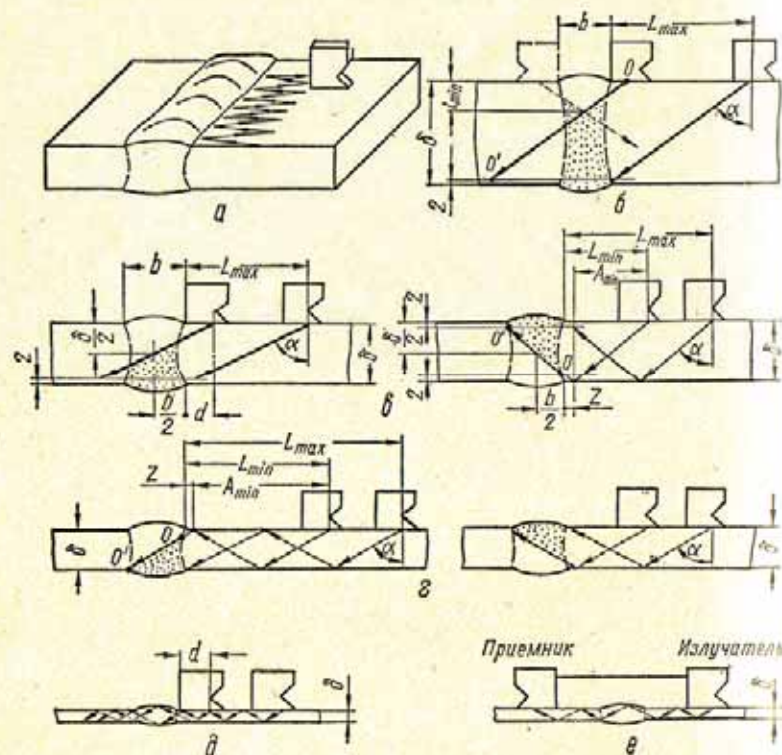
Проконтролировать весь объем наплавленного металла с одной поверхности не удастся, так как для прозвучивания таких швов однократно отраженным лучом чувствительность дефектоскопа оказывается недостаточной.

При прозвучивании шва с одной поверхности прямым лучом (рис. 171, б) остается непроконтролируемой мертвая зона, высота $l_{\min}$ которой связана с шириной усиления b соотношением

$$l_{\min} = \left(\frac{b}{2} + d \right) \operatorname{ctg} \alpha, \quad (223)$$

где b — ширина усиления; d — стрела искателя; α — угол ввода луча.

Величина мертвой зоны при контроле шва может быть легко определена по шкале глубиномера в дефектоскопах типа УЗД-НИИМ-5 или по координатной линейке. Значение мертвой зоны определяется цифрой по шкале H для $d + b/2$ на соответствующей шкале L .



ввода луча меньше 80° . В связи с этим искателями типовой конструкции оказывается возможным прозвучивать прямым лучом стыковые швы металла толщиной более 20—25 мм. Швы металла меньшей толщины могут быть прозвучены с помощью этих искателей только лучом, претерпевшим одно или несколько отражений в основном металле.

Значения углов ввода луча для прозвучивания шва определяют по формулам (224), (225) и (226) или по графикам.

На рис. 173 приведена одна из номограмм, рассчитанных автором для контроля стыковых швов [116]. По графику I этой номограммы в зависимости от отношения ширины валика усиления к толщине шва b/δ легко определить величину минимального угла ввода луча для прозвучивания шва прямым и однократно отраженным лучом. Для контроля следует применять искатель с углом ввода, равным или большим угла, рассчитанного по графикам или формулам. По графикам II и III определяют пределы перемещений выбранного искателя.

Обычно к дефектоскопу придают искатели с определенным углом ввода ультразвукового луча. Возможность применения одного из этих искателей для прозвучивания стыкового сварного соединения может быть оценена по шкале глубиномера (при использовании дефектоскопов системы НИИ мостов) или по координатной линейке. Для этого визируют линию в глубиномере или на координатной линейке располагают по шкале L , соответствующей данному искателю, против значения $\frac{b}{2} + d$

при прозвучивании прямым лучом ($\alpha_{пр}$) или $\frac{b}{2} + z$ при прозвучивании отраженным лучом ($\alpha_{отр}$). Затем по шкале H , соответствующей тому же искателю, отсчитывают значения $h_{пр}$ и $h_{отр}$. Очевидно, что если величины $h_{пр} \leq \frac{b}{2}$ и $h_{отр} \leq \frac{b}{2}$ или $h_{пр} + h_{отр} \leq \delta$, то искатели могут быть применены для прозвучивания данного сварного соединения.

Швы толщиной 10—25 мм контролируют искателем с углом ввода луча $\alpha = 65 \div 70^\circ$. При этом нижняя часть шва прозвучивается прямым или двукратно отраженным лучом, а верхняя — однократно отраженным (см. рис. 171, г).

Швы листов толщиной менее 10 мм могут быть прозвучены с помощью типовых искателей лучом, претерпевшим многократные отражения в основном металле (рис. 171, д). Мини-

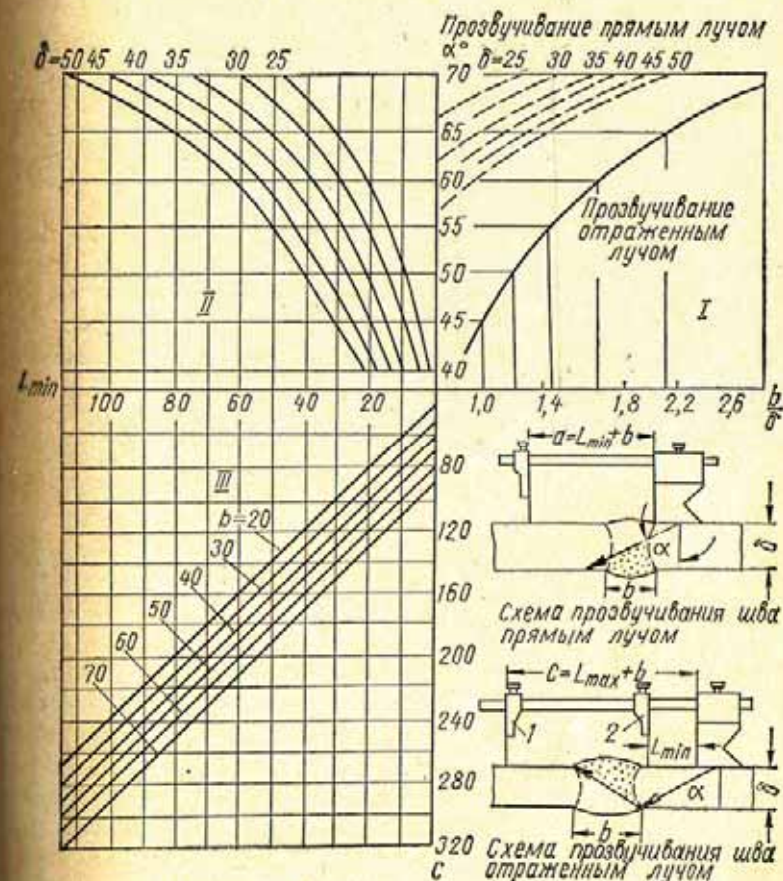


Рис. 173. Номограмма для контроля стыковых швов металла толщиной от 25 до 50 мм (расстояния L_{min} и L_{max} отсчитываются от передней грани искателя).

мальное число отражений n , претерпеваемых ультразвуковым лучом в основном металле до входа в шов, составляет

$$n_{min} = \frac{d}{\delta \operatorname{tg} \alpha}.$$

Для обеспечения высокой достоверности контроля швов малой толщины целесообразно использовать специальные

искатели с уменьшенной стрелой, позволяющие прозвучивать нижнюю часть шва прямым лучом [120].

При контроле стыковых швов любой толщины угол ввода луча и способ прозвучивания определяют собой зону перемещения искателя.

При прозвучивании шва прямым лучом искатель перемещают от валика усиления на расстояние (см. рис. 171, б, в)

$$L_{\max} \approx \delta \operatorname{tg} \alpha. \quad (227)$$

Расстояние $L_{\max}$ легко определить по шкалам глубиномера. Для этого на шкале H , соответствующей применяемому углу ввода луча, против визирной линии надо установить значение толщины металла δ , а на шкале L , соответствующей тому же искателю, прочесть расстояние $L_{\max}$.

В случае контроля шва однократно или многократно отраженным лучом искатель перемещают в зоне, ограниченной минимальным $L_{\min}$ и максимальным $L_{\max}$ расстояниями от валика усиления:

$$L_{\min} = n\delta \operatorname{tg} \alpha + z = A_{\min} + z; \quad (228)$$

$$L_{\max} = (n + 1) \delta \operatorname{tg} \alpha, \quad (229)$$

где n — число отражений ультразвукового луча в металле.

Величины $A_{\min}$ и $L_{\max}$ также определяют с помощью глубиномера. Для этого при определении $A_{\min}$ на шкале H , соответствующей данному искателю, против визирной линии устанавливают величину δn , а при определении $L_{\max}$ — величину $\delta(n + 1)$. При этом на шкале L , соответствующей тому же искателю, читают в первом случае расстояние $A_{\min}$, а во втором — $L_{\max}$.

При отсутствии глубиномера с проградуированными в миллиметрах шкалами необходимый угол ввода луча и пределы перемещения искателя могут быть определены с помощью универсальных координатных линеек [52, 60].

При использовании специализированных дефектоскопов со звуковым и оптическим индикаторами необходимо предотвратить возможность проникновения на выход приемника эхо-сигналов, отраженных от неровностей на поверхности валика усиления шва. Поэтому прозвучивание шва прямым лучом следует вести дефектоскопом,

работающим в режиме «Контроль от поверхности» и настроенным на прозвучивание глубины, несколько меньшей толщины металла, например, $\delta - 2$ мм. Прозвучивание шва отраженным лучом следует выполнять в режиме «Контроль по слоям» при величине слоя меньшей толщины металла, например, $\delta - 4$ мм, расположенного на глубине $h = n\delta + 2$ мм.

В случае применения дефектоскопов системы УЗД-НИИМ-5 (УЗД-59, УЗД-60, ДУК-11ИМ, ДУК-13ИМ)

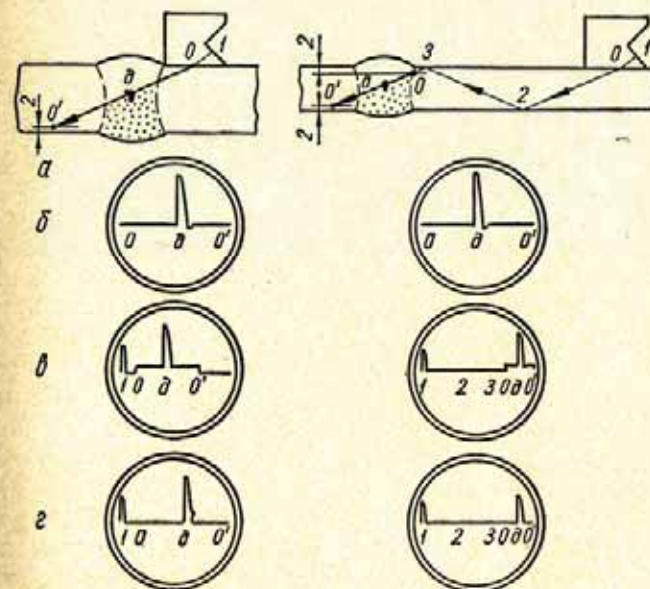


Рис. 174. Схемы прозвучивания шва (а) и экраны дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 (б), УДМ (в) и УЗД-7Н (г).

настройка прибора для контроля стыковых швов сводится к следующему: тумблер 7 (см. рис. 53) устанавливают в режим «Контроль от поверхности», а ручку 5 «Координаты дефекта» — в положение, соответствующее величине $\delta - 2$ мм при прозвучивании прямым лучом или $\delta - 4$ мм при прозвучивании отраженным лучом. Затем ручкой 2 «Глубина контроля» устанавливают длительность развертки так, чтобы метка глубиномера была расположена на правом конце линии развертки. Если предполагается вести прозвучивание шва отраженным лучом, то тумблер 7 переключают в положение «Контроль по слоям»

и устанавливают глубиномер в положение, соответствующее величине $\delta + 2$ мм. При такой настройке дефектоскопа линия развертки на экране (рис. 174, б) будет соответствовать участку пути ультразвукового луча в наплавленном металле шва (участок $O - O'$ на рис. 174, а).

Настройка дефектоскопов типа УДМ и УЗД-7Н несколько сложнее и производится с помощью координатной линейки, номограмм или тест-образцов. Экраны тру-

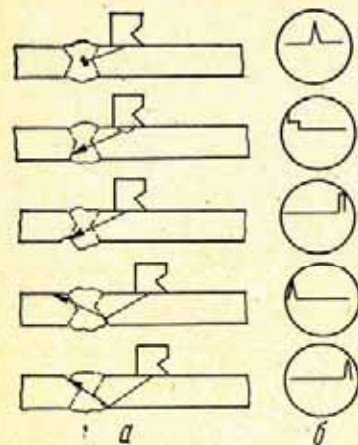


Рис. 175. Схемы прозвучивания стыковых швов (а) и изображения на экране дефектоскопа системы НИИ мостов ЛИИЖТ при регистрации эхо-сигналов от дефекта и неровностей на поверхности (б).

бок этих дефектоскопов, настроенных на прозвучивание стыковых швов, изображены на рис. 174.

Из рис. 174, б, в, г видно, что в дефектоскопах системы НИИ мостов ЛИИЖТ достаточно полно используется экран трубки и весьма просто производится настройка режима для контроля стыковых сварных соединений.

Следует отметить, что даже при соблюдении указаний по настройке режима работы дефектоскопа возможно возникновение на индикаторе ложных эхо-сигналов от грубых неровностей на поверхностях основного металла и шва. В этих случаях импульсы располагаются на правом конце линии развертки при

прозвучивании прямым лучом и правом или левом конце при прозвучивании отраженным лучом (рис. 175). Чтобы отличить ложные импульсы от импульсов, вызванных дефектами, производят измерение координат отражающей поверхности с помощью глубиномера и озвучивание этого места в различных направлениях. Если результаты измерений, озвучивания и осмотра поверхности контролируемого участка подтверждают возможность возникновения ложных отражений, то следует произвести дополнительную зачистку или прикоснуться пальцем, смоченным в контактирующей среде, к месту предполагаемой неровности на поверхности, вызывающей

появление ложного отражения. Уменьшение величины импульса при прикосновении пальца, связанное с переходом ультразвуковой энергии в палец, подтверждает, что отражение происходит именно от этой неровности.

1. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

Опыт контроля сварных соединений большой толщины (100 мм и более) показал, что ультразвуковая дефектоскопия является наиболее надежным средством их проверки. Швы толщиной 100–200 мм доступны гаммаграфированию, но чувствительность и производительность при этом оказываются весьма низкими. С помощью бетатрона можно контролировать швы толщиной до 500 мм, но реализация этого способа проверки затрудняется дороговизной аппаратуры и необходимостью строительства специально оборудованного помещения.

Трудности, возникающие при ультразвуковом контроле сварных соединений большой толщины, прежде всего связаны с необходимостью обеспечения высокой чувствительности контроля. Предельная толщина доступных проверке сварных соединений определяется величиной зерна металла, поэтому вопросы контроля соединений большой толщины и крупнозернистых швов целесообразно рассматривать совместно.

Сварные соединения толщиной до 150–200 мм из сталей перлитного класса, выполненные многослойной сваркой или электрошлаковой с последующей нормализацией, могут быть проконтролированы с помощью серийных ультразвуковых дефектоскопов. При прозвучивании обычно применяют искатели с углом призмы 30° или 40°. Часто для большей надежности контроля производят последовательное прозвучивание обоими искателями. Искатель с углом призмы 50° используют для выявления дефектов в мертвой зоне шва, которая не могла быть прозвучена искателями с меньшим углом призмы. В связи со значительным уменьшением чувствительности при возрастании толщины контроль рекомендуется вести, как правило, прямым лучом с обеих поверхностей изделия. Лишь при толщине швов не более 100–150 мм (в зависимости от структуры металла) допустим контроль однократно

отраженным лучом с одной поверхности соединения, если нет доступа к противоположной поверхности.

По этой же причине при контроле сварных соединений толщиной более 200—250 мм возникает необходимость в увеличении чувствительности по мере углубления ультразвукового импульса в толщу металла шва. Обычно предел временной регулировки чувствительности серийных дефектоскопов оказывается недостаточно для выравнивания чувствительности по глубине. В этом случае приходится прибегать к послойному способу контроля [65], при котором сначала на пониженной чувствительности контролируется верхняя часть металла шва, а затем при переходе к контролю более глубоких слоев чувствительность увеличивается. Для контроля послойным способом сварных соединений толщиной до 700 мм разработаны специальные дефектоскопы, в которых с помощью переключателя одновременно меняется задержка развертки и чувствительность (например дефектоскоп УДЦ-13). Возможность ультразвукового контроля сварных соединений особо большой толщины и сварных соединений из материала с крупнозернистой структурой, в частности, из аустенитных сталей, в большой степени зависит от технологии сварки и термообработки. Поэтому при возникновении трудностей в проведении контроля методика дефектоскопии отрабатывается на образцах с моделями дефектов, расположенных на разной глубине. В начале исследования пытаются обнаружить близкие дефекты, а затем — более глубоко залегающие. Если при выявлении искусственных дефектов никаких сигналов на экране не наблюдается при максимальной чувствительности дефектоскопа, то рекомендуется использовать искатель с уменьшенным углом призмы, увеличенным диаметром пьезопластины и пониженной рабочей частотой. Не следует применять очень низкие частоты, так как при этом ухудшается отношение сигнал — шум. При большом уровне структурных помех для увеличения отношения сигнал — шум необходимо уменьшить угол призмы искателя и длительность, но не амплитуду зондирующего импульса, увеличить диаметр пластины и применить фокусировку ультразвука (только для выявления дефектов в ближней зоне).

Для оценки качества швов большой толщины по данным ультразвуковой дефектоскопии необходимо изучить технологию сварки данного соединения, характер возникающих в нем дефектов при возможных нарушениях нор-

мального режима сварки, а также особенности выявления этих дефектов при озвучивании их с разных сторон.

В большинстве случаев в результате предварительных исследований удается разработать достаточно четкую методику определения качества швов больших толщин с помощью ультразвуковой дефектоскопии.

В настоящее время ультразвуковая дефектоскопия применяется для проверки качества многих стыковых сварных соединений толщиной до 700 мм, например, для контроля электрошлаковой сварки корпусов доменных печей, станин гидравлических прессов, корпусов атомных реакторов и т. п. [143, 146, 152]. Однако в некоторых случаях нельзя добиться выявления дефектов в сварных соединениях. Это обычно имеет место при контроле аустенитных сталей с размером зерна порядка 1 мм и более, а также перлитных сталей с крупной видманштеттовой структурой, особенно при значительной толщине их. Таким образом, существует класс сварных соединений, не проверяемых ультразвуком при современном состоянии этого метода дефектоскопии.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ ШВОВ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

Основная трудность, возникающая при контроле сварных швов малой толщины (менее 10—15 мм), состоит в том, что ложные сигналы, отраженные от валика усиления или подкладной планки, почти совпадают по времени с ожидаемыми сигналами от дефектов.

Для повышения разрешающей способности следует стремиться, чтобы средняя часть или корень шва, где наиболее вероятно появление непроваров и шлаков, контролировалась прямым лучом. Это достигается при больших углах призмы и малой стреле искателя. Верхняя часть шва контролируется однократно отраженным лучом.

Чем меньше толщина сварного шва, тем больше должен быть угол призмы искателя. При углах 55—57° появляется довольно интенсивная поверхностная волна, что ограничивает дальнейшее увеличение угла призмы. При возрастании угла призмы необходимо увеличить стрелу искателя, чтобы не возникало отражения ультразвука от переднего угла призмы. Избежать это можно,

размещая пьезопластину ближе к контактной поверхности призмы, а также придавая пьезопластине полукруглую или прямоугольную формы и уменьшая ее размеры. При этом для сохранения достаточно высокой направленности излучения необходимо повышать частоту. Высокая частота в то же время способствует дальнейшему повышению лучевой разрешающей способности за счет уменьшения длительности зондирующего импульса.

На рис. 176 показан искатель типа ИЦ-3Б, разработанный с учетом специфики контроля стыковых соединений малой толщины.

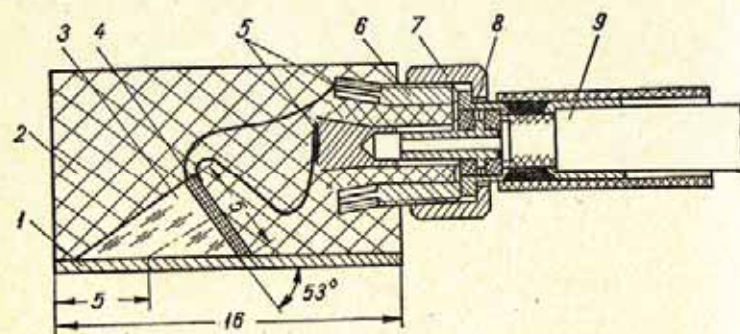


Рис. 176. Искатель типа ИЦ-3Б системы ЦНИИТМаш для контроля тонких сварных швов:

1 — протектор; 2 — корпус (эпоксидная смола); 3 — пьезопластина (ЦТС-19); 4 — электрические контакты; 5 — втулка; 6 — гайка; 7 — контактный штырь; 8 — кабель АВК-3 диаметром 3,5 мм

Настройка чувствительности и измерение координат отражающих поверхностей производится посредством тест-образца с угловыми или сегментными отражателями (см. рис. 150).

Для контроля сварных соединений труб, выполненных односторонней сваркой, применяют аналогичные искатели, контактная поверхность которых соответствует форме трубы [80]. Если диаметр трубы менее 25 мм, необходимо применять искатели с фокусирующим протектором (см. § 3 гл. II), предотвращающим расхождение лучей в стенке трубы. Использование фокусирующего протектора полезно также при контроле труб большого диаметра (25—60 мм).

Настройка аппаратуры при контроле труб также выполняется по угловому отражателю, хорошо имитирую-

щему основной тип дефекта — непровар в корне шва.

Размеры угловых отражателей определяются толщиной контролируемого соединения и типом искателя. Так, например, для искателя с углом призмы $\beta = 53^\circ$ при контроле швов толщиной 7—15 мм размеры углового отражателя составляют 5 мм² (глубина 2 мм, ширина 2,5 мм). Бракуются соединения с дефектами, эхо-сигнал от которых превосходит сигнал от углового отражателя по амплитуде и условной высоте. Дефекты типа отдельных пор диаметром 1 мм и менее при такой чувствительности практически не выявляются.

В сварных соединениях, выполняемых газовой сваркой, допускается технологический непровар корня шва. Указанные нормы разбраковки по угловому отражателю учитывают допустимость такого дефекта [121].

В настоящее время для провара корня шва применяется аргоно-дуговой способ. В этом случае может возникнуть провис наплавленного металла сварного шва, который дает ложный сигнал, подобный сигналу от дефекта. Для

уменьшения ложного сигнала полезно увеличение угла призмы искателя. Некоторые исследователи [120] рекомендуют отказаться от контроля однократно отраженным лучом верхней части сварного шва, где выявляемые ультразвуком дефекты встречаются весьма редко, поскольку сигналы именно от этих дефектов могут быть спутаны (по положению на линии развертки) с сигналами от провиса.

Для контроля сварных соединений труб поверхностей нагрева котлов было предложено [72] использовать раздельно-совмещенный искатель типа «Тандем». Это обеспечивает наилучшую отстройку от ложных эхо-сигналов, вызываемых отражением от грата шва, и создает благоприятные условия обнаружения наиболее характерного дефекта типа вертикального непровара. Предложенная схема контроля обеспечивает надежное выявление раскрытых непроваров, а также пор размером 0,5 мм и более. Однако даже в этом случае не выявляются «сли-

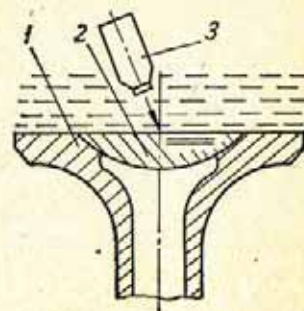


Рис. 177. Схема контроля сварного шва заглушки клапана поверхностными волнами:

1 — корпус; 2 — заглушка; 3 — искатель.

пания» сварного шва, которые являются весьма опасными и наиболее вероятными дефектами для данного вида сварки.

Нередко необходимо установить глубину провара в стыковых соединениях малой толщины. Для определения высоты непровара в односторонних стыковых швах целесообразно применять зеркально-теневой метод ультразвуковой дефектоскопии. Ширина непровара в этом случае может быть определена по экспериментально построенной кривой, связывающей относительное изменение донного сигнала с глубиной модели непровара [130].

По иному решена задача оценки глубины проплавления в сварном шве клапана автомобильного двигателя с натриевым охлаждением [123]. Контроль ведется иммерсионным методом (рис. 177). Возбуждаемая искателем 3 поверхностная волна направляется от центра клапана к сварному шву. Частоту ультразвуковых колебаний подбирают такой, чтобы эффективная толщина слоя, в котором распространяется поверхностная волна, равнялась требуемой глубине провара. Уменьшение глубины провара приводит к появлению отраженного сигнала [179].

3. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Метод ультразвуковой дефектоскопии стыковых сварных соединений толщиной от 10 до 50 мм широко используется при изготовлении, ремонте и эксплуатации пролетных строений железнодорожных мостов, локомотивов и вагонов.

Ультразвуковой контроль выполняют с помощью дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 в соответствии с правилами, утвержденными Министерством путей сообщения СССР. Контроль осуществляется при частоте ультразвука 2,5 Мгц и основных параметрах, указанных в табл. 21.

При обнаружении недопустимых пороков в шве производят ремонт дефектного участка с последующим повторным контролем.

В случае обнаружения включений, расположение и размеры которых по данным ультразвуковой дефектоско-

Основные параметры контроля некоторых стыковых швов в конструкциях железнодорожного транспорта

Таблица 21

Материал	Толщина δ , мм	Угол призмы β , град	Условная чувствительность по эталону № 1
Сталь малоуглеродистая низколегированная	10—25	50	25÷40
	30—50	50	30÷35
		40	35÷40
Алюминиевый сплав АМг-6Т	8—12	50	20
	20—30	50	25

пии не позволяют забраковать шов, сомнительный участок шва подвергают рентгенографированию с целью уточнения характера включений.

При отсутствии на заводе оборудования для просвечивания данный участок также подвергают ремонту.

На мостовых заводах до 1962 г. рентгенографированию подвергали каждый стыковой шов I категории, даже если в нем по данным ультразвукового контроля отсутствовали какие-либо дефекты. При этом стремились выявить одиночные недопустимые пороки, возможно пропущенные при ультразвуковом контроле.

Опыт применения комплексного контроля показал, что метод ультразвуковой дефектоскопии позволяет выявлять абсолютное большинство недопустимых пороков, лежащих в пределах и даже за пределами чувствительности рентгенографирования.

С целью сокращения объема просвечивания швов I категории при изготовлении пролетных строений были проведены сравнительные исследования надежности контроля швов методами ультразвуковой дефектоскопии и рентгенографирования. Исследования проводили на специально сваренных образцах толщиной 12, 16, 20, 30, 40 и 50 мм. Для каждой толщины металла в стыковых швах

были созданы дефекты в виде пор, шлаковых включений, непроваров и трещин.

Ультразвуковой контроль всех образцов выполняли независимо друг от друга тремя операторами, которым результаты рентгенографирования не были известны.

Анализ результатов комплексного контроля и последующего металлографического исследования 30 образ-

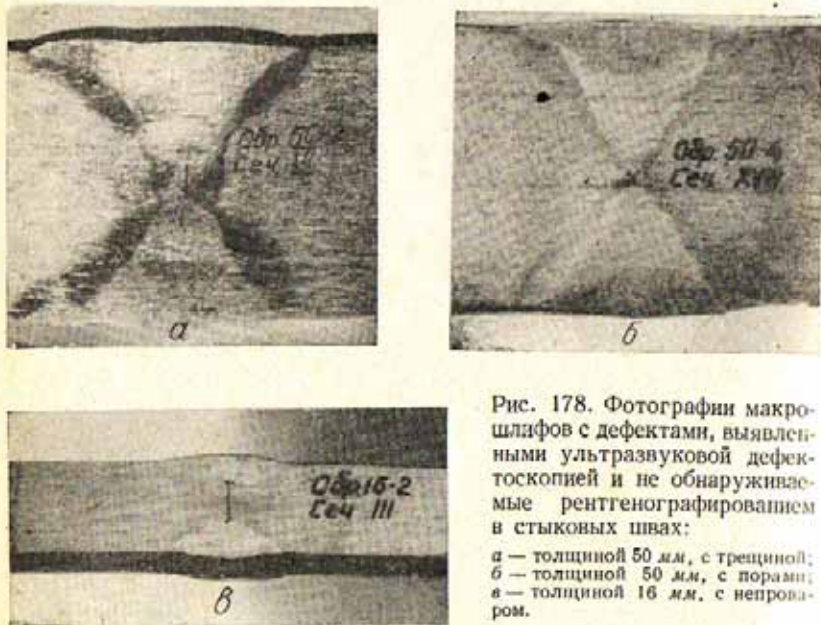


Рис. 178. Фотографии макрошлифов с дефектами, выявленными ультразвуковой дефектоскопией и не обнаруживаемые рентгенографированием в стыковых швах:

а — толщиной 50 мм, с трещиной;
б — толщиной 50 мм, с порами;
в — толщиной 16 мм, с непроваром.

цов показал, что все дефекты, видимые на рентгенограммах, были обнаружены одним из операторов с помощью ультразвукового контроля. Трещины и непровары методом ультразвуковой дефектоскопии выявляются более надежно, чем рентгенографированием. Так, в двух образцах, фотографии макрошлифов которых приведены на рис. 178, а, в, ультразвуком были зафиксированы трещины и непровары, не обнаруженные рентгенографированием.

Одиночные включения малой величины, не выходящие за пределы допусков, ультразвуковой дефектоскопией в общем обнаруживаются менее надежно, чем рентгенографированием. Выявляемость одиночных дефектов ультразвуковым методом во многом определяется сосредото-

ченностью оператора. Необходимо отметить, что при толщинах свариваемого металла более 30 мм подобные дефекты в равной мере могут быть пропущены и рентгенографированием. На рис. 178, б показан макрошлиф, на котором видны поры, пропущенные при рентгенографировании и выявленные ультразвуковой дефектоскопией.

При рентгенографировании швов толщиной более 30 мм число пропусков дефектов оказалось больше, чем при ультразвуковом контроле тех же швов. Так, если при ультразвуковой дефектоскопии стыковых швов металла толщиной 50 мм имел место только один случай пропуска дефекта (шлакового включения), то в процессе рентгенографирования тех же швов пропусков было шесть. При ультразвуковом контроле швов металла толщиной 40 мм было два случая пропуска дефектов, а при рентгенографировании — четыре.

Учитывая большой опыт применения ультразвуковой дефектоскопии в мостостроении и результаты исследований, с 1962 г. отменено обязательное рентгенографирование швов при изготовлении пролетных строений. Рентгенографирование оставлено лишь для периодической проверки работы оператора, а также для уточнения в ряде случаев характера выявленных ультразвуком дефектов.

С 1962—63 гг. ультразвуковая дефектоскопия используется как самостоятельный метод для оценки качества стыковых сварных соединений при изготовлении пролетных строений железнодорожных мостов, тележек электровозов, тепловозов и электровагонов. По сравнению с методами рентгенографирования метод ультразвуковой дефектоскопии стыковых соединений в условиях заводов в 3—4 раза производительнее и экономичнее.

Весьма эффективным оказалось применение этого метода при монтаже новых и обследовании эксплуатируемых пролетных строений, где он уже более 10 лет применяется практически без дублирования просвечиванием. Производительность ультразвукового контроля в условиях монтажа и эксплуатации в 3—5 раз выше производительности гаммаграфирования.

Оценка качества швов сварных соединений производится в соответствии с действующими техническими условиями. Критерии оценки качества некоторых стыковых швов по результатам ультразвуковой дефектоскопии приведены в табл. 22 [16, 116, 132].

Таблица 22

Критерии оценки качества стыковых сварных соединений в некоторых конструкциях железнодорожного транспорта по результатам ультразвуковой дефектоскопии (δ — толщина свариваемых листов)

Тип конструкции	Состояние шва по результатам ультразвуковой дефектоскопии	Оценка
Пролетное строение	Включений нет Одно включение протяженностью более $0,02\delta + 5$ мм в крайних четвертях ширины швов и в зонах концентрации напряжений Одно включение протяженностью более $0,04\delta + 5$ мм Пять и более включений любой величины на участке 400 мм Два любых включения при расстоянии между ними менее 45 мм	Годен Брак » » »
Вагоны, включая вагоны электропоездов и дизельпоездов	Швы, работающие на растяжение или на отрыв Включений нет Три или более включения любой величины на участке 200 мм Два любых включения при расстоянии между ними менее 45 мм Швы, работающие на сжатие Включений нет Семь или более включений любой величины на участке 400 мм Два любых включения при расстоянии между ними менее 10 мм	Годен Брак » Годен Брак »
Котел паровоза, цилиндрическая часть	Включений нет Одно включение протяженностью более 5 мм Два любых включения при расстоянии между ними менее 50 мм Семь или более включений любой величины на 1 м длины шва Включения протяженностью менее 5 мм при расстоянии между любыми включениями более 50 мм и общем числе их менее семи на 1 м длины шва	Годен Брак » » Годен

Продолжение табл. 22

Тип конструкции	Состояние шва по результатам ультразвуковой дефектоскопии	Оценка
Котел паровоза, поперечный шов циркуляционной трубы	Включений нет Одно включение протяженностью более 5 мм Два любых включения при расстоянии между ними менее 50 мм Три или более включений в шве Два включения протяженностью менее 5 мм при расстоянии между ними более 50 мм	Годен Брак » » Годен

4. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПАРОПРОВОДАХ И КОТЛАХ

Сварные соединения труб паропроводов диаметром 130 мм и более с толщиной стенок 15—60 мм выполняют чаще всего на подкладных кольцах (рис. 179), хотя в последнее время используют способ сварки без подкладных колец с проплавлением корня шва.

В настоящее время ультразвуковую дефектоскопию применяют как обязательный способ проверки качества этих соединений, а просвечивание проникающими излучениями — как факультативный способ. Ультразвуковой контроль выполняют по межведомственной инструкции, согласованной с Госгортехнадзором [78].

Для контроля применяют дефектоскопы с рабочей частотой 1,8 Мгц — УЗД-7Н, УДМ-1М, УЗД-60 и призматические искатели с углом $\beta = 40^\circ$. При угле $\beta = 40^\circ$ можно контролировать чувствительность по отражению от подкладного кольца и по положению на экране дефектоскопа легко отличать эти отражения от сигналов, связанных с дефектами.

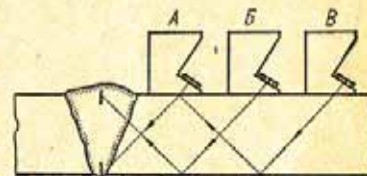


Рис. 179. Схема контроля сварного соединения паропровода.

Верхнюю часть сварного шва с толщиной стенки до 40 мм контролируют однократно отраженным лучом (рис. 179, положение Б), а нижнюю часть — двукратно отраженным лучом (положение В). Контроль производится в один прием, т. е. верхняя и нижняя часть шва проверяются за одно движение искателя. Сварные швы толщиной более 40 мм контролируют в два приема: сначала проверяют корневую часть шва прямым лучом (положение А), а затем — верхнюю часть однократно отраженным лучом.

Настройка чувствительности производится по угловому отражателю площадью 5 мм² в тест-образце. Если проверка ведется за один проход искателя, отражатель выполняется только на внутренней стороне тест-образца, а если за два прохода, — то на внутренней и на внешней поверхностях. При поиске дефектов чувствительность увеличивается в 1,5—2 раза, а при исследовании дефектов чувствительность восстанавливается.

Сварные соединения, в которых не обнаружены дефекты с амплитудой эхо-сигнала больше, чем от отражателя площадью 5 мм², считают безусловно годными и оценивают баллом 3. В дальнейшем учитывают дефекты только с сигналами большей амплитуды. Сварные соединения бракуют (оценивают баллом 1) в следующих случаях:

а) обнаружен хотя бы один дефект на расстоянии более 5 мм от поверхности сварного соединения. Такие дефекты выявляются труднее дефектов, расположенных у поверхности [74];

б) обнаружен дефект в корне шва, от которого амплитуда импульса или пробег его по экрану больше, чем от отражателя площадью 7 мм²;

в) в корне шва обнаружен одиночный дефект, условная протяженность которого превышает 10%, или ряд дефектов, суммарная условная протяженность которых превышает 20% от периметра шва.

Сварные соединения с дефектами в корне шва, амплитуда эхо-сигнала от которых больше чем от отражателя площадью 5 мм², но допустимые с точки зрения изложенных выше требований, оцениваются баллом 2 и допускаются к эксплуатации, если характер отражения от них не имеет типичных признаков отражений от трещин.

Аналогично проверяют кольцевые сварные соединения донышек с камерами коллекторов паровых котлов.

Многолетняя практика ультразвукового контроля сварных швов паропроводов и коллекторов показала надежное выявление опасных дефектов типа трещин и непроваров, поэтому контроль ведут без дублирования просвечиванием.

Ультразвуковой контроль без дублирования просвечиванием также применяют при оценке качества швов котлов паровозов при их ремонте. Прозвучиванию подвергают всю длину швов, имеющих иногда протяженность до 15 м. Внутреннюю часть шва толщиной 18 мм прозвучивают прямым лучом, а наружную часть — однократно отраженным, излучаемым искателем с углом прisms $\beta = 50^\circ$. Для контроля используют дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5. Участки швов, в которых по данным ультразвукового контроля обнаружены дефекты с условной протяженностью 5 мм и более, подлежат вырубке, последующей заварке и контролю.

Аналогичную методику ультразвукового контроля применяют для исследования качества сварки циркуляционных труб диаметром 90 мм при толщине стенки 5 мм. Валик усиления кольцевого шва, в соответствии с техническими условиями на сварку, зачищают до плавного перехода к основному металлу. Прозвучивание шва производят многократно отраженным лучом, излучаемым искателем с углом прisms $\beta = 50^\circ$. Искатель с обычной плоской рабочей гранью перемещают по цилиндрической поверхности трубы. При этом не наблюдается эхо-сигналов как от наружного зачищенного валика усиления, так и от наплывов металла (грата), расположенного на внутренней поверхности трубы. Более того, ультразвуковой дефектоскопией не обнаруживаются включения шлака в этих напльвах, которые при рентгенографировании дают ложное представление о наличии дефектов в шве трубы [32].

5. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Типичными дефектами в сварных соединениях из алюминиевых сплавов являются одиночные поры, скопления большого числа мелких пор диаметром порядка 0,05 мм с расстоянием между ними от 0,05 до 0,1 мм, непровары, трещины, окисные пленки, а также включения вольфрама и его окисей. Все перечисленные дефекты

сильно отличаются по удельному акустическому сопротивлению от алюминиевого сплава и поэтому должны вызывать значительное отражение ультразвука, распространяющегося в шве при контроле.

Большой коэффициент прозрачности границы органическое стекло-алюминий по сравнению с границей органическое стекло-сталь, меньшее затухание ультразвука в алюминиевых сплавах, чем в сталях, а также лучшее состояние поверхности позволяют использовать для контроля ультразвуковые колебания с частотой 2,5 МГц и более. По этой же причине при одной и той же предельной чувствительности контроля соединений из стали и алюминиевых сплавов условная чувствительность аппаратуры в последнем случае будет существенно меньше, чем в первом (см. табл. 21). Для прозвучивания можно применять типовые призматические искатели. Как и при контроле стальных изделий, истинное значение угла наклона акустической оси искателя в алюминиевом сплаве несколько отличается от значения угла преломления, рассчитанного по выражению Снеллиуса (см. рис. 113, б).

Как показывают расчеты (см. гл. VI) и эксперимент, малое отличие скорости распространения сдвиговой волны в алюминии и стали ($\approx 5\%$) дает возможность использовать глубиномер дефектоскопа, проградуированный для стали, для измерения глубины расположения дефектов в швах из алюминиевых сплавов [29].

Исследования показали, что при ультразвуковой дефектоскопии в стыковых швах из алюминиевых сплавов выявляются все наиболее опасные дефекты, в том числе окисные пленки и густые сетки мелких пор, не обнаруживаемые рентгенографированием. Так, например, из девяти швов, не имеющих дефектов по данным рентгенографирования, в семи с помощью ультразвукового дефектоскопа были обнаружены дефекты большой протяженности. При механических испытаниях эти швы показали низкую вибрационную прочность по сравнению с прочностью двух остальных швов, в которых при ультразвуковом контроле не обнаружены дефекты. В изломе всех семи швов были видны окисные пленки. Излом двух бездефектных соединений прошел по основному металлу.

Вольфрамовые включения ультразвуковой дефектоскопией выявляются значительно хуже.

Для прозвучивания стыковых соединений толщиной

10—40 мм оказалось более удобно применять искатели с углом призмы 50° . При прозвучивании швов искателями с меньшим углом призмы часто возникали ложные сигналы от неровностей и скоплений контактирующей жидкости на поверхности основного металла [32]. Таким образом, методики контроля сварных соединений из алюминиевых сплавов и сталей идентичны.

В то же время методика контроля сварных соединений из меди имеет ряд существенных отличий. Объясняется это тем, что превышение скорости продольной волны в плексигласе ($C_{l_1} = 2670$ м/сек) над скоростью сдвиговой волны в меди ($C_{l_2} = 2500$ м/сек) не позволяет ввести в медь чистую сдвиговую волну достаточной интенсивности под большим углом ввода луча α , необходимым для контроля стыковых сварных соединений.

Использование призм из материалов, скорость ультразвука в которых $C_{l_1} < C_{l_2}$, пока не дало положительных результатов. Более эффективным оказывается иммерсионный способ возбуждения сдвиговой волны в соединении с помощью специального искателя с комбинированной преломляющей призмой (рис. 180). При иммерсионном способе контроля и больших углах ввода α наблюдается существенная зависимость угла α от температуры t . Поэтому углы β_0 и θ_0 искателя необходимо выбирать так, чтобы обеспечивалась термостабильность угла ввода α в рабочем диапазоне температур $t = 5 \div 40^\circ \text{C}$. Методика и номограмма для расчета значений углов β_0 и θ_0 по заданному значению α рассмотрены в гл. XI.

Большое затухание сдвиговых волн в меди, а также рассеяние пучка на границе зерен в зоне наплавленного металла определяют более низкое значение оптимальной частоты ультразвука (1,5—1,8 МГц) по сравнению с диапазоном оптимальных частот для контроля аналогичных соединений из сталей и легких сплавов (2,5—5 МГц).

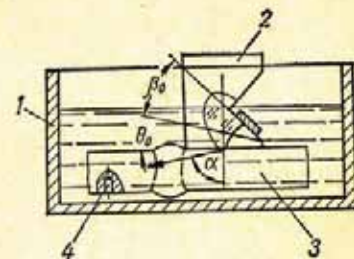


Рис. 180. Схема контроля стыкового сварного соединения из меди:

1 — ванна с водой; 2 — искатель с термостабильной системой ввода ультразвукового луча; 3 — соединение; 4 — искусственный отражатель для настройки на заданную эквивалентную чувствительность.

Данные положения использованы при разработке методики контроля сварных соединений медных шин толщиной 5—12 мм. Малая толщина этих соединений, применение искателей указанного вида и необходимость выявления дефектов малого размера исключают возможность эталонирования условной и предельной чувствительности соответственно по эталону № 1 и по отверстию с плоским дном или угловому отражателю в тест-образце. Поэтому в данном случае приходится ограничиваться эталонированием эквивалентной чувствительности по тест-образцу из контролируемого соединения с отражателем в виде вертикального отверстия диаметром 1 мм (рис. 180). Данная методика используется уже длительное время при ультразвуковом контроле медных шин, который введен в замен применяемого ранее метода рентгенографирования.

Глава 1X

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ УГЛОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ

Угловые швы сварных соединений долгое время контролировали в основном внешним осмотром и промером. Более надежные методы контроля в промышленности почти не применяли.

Вместе с тем, в угловых швах могут быть обнаруживаемые внешним осмотром внутренние дефекты в виде пор, шлаковых включений, непроваров и трещин, которые снижают прочность соединений, особенно при воздействии вибрационных нагрузок.

Разработанные в 1957 г. [32] аппаратура и методика позволили применить для контроля качества угловых швов метод импульсной ультразвуковой дефектоскопии.

В настоящее время ультразвуковая дефектоскопия является единственным методом, выявляющим в угловых швах тавровых и крестовых соединений трещины с раскрытием менее 0,2 мм и тонкие непровары в корне шва.

На рис. 181 приведены схемы прозвучивания угловых швов тавровых соединений, которые могут быть использованы для выявления внутренних пороков.

Наиболее эффективным является метод ввода ультразвукового луча в шов через основной металл привариваемого листа (схема 3), так как он позволяет выявить все виды внутренних дефектов в угловых швах тавровых и крестовых соединений и наиболее прост. При этом угол ввода колебаний должен быть таким, чтобы направление луча было приблизительно перпендикулярным к сечению, в котором площадь дефектов максимальна. Анализ геометрии распространения луча показывает, что прозвучивание наплавленного металла шва с катетами K_1 и K_2 при толщине привариваемого листа δ может быть осуществлено одним искателем с углом ввода луча α_1 или последовательно двумя искателями с углами ввода луча α_1 и α_2 (рис. 182).

Угол ввода луча α_1 определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \approx \frac{K_1}{K_2}. \quad (230)$$

Так как $K_1 \approx K_2 = K$, то $\alpha_1 = 45^\circ$. Искателем с углом ввода луча $\alpha_1 = 45^\circ$ полностью прозвучивается угловой шов, для которого справедливо соотношение

$$K \leq 0,5\delta.$$

Это соотношение обычно имеет место при $\delta > 30$ мм. При толщинах $\delta \leq 30$ мм искателем с углом ввода луча $\alpha_1 = 45^\circ$ прозвучивается лишь часть шва, заштрихованная на рис. 182 сплошными линиями. Остальная часть шва (заштрихована пунктирными линиями) может быть прозвучена искателем с углом ввода луча $\alpha_2 > \alpha_1$. Минимальная величина угла α_2 , обеспечивающая надежный контроль объема шва, заштрихованного пунктирными линиями, определяется из равенства

$$\operatorname{tg} \alpha_2 \approx \frac{K_1}{0,5\delta}. \quad (231)$$

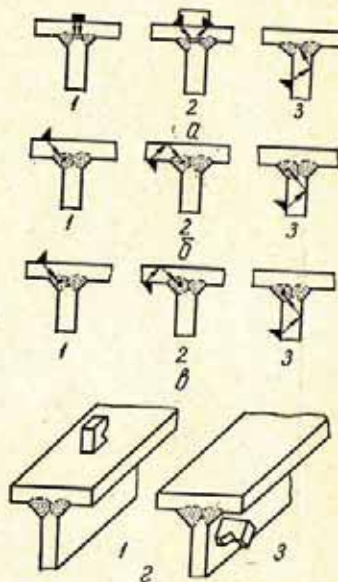


Рис. 181. Схемы прозвучивания угловых швов при выявлении:

а — непровара в корне шва; б — продольных трещин; в — пор и шлака; г — поперечных трещин.

Следует отметить, что для повышения надежности выявления дефектов, расположенных у поверхности шва, целесообразно применять искатели с углом α_1 , несколько меньшим 45° [99].

При контроле искатель перемещают в пределах, определяемых минимальным $L_{\min}$ и максимальным $L_{\max}$

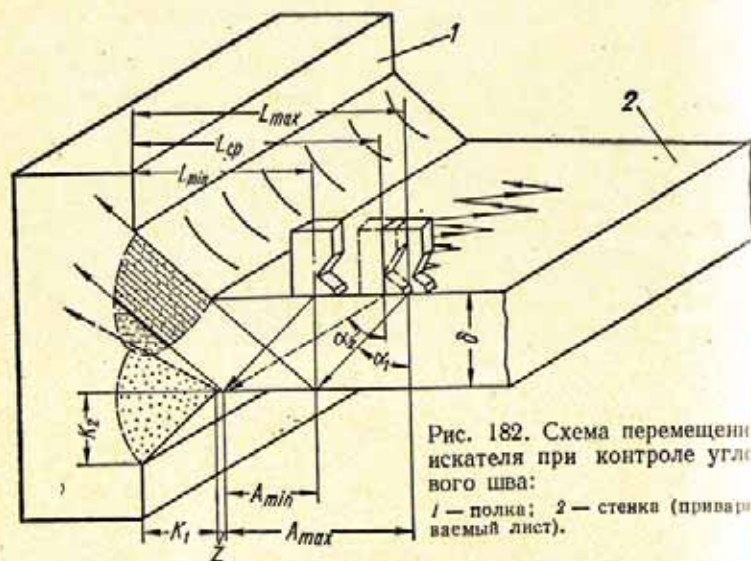


Рис. 182. Схема перемещения искателя при контроле углового шва:
1 — полка; 2 — стенка (привариваемый лист).

расстояниями его от полки (рис. 182). Эти расстояния могут быть определены по следующим формулам:

$$L_{\min} \approx \delta \operatorname{tg} \alpha_1 + K_1 + z = A_{\min} + K_1 + z; \quad (232)$$

$$L_{\max} \approx 2\delta \operatorname{tg} \alpha_1 + K_1 = A_{\max} + K_1. \quad (233)$$

Расстояние от искателя до полки, при котором прямой ультразвуковой луч проходит через ось симметрии таврового соединения, составляет

$$L_{cp} = 0,5\delta \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (234)$$

Очевидно, что корень шва может быть прозвучен прямым лучом, если $L_{cp} \geq K_1 + d$. При невыполнении данного неравенства прозвучивание ведут однократно отраженным лучом, перемещая искатель на расстоянии

$$L_{cp} = 1,5\delta \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (235)$$

Расстояния $A_{\min}$, $A_{\max}$ и L_{cp} определяют по шкалам глубиномера или координатной линейки так же, как при контроле стыковых швов (см. гл. VIII).

При перемещении искателя не рекомендуется приближать его к шву ближе, чем на расстояние $L_{\min}$, так как в противном случае могут появиться импульсы, отраженные от дефектов в противоположном шве. Для ограничения пределов перемещения искателя может быть использован держатель (см. гл. III).

В процессе прозвучивания швов выбоины на поверхности металла иногда вызывают отражение ультразвука, что усложняет контроль и может привести к ложному

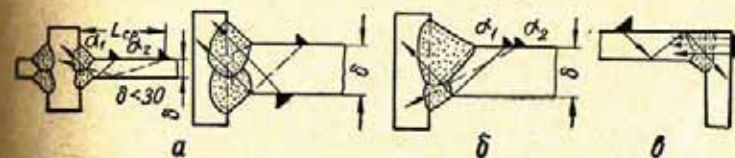


Рис. 183. Схемы прозвучивания угловых швов:

а — таврового соединения с К-образной разделкой; б — таврового соединения с V-образной разделкой; в — углового соединения.

представлению о наличии дефектов, в действительности отсутствующих в шве. Для того чтобы индикаторы не реагировали на ложные эхо-сигналы, прозвучивание углового шва следует вести дефектоскопом в режиме «Контроль по слоям». В этом случае на экране дефектоскопа «просматривается» участок пути ультразвукового луча через наплавленный металл шва и индикаторы реагируют на импульсы, отраженные от дефектов шва. Ложные эхо-сигналы достаточно легко можно отличить от импульсов, вызванных дефектом, путем измерения координат расположения отражающей поверхности. При этом прежде всего следует измерить расстояние L от искателя до отражающей поверхности. Для выявления поперечных трещин следует дополнительно прозвучивать каждый шов соединения наклонным искателем по схеме 1 или 3 (рис. 181, г).

Схемы прозвучивания угловых швов в соединениях различного вида показаны на рис. 183.

Следует отметить, что путем измерения координат расположения выявленного включения и озвучивания его под различными углами удастся с большим приближением, чем это имеет место при контроле стыковых швов, определять характер дефектов.

В некоторых тавровых соединениях допускается технологический непровар, не превышающий заданной величины. Размеры непровара определяют путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от непровара с амплитудой эхо-сигналов от моделей непровара в тест-образце соединения или безталонным методом, разработанным в НИИ мостов ЛИИЖТ [99]. Методики контроля угловых швов тавровых и крестовых соединений идентичны и зависят в основном от типа разделки. Контроль угловых швов соединений внахлестку имеет определенную специфику.

1. КОНТРОЛЬ УГЛОВЫХ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

В ответственных тавровых и крестовых соединениях сварных металлоконструкций, как правило, предусматривается полный провар в корне шва. Толщина привариваемых листов (стенки) обычно составляет 8—20 мм.

Качество швов таких соединений может быть проконтролировано методом ультразвуковой дефектоскопии путем прозвучивания наплавленного металла однократно отраженным лучом (рис. 183, а). При этом непровар в корне шва наиболее устойчиво выявляется искателем с углом призмы $\beta \approx 50^\circ$, а трещины, поры, шлаковые включения и непровары по кромке — искателем с углом $\beta \approx 40^\circ$.

Поскольку наиболее вероятным дефектом является непровар в корне шва, контроль целесообразно начинать с прозвучивания соединения искателем с углом призмы $\beta \approx 50^\circ$. При этом искатель следует перемещать на расстоянии от полки, равном $L_{\text{ср}} \pm 5$ мм; величина $L_{\text{ср}}$ может быть определена по соотношениям (234, 235), по глубиномеру дефектоскопа или по координатной линейке.

Участки швов, в которых не обнаружен непровар в корне шва, прозвучивают искателем с углом призмы $\beta \approx 40^\circ$, перемещаемым в пределах, определяемых расстояниями L_{min} и L_{max} от полки соединения (см. рис. 182).

Изложенная методика с 1957 г. введена в «Правила контроля сварных соединений при изготовлении пролетных строений железнодорожных мостов» [116] и успешно применяется на мостовых заводах для контроля угловых швов тавровых и крестовых соединений I категории. На контроль 1 м шва затрачивается 5—20 мин. При

этом, как показывает опыт, обеспечивается достаточно точное выявление внутренних трещин и непроваров, в том числе и таких, которые не могут быть обнаружены рентгенографированием (рис. 184).

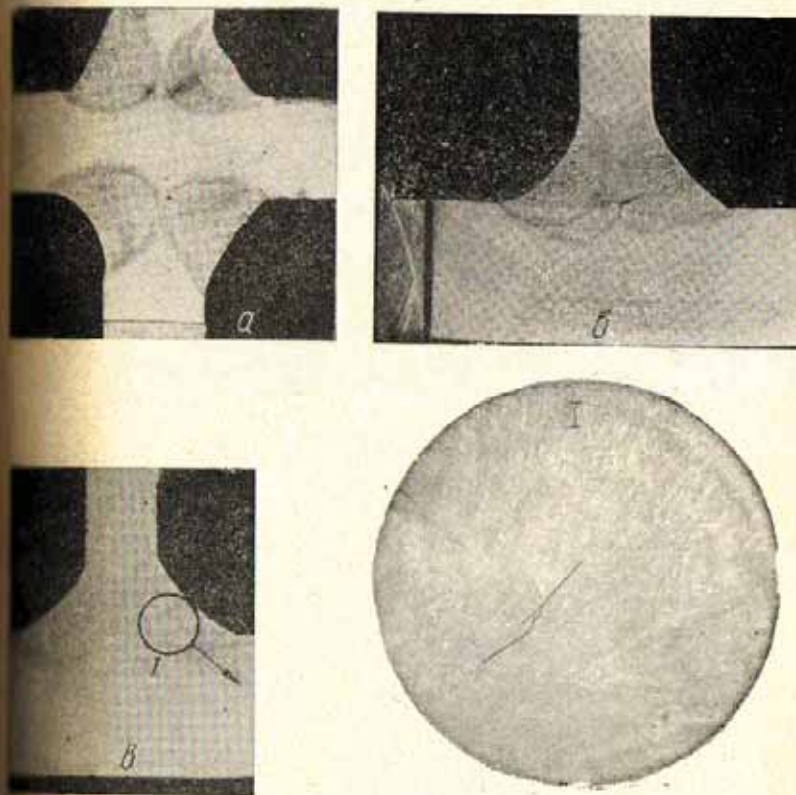


Рис. 184. Макрошлифы угловых швов тавровых и крестовых соединений, на которых видны дефекты, выявленные ультразвуковой дефектоскопией и не обнаруженные рентгенографированием:

а — крестовое соединение с непроваром, переходящим в трещину; б — тавровое соединение с непроваром; в — тавровое соединение с трещиной.

Надежность обнаружения дефектов в виде одиночных пор и шлаковых включений при ультразвуковом контроле соединений металла малой толщины может оказаться несколько ниже, чем при рентгенографировании. Однако в связи с большой сложностью рентгенографирования тавровых соединений и невозможностью просвечивания

крестовых соединений качество угловых швов большинства рассматриваемых соединений оценивается только по данным ультразвуковой дефектоскопии.

Аналогичную методику ультразвукового контроля угловых швов применяют при проверке качества тавровых соединений в электровозах, тепловозах, электровагонах и др. металлоконструкциях [99, 158, 191].

Если по конструктивным соображениям не может быть применена изложенная выше методика, швы тавровых соединений прозвучивают с наружной поверхности полки (см. рис. 181, а (2), б (1), в (1), г (1)).

В ряде случаев встречаются тавровые соединения, в которых толщина привариваемого листа составляет 50—100 мм. В подобных случаях прозвучивать швы следует прямым лучом с двух сторон. Методика прозвучивания аналогична методике, применяемой при контроле стыковых соединений.

2. КОНТРОЛЬ УГЛОВЫХ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ НЕПРОВАРОМ

Угловые швы крестовых соединений, в которых не предусмотрен полный технологический провар, могут быть проконтролированы, если толщина стенки превышает 20 мм. Их прозвучивают прямым лучом, излучаемым искателем, расположенным на поверхности стенки. При этом недопустимые дефекты в шве или непроваренный угол стенки вызывают эхо-сигнал большой амплитуды. При контроле качественного шва отраженный от технологического непровара сигнал будет значительно слабее, так как торец стенки в месте предусмотренного непровара имеет достаточно плоскую и гладкую поверхность. Очевидно, что аналогично можно проконтролировать угловые швы тавровых соединений с толщиной стенки более 20 мм. При меньшей толщине швы не могут быть прозвучены прямым лучом. Попытки контролировать их однократно отраженным лучом не дали положительных результатов, так как возникающие при этом эхо-сигналы от технологического непровара не удавалось отличать от эхо-сигналов, обусловленных недопустимыми дефектами. Поэтому угловые швы тавровых соединений с технологическим непроваром и толщиной стенки менее 20 мм следует про-

звучивать лучом, вводимым через наружную плоскость полки (см. схему 1 и 2 на рис. 181, а).

При изготовлении некоторых конструкций требуется, чтобы технологический непровар в тавровых соединениях не превышал определенной допустимой величины. В 1958 г. Тилиандер [201] предложил способ измерения ширины непровара с помощью прямого искателя. Результаты измерений в значительной степени определяются чистотой поверхности, на которой устанавливают искатель, и точностью его расположения. Сам процесс измерения весьма трудоемок.

Более простая методика определения ширины непровара разработана в 1962 г. в НИИ мостов ЛИИЖТ. При использовании ее можно выявлять непровар, ширина которого превосходит допустимую. При контроле применяют специальные тест-образцы. В 1967 г. этим институтом предложен безэталоный метод измерения ширины непровара

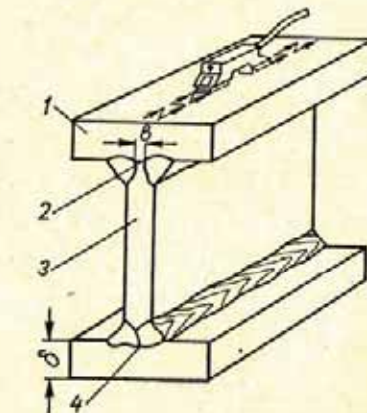


Рис. 185. Тавровое соединение: 1 — полка; 2 — непровар в корне шва; 3 — стенка; 4 — полный провар.

Таким образом, при ультразвуковом контроле ширина b непровара в корне шва таврового соединения (рис. 185) может быть определена двумя методами: сравнением амплитуд эхо-сигналов от непровара и моделей непровара, выполненных в тест-образце; сравнением амплитуд эхо-сигналов от непровара в бесконечной плоскости (безэталоный метод).

При обоих методах используют наклонные искатели, включенные по раздельной схеме; для удобства контроля они могут быть выполнены в общем корпусе (рис. 185) [22].

Угол ввода луча α и расстояние L между центрами излучения искателя выбирают из условия пересечения их диаграмм направленности искателей на глубине, равной толщине полки δ (рис. 186):

$$L = 2\delta \operatorname{tg} \alpha. \quad (236)$$

Очевидно, что при перемещении искателя по поверхности полки над стенкой в случае полного провара ультразвуковой луч без отражений будет переходить из полки в стенку (рис. 186, а). Если же в соединении окажется

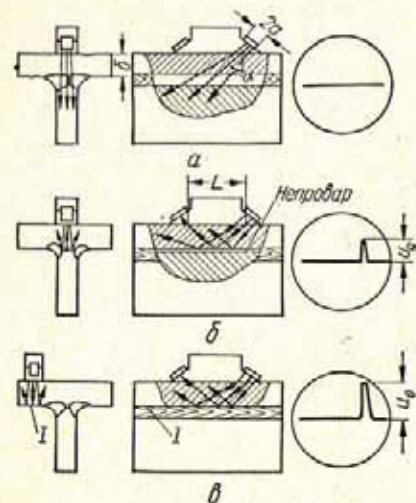


Рис. 186. Схема прозвучивания таврового соединения:

а — с полным проваром; б — с непроваром в корне шва; в — при определении амплитуды эхо-сигнала от бесконечной плоскости.

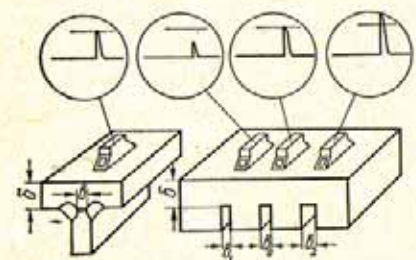


Рис. 187. Измерение ширины непровара с использованием тест-образца.

устанавливают чувствительность дефектоскопа такой, чтобы в тест-образце выявлялись прорезы шириной $b \geq 1$ мм и более. Затем, не меняя чувствительности дефектоскопа, перемещают искатель по поверхности полки над стенкой,

то часть ультразвуковых колебаний отразится от него к приемному искателю (рис. 186, б). При этом амплитуда отраженного сигнала будет пропорциональна ширине непровара.

При измерении ширины непровара первым методом применяют тест-образец (рис. 187), изготовленный из того же металла, что и полка. Прорезы в тест-образце имитируют собой непровары различной ширины. Расстояние от верхней плоскости тест-образца до торцов прорезей строго равно толщине полки. С достаточной точностью можно считать, что ширина обнаруженного непровара при длине его более диаметра ультразвукового пучка равна ширине той прорези в тест-образце, эхо-сигнал от которой по величине равен эхо-сигналу от выявленного непровара.

Для контроля соединений на отсутствие в них непроваров, превосходящих по ширине допустимую величину b , вначале

Очевидно, что при такой чувствительности дефектоскоп будет выявлять непровары, ширина которых превосходит допустимую величину на 1 мм и более. Погрешность этого метода зависит от соответствия качества поверхности контролируемого соединения качеству поверхности тест-образца.

Влияние качества поверхности соединения на результаты измерения и необходимость использования тест-образца исключаются при использовании второго метода, названного безэталонным.

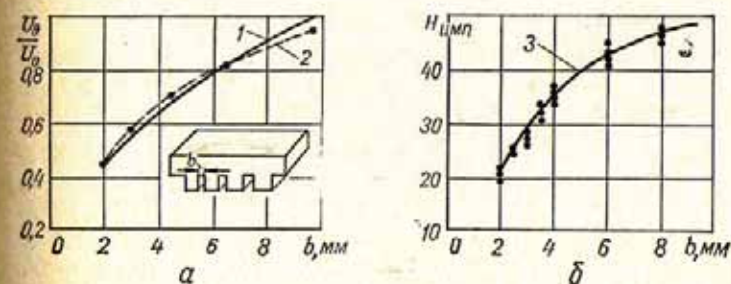


Рис. 188. Зависимости, характеризующие амплитуды эхо-сигнала от непроваров различной ширины:

1 — расчет; 2, 3 — эксперимент.

Безэталонный метод основан на сравнении амплитуды U_a эхо-сигнала от непровара с амплитудой U_0 от бесконечной плоскости, расположенной на той же глубине, что и непровар. В качестве такой плоскости следует использовать поверхность 1 полки соединения (см. рис. 186, а). Если длина непровара существенно превышает его ширину, то соотношение амплитуд эхо-сигналов от непровара и от бесконечной плоскости при расположении их в дальней зоне вначале пропорционально величине b , а затем — $\sqrt{b}$.

На рис. 188, а приведены теоретическая и экспериментальная зависимость $U_a/U_0 = F(b)$. Экспериментальная зависимость построена по точкам, снятым на тест-образце при $\delta = 20$ мм, $\alpha = 65^\circ$, $a = 6$ мм и частоте $f = 2,5$ МГц.

Аналогично могут быть построены зависимости и для других толщин полки δ .

Безэталонный метод может быть реализован с помощью дефектоскопа, имеющего аттенуатор или какое-

либо устройство для измерения амплитуд эхо-сигналов, например, дефектоскопа ДУК-66 или УДМ.

Контролю должны предшествовать расчет зависимости $U_{\delta}/U_0 = f(b)$ или экспериментальное ее построение с помощью дефектоскопа по тест-образцу, размер δ которого соответствует толщине полки контролируемого соединения. На рис. 188, б в качестве примера показана такая зависимость условной величины $N_{\text{имп}} = f(b)$ амплитуды эхо-сигнала, измеренной посредством ручки глубиномера дефектоскопа УДМ-1М, для соединения с толщиной полки $\delta = 25$ мм и искателя с параметрами $\beta = 40^\circ$, $f = 1,8$ МГц, $a = 5$ мм.

Контроль соединений прибором типа УДМ сводится к следующему. В начале искатель располагают на полке вне зоны сварных швов (см. рис. 186, в) и, установив ручку глубиномера в положение $N_{\text{имп}} = 50$, ручкой «Чувствительность» добиваются заданной высоты донного импульса, например, 30 мм. Затем чувствительность устанавливают ручкой $N_{\text{имп}}$ по построенному графику $N_{\text{имп}} = f(b)$ в зависимости от ширины допустимого непровара. Непровар ищут путем перемещения искателя по полке вдоль соединения (см. рис. 185).

Для измерения ширины выявленного непровара ручкой глубиномера добиваются амплитуды эхо-сигнала от непровара, равной 30 мм. По значению $N_{\text{имп}}$ по графику $N_{\text{имп}} = f(b)$ определяют ширину выявленного непровара.

Опыт применения данного метода при контроле нескольких тысяч тавровых соединений показал, что погрешность измерения зависит от равномерности ширины непровара в озвучиваемой области и практически составляет 0,5—1 мм.

Рассмотренные методы не могут быть применены для измерения высоты технологического непровара в односторонних угловых швах тавровых соединений с V-образной разделкой. В подобных случаях высота непровара может быть оценена с помощью наклонного искателя путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от выявленного непровара с амплитудой эхо-сигнала от непровара известной величины в образце соединения. Безэталонный метод с помощью раздельно-совмещенного искателя применяется для выявления дефектов в сварных соединениях закладных деталей [1].

3. КОНТРОЛЬ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ ВНАХЛЕСТКУ

Швы соединений внахлестку целесообразно прозвучивать со стороны основного листа однократно отраженным лучом с помощью искателя, включенного по совмещенной схеме (рис. 189) [32, 99, 173, 192, 199].

Угол ввода луча определяется соотношением горизонтального K_1 и вертикального K_2 катетов и может быть рассчитан по выражению (230). Заметим, что $K_2 = \delta_2$.

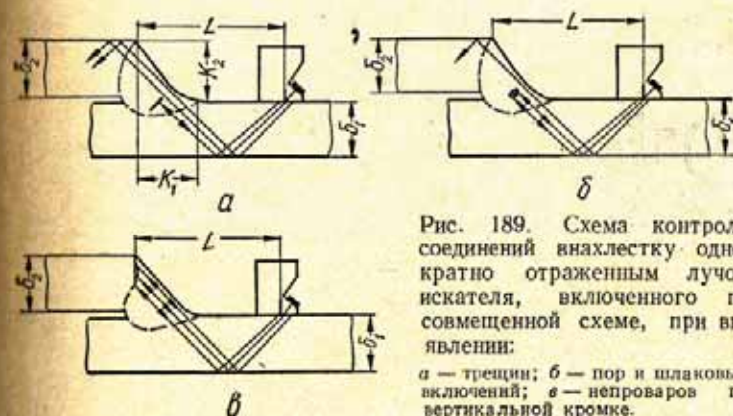


Рис. 189. Схема контроля соединений внахлестку однократно отраженным лучом искателя, включенного по совмещенной схеме, при выявлении:

а — трещин; б — пор и шлаковых включений; в — непроваров по вертикальной кромке.

В процессе контроля искатель перемещают по плоскости основного листа толщиной δ_1 в пределах:

$$L_{\min} = 2\delta_1 \operatorname{tg} \alpha; \quad (237)$$

$$L_{\max} = L_{\min} + K_1, \quad (238)$$

отсчитываемых от торца привариваемого листа.

При этом обеспечивается выявление трещин, непроваров вертикальной кромки и корня шва, а также одиночных включений и их скоплений. В то же время обнаружение непроваров горизонтальной кромки (рис. 190) не гарантируется. Объясняется это тем, что ультразвуковой луч, попадая на горизонтальный плоский дефект, отражается под тем же углом и не возвращается на искатель.

Горизонтальные непровары могут быть выявлены зеркально-теневым методом при включении искателей

по раздельной схеме (рис. 190). Ультразвуковой импульс, проходя от передающего искателя через бездефектный шов, принимается приемным искателем. При этом на экране появляется импульс на расстоянии от зондирующего, соответствующем глубине залегания отражателя (рис. 190, а)

$$H = 2\delta_1 + 3\delta_2. \quad (239)$$

При обнаружении в шве горизонтального непровара или другого крупного дефекта, расположенного в наплавленном металле шва, амплитуда импульса на экране падает (рис. 190, б).

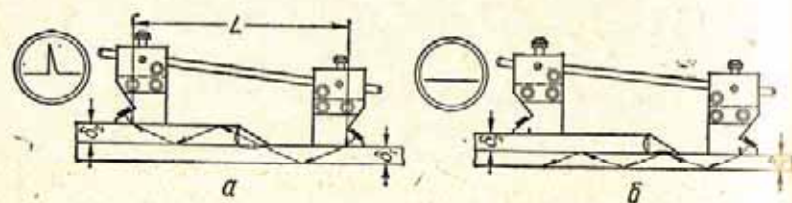


Рис. 190. Схема контроля соединений внахлестку зеркально-теневым методом искателями, включенными по раздельной схеме.

В связи с тем, что при контроле необходимо строго соблюдать расстояние между точками ввода искателей

$$L = (2\delta_1 + 3\delta_2) \operatorname{tg} \alpha,$$

разработан специальный держатель, позволяющий строго фиксировать это расстояние (рис. 190). При этом каждый искатель закреплен в держателе так, что может смещаться и поворачиваться в вертикальной плоскости. Это необходимо в связи с тем, что поверхности, по которым перемещаются искатели, находятся на разных уровнях.

Чтобы обеспечить прозвучивание всего сечения наплавленного металла шва, необходимо перемещать искатели примерно на длину, соответствующую величине горизонтального катета K_1 . При отсутствии дефектов импульс на экране трубки должен оставаться примерно постоянным по амплитуде и исчезать на концах зоны перемещения.

При наличии дефекта ширина участка перемещения, на котором наблюдается импульс от передающего искателя, существенно сокращается.

Для настройки дефектоскопа на заданную условную чувствительность целесообразно использовать имитатор дефектов при зеркально-теневом методе (см. рис. 139).

Исследования показали, что надежность выявления дефектов в швах соединений внахлестку методом ультразвуковой дефектоскопии значительно выше, чем при методах просвечивания.

Глава X

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ШВОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Контактная сварка широко применяется в различных отраслях промышленности: при восстановлении рельсовых плетей железнодорожного транспорта, изготовлении быстрорежущего инструмента, точечной сварке стальных и алюминиевых листов, соединении трубопроводов и т. д.

Контроль качества контактной сварки в большинстве случаев ограничивается внешним осмотром и выборочными механическими испытаниями. Широко распространенные методы контроля рентгенографированием и магнитной дефектоскопией не обеспечивают надежного выявления внутренних пороков [96].

В результате исследований в последние годы установлено, что ультразвуковую дефектоскопию можно применять для контроля качества контактной сварки [96, 128, 137].

Ультразвуковая дефектоскопия, как и обычно, сводится к прозвучиванию шва импульсами ультразвуковых колебаний и исследованию процесса их распространения эхо- или теневым методом.

Толщина шва контактной сварки составляет небольшую величину по сравнению с остальными его размерами. При этом дефекты сварки имеют наибольшую площадь, как правило, в плоскости сварного стыка. Поэтому прозвучивать шов следует в направлении, перпендикулярном к плоскости стыка или же близком к этому. Применение прямого искателя практически возможно, если стык отстоит от плоскости, на которой устанавливается

искатель, на расстоянии не более 200—300 мм и не менее, чем величина мертвой зоны дефектоскопа. В остальных случаях контактный шов прозвучивают с помощью наклонного искателя путем ввода колебаний в шов через основной металл.

При выборе методики прозвучивания следует стремиться обеспечить наиболее надежное выявление дефектов в стыках при возможно меньшем количестве необходимых операций.

Оптимальные параметры (частота ультразвуковых колебаний, условная чувствительность и угол призмы искателя) определяют экспериментально для каждого конкретного соединения. В процессе отработки методики контроля данные ультразвуковой дефектоскопии сопоставляют с результатами осмотра излома или металлографического исследования стыков.

Опыт применения ультразвуковой дефектоскопии швов контактной сварки показал, что при контроле выявляются большинство недопустимых дефектов. Однако встречаемые иногда в контактных стыках дефекты в виде слипания металла могут быть не обнаружены дефектоскопом, так как они практически не отражают ультразвуковых колебаний частотой 2,5—3 МГц.

Дефекты типа слипания возникают в стыках при очень грубом нарушении режима сварки. Обычно при таких нарушениях в стыках возникают и другие дефекты достаточно больших размеров, уверенно выявляемые ультразвуком. Поэтому метод ультразвуковой дефектоскопии может быть рекомендован для контроля качества швов контактной сварки, в которых слипание не является основным дефектом или наряду с этим дефектом возникают другие, недопустимые по техническим условиям и уверенно выявляемые ультразвуком.

Методика контроля стыков контактной сварки обуславливается типоразмерами соединения и видом сварки.

1. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ

В СССР и за рубежом при восстановлении вышедших из строя рельсов и при изготовлении плетей длиной до 800 м для бесстыкового пути широко используют контактную сварку.

В связи со все возрастающими нагрузками и скоростью

движения поездов необходимо обеспечивать высокое качество сварных стыков рельсов.

При нарушении режима сварки, плохой обработке торцов и отклонении химического состава металла, как правило, в соединении возникают внутренние дефекты: трещины, рыхлости (окисленные и неокисленные), непровары, пузыри, свищи, кратерные усадки и силикатные скопления [96].

Согласно техническим условиям [136], все перечисленные дефекты за исключением серых силикатных включений площадью менее 15 мм² в сварных стыках рельсов не допускаются.

Существовавшая до 1960 г. в СССР и все еще применяющаяся за рубежом методика оценки качества сварки рельсов по виду излома контрольных образцов не только не гарантирует отсутствие дефектов во всех сваренных за смену стыках, но и не обеспечивает даже обнаружения крупных дефектов в стыках контрольных образцов. Объясняется это тем, что включения, расположенные в зоне сжатия, не оказывают влияния на статическую прочность стыка, благодаря чему излом весьма часто происходит не по дефекту. Анализ результатов излома на гидравлическом прессе 654 сварных стыков рельсов типа Р-65 с дефектами показал, что 51% стыков с дефектами в подошве разрушается при нагрузке и стреле прогиба, равных или значительно превышающих требования технических условий.

В то же время испытания сварных стыков рельсов под пульсирующей нагрузкой и анализ излома сварных стыков рельсов в пути подтверждают, что дефекты сварки существенно снижают усталостную прочность стыков. Так, например, стык, не имеющий дефектов, выдерживал без разрушения более 10 млн. циклов, а стыки с дефектами в подошве разрушались после 500—100 000 циклов.

Исследованиями, выполненными в 1957 г. в НИИ мостов ЛИИЖТ, установлено, что единственно возможным методом, позволяющим выявлять внутренние дефекты в соединениях электроконтактной сварки рельсов, является метод ультразвуковой дефектоскопии [98].

На основе сопоставления данных ультразвуковой дефектоскопии при различных основных параметрах контроля с данными осмотра излома и металлографического исследования стыков установлена целесообразность прозвучивания каждого сварного стыка искателями с углом

призмы 40 и 50° при частоте ультразвука примерно 2,5 Мгц. Независимо от типа рельса оптимальная условная чувствительность для искателя с углом призмы 40° должна составлять 40 мм по эталону № 1, а для искателя с углом призмы 50° — 35 мм.

Искатель с углом призмы 50° применяют при прозвучивании подошвы сверху и снизу, шейки сбоку и головки с поверхности катания (рис. 191, а, б, в, г), а искатель с углом призмы 40° — для прозвучивания головки сверху и сбоку, головки, шейки и участка подошвы под шейкой — с поверхности катания (рис. 191, д, е).

При этом сварной стык в подошве и шейке рельса прозвучивается многократно отраженным лучом, благодаря чему обеспечивается выявление дефектов, расположенных у поверхности, по которой перемещают искатель. Опыт показал, что дефекты весьма часто образуются по краям перьев подошвы. Для более надежного выявления таких дефектов края подошвы необходимо дополнительно прозвучивать сверху искателем при перемещении его под углами от 0 до 30° от края подошвы.

На основании длительного применения этой методики на различных рельсосварочных предприятиях разработана «Инструкция по ультразвуковой дефектоскопии сварных стыков рельсов» [79], утвержденная МПС СССР.

В соответствии с инструкцией ведется обязательный 100%-ный контроль качества сварных стыков рельсов на всех рельсосварочных предприятиях МПС. При обнаружении любого дефекта в какой-либо зоне сварной стык бракуют и вырезают из плети.

Ультразвуковую дефектоскопию на рельсосварочном предприятии разрешается осуществлять только на специально оборудованном рабочем месте — контрольном посту, расположенном в технологическом потоке за операцией окончательной зачистки стыка при температуре металла рельса в зоне контроля не выше +60°.

Контроль ведется с помощью дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 (УЗД-59, ДУК-11ИМ, ДУК-13ИМ). Время контроля одного стыка составляет 5—7 мин.

Для оценки надежности ультразвуковой дефектоскопии НИИ мостов ЛИИЖТ накапливает данные контроля, регулярно получаемые с рельсосварочных предприятий. В справках приводятся сведения о количестве проконтролированных и забракованных ультразвуковой дефектоско-

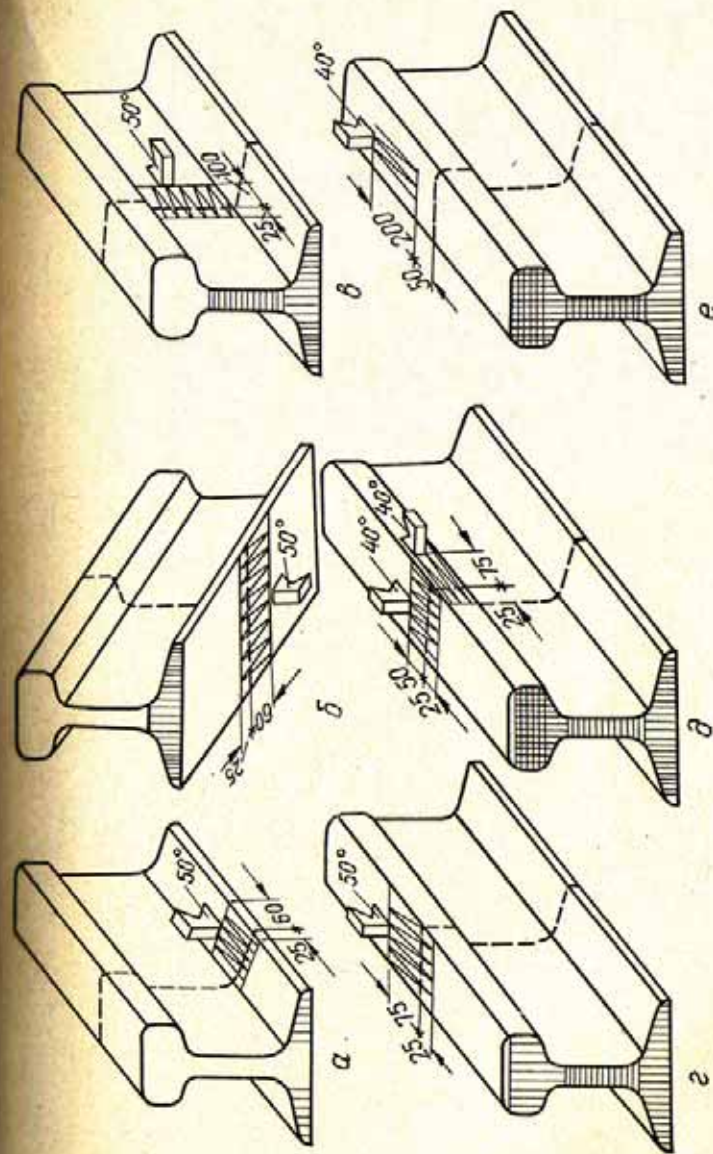


Рис. 191. Схема прозвучивания сварного стыка рельса.

Таблица 23

Дефекты, выявленные в результате ультразвукового контроля и осмотра излома сварных рельсов на рельсосварочных предприятиях

Ультразвуковая дефектоскопия	Осмотр излома	Ультразвуковая дефектоскопия	Осмотр излома

Примечание. 1 — силикатное включение; 2 — пережог; 3 — шлаковое включение; 4 — пузырь.

пией стыков. На каждый забракованный стык заполняется карта дефектного стыка. В карте приводятся результаты ультразвукового контроля с указанием условной протяженности и расположения дефектного участка, направления прозвучивания и основных параметров контроля, при которых обнаружен этот дефект. Кроме того, в этой же карте фиксируются данные осмотра излома стыка (размеры, характер и расположение видимых в изломе дефектов), нагрузка и стрела прогиба, при которых произошел излом стыка на гидравлическом прессе.

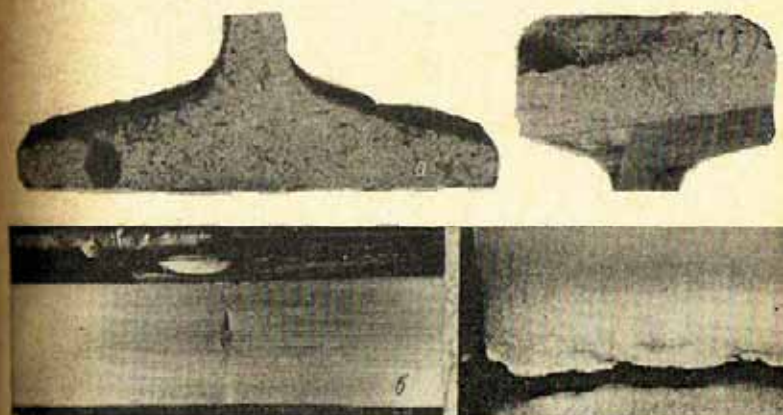


Рис. 192. Изломы (а) и микрошлифы (б) сварных стыков рельсов, в которых при ультразвуковом контроле были обнаружены дефекты.

В результате обработки данных контроля более 4,5 млн. стыков рельсов на рельсосварочных предприятиях, выполненной с помощью закодированных перфорированных карт [97], установлено, что в большинстве случаев (~ 70%) дефекты возникают в подошве рельса, т. е. в зоне, наиболее опасной с точки зрения эксплуатации и наиболее трудоемкой с точки зрения ультразвукового контроля. Значительно реже дефекты образуются в головке (~ 10%) и в шейке (~ 20%) рельса [96, 98]. Наиболее характерными дефектами контактной сварки рельсов являются рыхлости (~ 44%) и непровары (~ 28%).

В табл. 23 и на рис. 192 показаны некоторые дефекты, выявленные в сварных стыках при ультразвуковом контроле рельсов на рельсосварочных предприятиях.

Широкое применение ультразвуковой дефектоскопии для контроля качества сварных стыков предотвращает укладку в путь дефектных рельсов, способствует повышению

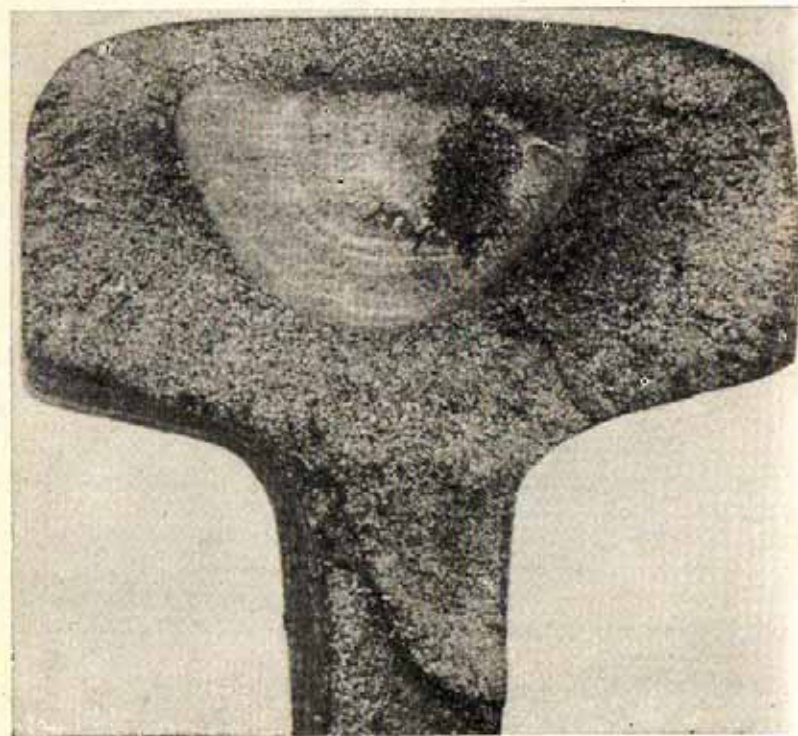


Рис. 193. Усталостная трещина в стыке рельса из-за дефекта сварки, обнаруженная дефектоскопом ДУК-13ИМ.

срока их службы и безопасности движения. Кроме того, данные ультразвуковой дефектоскопии могут быть использованы для оценки стабильности технологического процесса сварки [96].

Дефекты, расположенные в головке рельса, могут явиться причиной развития трещины усталостного происхождения. Подобные трещины развиваются внутри головки, приобретая ее очертания, без выхода на поверхность (рис. 193). Своевременное обнаружение дефектов усталостного происхождения весьма актуально для обеспечения безопасности движения.

В связи с этим в СССР введен систематический ультразвуковой контроль сварных стыков рельсов в условиях эксплуатации. Контроль осуществляется по изложенной выше методике, исключая прозвучивание подошвы снизу, с помощью приборов ДУК-13ИМ и УЗД-НИИМ-6М [14, 86, 96].

2. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СТЫКОВ ИНСТРУМЕНТА И ШТОКОВ

При изготовлении режущего инструмента для соединения хвостовика из углеродистой стали с рабочей частью из быстрорежущей стали широко используют электроконтактную сварку и сварку трением. Сварку трением в последнее время применяют также при изготовлении и восстановлении ответственных деталей различных машин.

В процессе эксплуатации сварные стыки находятся под воздействием знакопеременной нагрузки значительной величины. Поэтому к качеству стыков предъявляют весьма жесткие требования. Для выявления внутренних дефектов сварки может быть использован эхоимпульсный метод ультразвуковой дефектоскопии. Про звучивание осуществляют с помощью прямого искателя (рис. 194). О наличии дефекта 4 судят по появлению эхо-сигнала от несплошности в зоне стыка 3. Для контроля многих стыков может быть применен почти любой импульсный ультразвуковой дефектоскоп с частотой заполнения ультразвукового импульса 1,8—3 Мгц. Процесс контроля может быть автоматизирован [128, 137, 165].

Опыт применения ультразвуковой дефектоскопии показал, что этим методом обеспечивается надежное выявление наиболее опасных дефектов контактной сварки и сварки трением, снижающих прочность инструмента. На рис. 195 в качестве примера приведены фотографии изломов инструмента и штоков по месту сварки в стыках, в которых при ультразвуковом контроле были обнаружены дефекты.

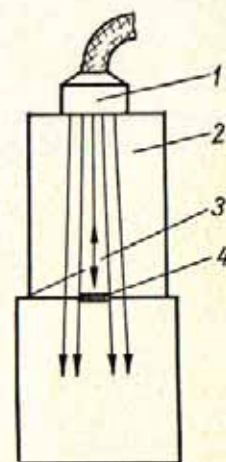


Рис. 194. Схема про звучивания сварного стыка инструмента:

1 — искатель; 2 — хвостовик; 3 — стык; 4 — дефект.

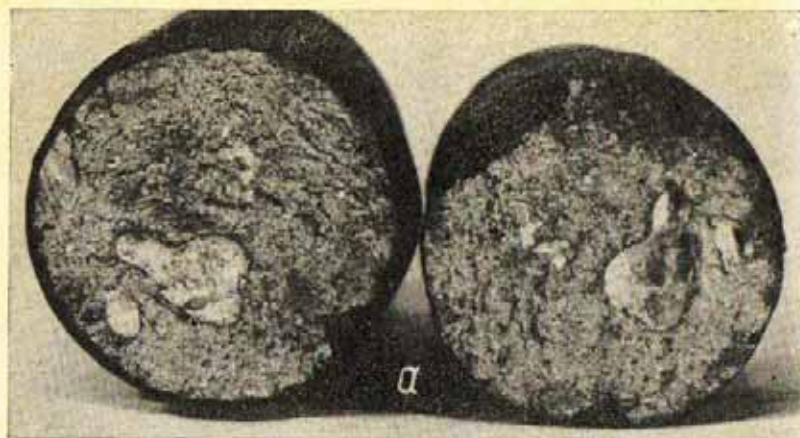


Рис. 195. Изломы сварных стыков инструмента, выполненных контактной сваркой (а), и стыков штоков, выполненных сваркой трением (б), в которых при ультразвуковом контроле были обнаружены дефекты.

3. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ТОЧЕК

Методом ультразвуковой дефектоскопии в сварных точках могут быть выявлены непровары, трещины и поры, а также определен диаметр ядра точки.

Для контроля применяют специальный искатель с двумя пьезоэлектрическими пластинами, размещенными в одной призме (рис. 196). Колебания, излучаемые одной пластиной, распространяются в верхнем листе и при попа-

дании на качественно сваренную точку проникают в нижний лист. Интенсивность колебаний, достигающих другой пластины, в этом случае весьма мала. При наличии дефекта интенсивность принимаемого сигнала увеличивается, что регистрируется индикатором дефектоскопа.

Диаметр сварной точки определяют по длине зоны, в которой при перемещении искателя над точкой на экране дефектоскопа отсутствует импульс. При этом чувствительность дефектоскопа регулируют по величине эхосигнала на экране при расположении искателя на участке, не имеющем сварных точек. При оптимальной чувствительности и большом навыке оператора удастся получить точность измерения диаметра порядка 2 мм [114].

Недостаток этой методики применительно к контролю сварной точки состоит в том, что весьма опасный дефект типа слипания пропускает ультразвуковые лучи так же хорошо, как и качественное сварное соединение. Таким образом этот дефект практически не выявляется ультразвуком при контроле готового сварного соединения. Для выявления указанного дефекта разработано несколько методов контроля сварных точек в процессе их выполнения.

В работе [187] предлагается метод контроля сварных точек теньвым методом с помощью продольных волн, излучаемых и принимаемых искателями, вмонтированными в электроды. В момент сжатия свариваемых листов электродами сварочной машины наблюдается прохождение ультразвука. Во время образования расплавленного ядра прохождение ультразвука ухудшается. После окончания процесса кристаллизации ядра при хорошей сварке точки амплитуда прошедшего сигнала возрастает. Дефекты внутри сварной точки вызывают значительное ослабление этого сигнала, а слипание вызывает повышение амплитуды до 90% от начального сигнала. Огромное давление на электроды и наличие равномерного потока охлаждающей жидкости создают весьма благоприятные условия для реализации изложенного способа контроля. На этом принципе разработаны и выпускаются приборы для автоматического

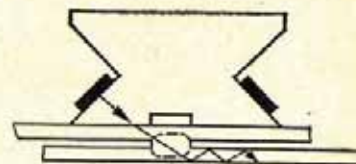


Рис. 196. Схема прозвучивания сварной точки.

контроля точек в процессе сварки [170]. Однако необходимость регистрации незначительных изменений амплитуды проходящей продольной волны для оценки качества точек может привести к ошибкам при дефектоскопии. Этим недостатком не обладает способ контроля, основанный на отражении пластиночных волн от расплавленного ядра сварной точки [134]. Для получения эхо-сигнала от расплавленного ядра ультразвуковые волны возбуждаются с помощью наклонного искателя в листе металла. Показателем качественного выполнения сварки служит интервал времени от момента появления эхо-сигнала, сообщаемого о начале формирования ядра, до момента выключения сварочного тока. С помощью изложенного метода контролируют сварку листов нержавеющей стали толщиной 1 мм и выше, а также листов из титановых сплавов толщиной 2 мм и выше. Метод позволяет фиксировать уменьшение диаметра литого ядра на 15% от нормального значения, но не гарантирует выявления внутренних дефектов.

Необходимо отметить, что во многих случаях применение других методов контроля сварных точек взамен ультразвукового может оказаться более эффективным.

4. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ЗАКЛЕПОК

Ультразвуковой контроль сварных заклепок аналогичен контролю сварных точек. В большинстве случаев в сварных заклепках не допускаются трещины, непровары, поры и шлаковые включения. Кроме того, диаметр ядра сварных заклепок должен быть не менее определенной величины D_0 .

Сварные заклепки следует контролировать в два этапа. На первом этапе выявляют внутренние недопустимые дефекты, а на втором — определяют соответствие истинной величины диаметра ядра заданной величине D_0 .

Для выявления дефектов каждую заклепку прозвучивают со всех сторон с помощью искателя, выполняющего функции излучения и приема ультразвуковых колебаний (рис. 197). Появление эхо-сигнала из зоны проплавленного металла свидетельствует о наличии дефектов в заклепке.

Ко второму этапу контроля приступают после того, как установлено, что внутренние дефекты в заклепках отсутствуют. Величину диаметра заклепки можно измерить с помощью двух искателей, укрепленных на общем штативе. При этом один из искателей предназначен для излучения, а другой — для приема ультразвуковых колебаний. Диаметр ядра, как и при контроле сварных точек, определяют по длине зоны, в которой при перемещении искателей над заклепкой индикатор дефектоскопа не регистрирует прохождение ультразвуковых колебаний от передающего искателя к приемному. Опыт показал, что при величине ядра 10—14 мм точность измерения составляет 1—5 мм. Однако сам процесс измерения весьма трудоемок и не может быть рекомендован для массового контроля качества соединений на сварных заклепках. Производительность контроля можно несколько повысить, если

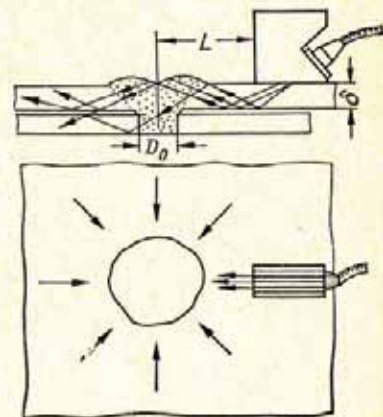


Рис. 197. Схема прозвучивания сварной заклепки.

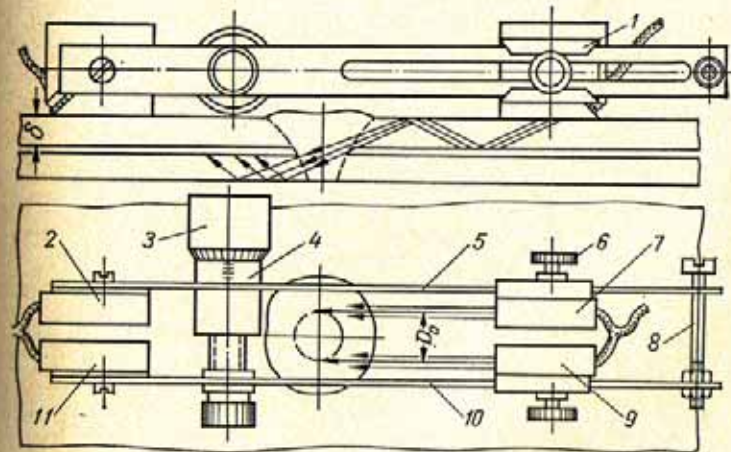


Рис. 198. Определение диаметра ядра заклепки ультразвуковым калибром.

для измерения диаметра ядра применить предложенный автором ультразвуковой калибр.

Ультразвуковой калибр (рис. 198) состоит из двух передающих 7, 9 и двух приемных 2, 11 искателей, стальных линейек 5, 10, ползьев 1, направляющей 8, микрометрического винта 3 с гайкой 4 и стопорных винтов 6. Пьезоэлектрические пластины передающих искателей, как и приемных, включены параллельно. Приемные искатели 2 и 11 прикреплены винтами соответственно к линейкам

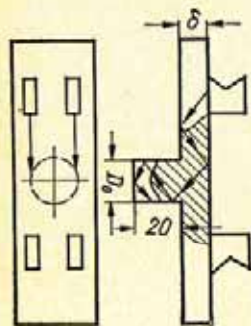


Рис. 199. Регулировка ультразвукового калибра по тест-образцу.

5 и 10. Передающие искатели 7 и 9, жестко связанные с ползьями 1, можно устанавливать на необходимом расстоянии от приемных искателей и укреплять их в таком положении с помощью стопорных винтов 6. Расстояние D между передающими и между приемными искателями регулируется микрометрическим винтом 3. При вращении винт 3 ввинчивается или вывинчивается из гайки 4, укрепленной на линейке 5, смещая линейку 10 с искателями 9 и 11 по направляющей 8. С помощью винта устанавливают максимально возможное расстояние D между искателями, при котором еще оба ультразвуковых луча

переходят в нижний лист через проплавленный металл заклепки диаметром D_0 , не достигая приемных искателей. Затем, не меняя чувствительности дефектоскопа и не перестраивая калибр, перемещают его над заклепками.

Если диаметр ядра контролируемой заклепки равен или больше требуемого диаметра D_0 , т. е. заклепка сварена качественно, то при одном из положений калибра на приемные искатели не попадут ультразвуковые колебания от передающих искателей. Если же диаметр ядра меньше минимально допустимого, т. е. заклепка не удовлетворяет техническим требованиям, то при любом положении калибра индикаторы дефектоскопа будут регистрировать прохождение ультразвуковых колебаний от передающих искателей к приемным. Таким образом, при использовании калибра критерием удовлетворительного качества заклепки является исчезновение сигнала на индикаторе дефектоскопа при перемещении калибра над заклепкой.

Для большей точности в оценке качества заклепок целесообразно перед измерением ядра зачищать заподлицо головки заклепок, а калибр и чувствительность дефектоскопа настраивать на специальных тест-образцах (рис. 199), имитирующих собой соединения на сварных заклепках.

Глава XI

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аппаратура, широко применяемая в настоящее время для ультразвуковой дефектоскопии, позволяет производить контроль при перемещении искателей вручную и без регистрации объективного документа. Результаты такого контроля во многом зависят от квалификации, опытности и сосредоточенности оператора. Субъективность метода ультразвуковой дефектоскопии особо отрицательно сказывается на достоверности результатов при массовом контроле однотипных и высококачественных соединений. Объясняется это тем, что при контроле таких соединений у оператора со временем притупляется внимание и вырабатывается своего рода условный рефлекс о бесполезности контроля, что приводит к пропуску редких, но все же возникающих при сварке крупных и опасных дефектов.

Полная объективность ультразвуковой дефектоскопии может быть достигнута только путем автоматизации процесса контроля. При этом под автоматическим контролем следует понимать процесс, обеспечивающий не только получение информации о наличии (отсутствии) внутренних дефектов, но также и регистрацию этой информации в виде документа с одновременной выдачей заключения о качестве соединения в соответствии с заданными техническими условиями.

Создание автоматов является весьма сложной задачей, решение которой требует предварительного выполне-

ния комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Этим можно объяснить тот факт, что в отечественной и зарубежной промышленности до настоящего времени не нашли применения установки для ультразвукового контроля сварных соединений, полностью удовлетворяющие изложенному требованию.

Автоматический ультразвуковой контроль может быть основан на объемном или построчном прозвучивании проверяемых объектов. При объемном прозвучивании с целью выявления внутренних неоднородностей применим только метод ультразвуковой «тени». Для индикации выявленных этим методом неоднородностей ультразвуковой рельеф, возникающий на выходе колебаний из контролируемой среды, преобразуют в видимое изображение с помощью звукооптических преобразователей [131, 160]. При объемном прозвучивании контролируемый объект погружают в ванну с жидкостью и располагают его между излучающим ультразвук элементом и звукооптическим преобразователем.

При построчном прозвучивании для оценки внутреннего состояния объектов применимы как теневой, так и эхо-импульсный методы. В этом случае ультразвуковые колебания могут быть введены в объект через тонкую пленку жидкости при непосредственном контакте искателей с объектом (контактный способ), через слой жидкости, окружающей контролируемый объект (иммерсионный способ) или через слой жидкости, заполняющий пространство между объектом и искательной головкой, расположенной в локальной ванне (контактный или иммерсионный способ).

Учитывая, что в большинстве случаев исключена возможность погружения сварных соединений в ванну с жидкостью, для автоматизированного ультразвукового контроля качества сварных соединений может быть рекомендован метод построчного сканирования.

Очевидно, что уровень автоматизации ультразвукового контроля будет определяться тем, какая часть функций элементов обобщенной схемы контроля сварных соединений (см. рис. 102) передается от оператора аппаратуре.

Не исключено, что в некоторых случаях аппаратура для автоматического контроля может оказаться весьма сложной и применение ее из-за больших подготовительных работ — нецелесообразным. В таких случаях более рацио-

нальным будет применение полуавтоматического (механизированного) процесса ультразвуковой дефектоскопии.

Полуавтоматический процесс ультразвуковой дефектоскопии должен занимать, очевидно, промежуточное положение между ручным и автоматическим процессами, в котором рационально, с точки зрения контроля швов определенного типа и размеров, сочетаются экономичность, производительность и достоверность. При полуавтоматическом процессе контроля можно значительную часть функций устройства самоконтроля и дешифратора возложить на оператора, механизировав процесс прозвучивания и регистрации.

В табл. 24 приведена предлагаемая классификация процессов ультразвуковой дефектоскопии в зависимости от уровня автоматизации.

При механизации и автоматизации процесса дефектоскопии особую актуальность приобретает проблема помехоустойчивости аппаратуры к возможным видам помех. Помехи при ультразвуковом контроле делят на электрические и акустические [103]. В свою очередь, оба вида помех разделяются на внутренние, возникающие в приемной аппаратуре, и внешние. Внутренние электрические помехи — это шумы ламп и сопротивлений, имеющие флуктуационный характер, и импульсные сигналы переходных процессов, которые возникают за счет коммутации цепей и имеют характер случайных импульсов. Их обычно устраняют правильным выбором коэффициента усиления приемника и отсечки шумов для заданной чувствительности, подбором ламп и включением развязывающих фильтров в цепи с переходными процессами.

Под внутренними акустическими помехами понимают шумы искателя, работающего по совмещенной схеме, связанные с многократным отражением ультразвука в пьезоэлементе, переходных слоях и призме. Их устраняют путем рационального конструирования искателя и подбором материала для призм и демпфера.

Внешние электрические помехи (сетевые или электромагнитные) имеют импульсный характер и устраняются с помощью сетевых заградительных фильтров и соответствующей экранировкой помехочувствительных каскадов дефектоскопа. Определенный эффект дает также записание приемника на время действия помех [181], широко распространенное в приемниках связи.

Классификация процессов ультразвуковой дефектоскопии по уровню автоматизации

Процесс УЗД	Выполнение функций				
	построения сканирования	наблюдения	регистрация ультра-звуко- грамм	самоконтроля	оценки качества (дешифратора)
Ручной I катего- рии	Оператор	Оператор, по инди- катору типа А	Оператор	Оператор, по этало- нам (тест-образцам)	Оператор
Ручной II катего- рии	»	Оператор, по допол- нительным индика- торам и глубиномеру с непосредственным отсчетом	»	Оператор, по этало- нам (тест-образцам) или по индикатору аварийного состояния аппаратуры	»
Ручной III катего- рии	»	Оператор по индика- тору типа В и по дополнительным ин- дикаторам	Оператор или само- писец	То же	»
Механизированный I категории	Искательная система	Оператор, по допол- нительным индика- торам с последую- щим уточнением ручным контролем II или III категории	Оператор	»	Оператор, по данным ручного контроля

Механизированный II категории	То же	Оператор, по вспо- могательным индика- торам с повторным механизированным сканированием для уточнения сомни- тельных мест по ин- дикатору типа В	»	То же	Оператор, по данным механизированного контроля
Автоматизирован- ный I категории	Искательная система	Дефектоскоп	Дефектоскоп	Оператор, по этало- нам (тест-образцам) и по индикатору аварийного состоя- ния аппаратуры	Оператор, по ультра- звукограмме и дан- ным повторного руч- ного контроля сомни- тельных участков
Автоматизирован- ный II категории	То же	»	»	То же	Оператор, по ультра- звукограмме
Автоматизирован- ный III категории	»	»	»	Дефектоскоп	То же
Автоматический	»	»	»	»	Дефектоскоп

Наиболее опасны внешние акустические помехи, поскольку их источником или передающей средой является контролируемый объект. Такими помехами при эхо-методе могут быть, во-первых, ложные сигналы, связанные с отражением ультразвука от поверхностных неровностей, не являющихся опасными дефектами, во-вторых, структурная реверберация, связанная с отражением ультразвука от структурных неоднородностей или зерен металла. И те и другие носят случайный характер и имеют вид отдельных импульсов, иногда превышающих порог регистрации дефектов.

Кроме того, при скоростном контроле в потоке серьезную опасность представляют помехи, связанные с ударами искательных головок о контролируемое изделие или возникающие в результате попадания под пьезоэлемент окалины или песка. Они также имеют вид хаотичных импульсов различной амплитуды и длительности.

Отдельные импульсы помех при ручном контроле дефектоскопами с электронно-лучевыми трубками во многих случаях хорошо расшифровываются оператором. Однако вследствие этих помех автоматический контроль регистрирующими приборами или сигнализаторами может быть сильно затруднен.

В настоящее время разработан ряд способов повышения помехозащищенности от синхронных и несинхронных помех при ультразвуковом контроле, когда основным видом выделения полезных сигналов являются способы временной и амплитудной селекции [101, 102, 103, 104, 181]. Дальнейшее повышение помехоустойчивости может быть достигнуто использованием дополнительных признаков полезных сигналов [105, 2] и методов статистической радиотехники [149, 138, 104, 200]. Весьма перспективным для увеличения помехоустойчивости аппаратуры и объема информации о характере выявленных дефектов является многопараметровый метод ультразвуковой дефектоскопии.

Механизация и автоматизация процесса дефектоскопии потребовали разработки систем ввода ультразвуковых колебаний и контроля за акустическим контактом, систем временной селекции и измерения координат дефектов, систем регистрации результатов контроля и оценки качества соединений, а также решения вопросов автоматической регулировки чувствительности в зависимости от скорости сканирования.

1. СИСТЕМЫ ВВОДА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И КОНТРОЛЯ ЗА АКУСТИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОМ СКАНИРОВАНИИ

При механизированном сканировании возможны три способа ввода колебаний: контактный (щелевой) (рис. 200, а), иммерсионный (рис. 200, б) и комбинированный — через призму и слой жидкости (рис. 200, в). Для предотвращения попадания на приемный преобразователь колебаний, отраженных от поверхности металла,

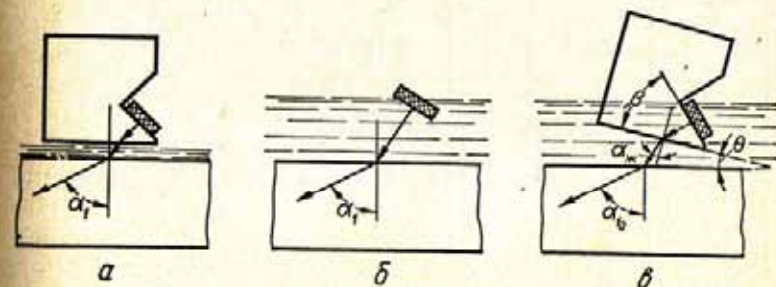


Рис. 200. Способы ввода ультразвуковых колебаний в металл при механизированном сканировании.

целесообразно использовать первый или третий способы, поскольку в этих случаях пьезопреобразователь экранирован призмой от акустических помех.

При механизированном сканировании сварных соединений особое значение приобретает высокая стабильность угла ввода луча в металл.

Причинами отклонений угла ввода при механизированном сканировании могут быть изменения температуры преломляющей призмы или угла наклона призмы. Способ повышения стабильности угла ввода при иммерсионном контроле путем введения призмы [84] базируется, как это показано автором [34], на ошибочном представлении об отсутствии температурной зависимости скорости ультразвука в призме.

Температурная зависимость угла ввода луча в металл при контактном способе определяется выражением (144) и для иммерсионного способа может быть описана соотношением (143), в котором величина $\Delta C_{i_1}/C'_{i_1}$ заменена

значением относительного температурного коэффициента скорости звука в воде. Температурная зависимость скорости звука в воде описывается уравнением [204]

$$C_{ж}(t) \approx 1557 - 0,0245(74 - t)^2. \quad (240)$$

Из выражений (143) и (240) получим

$$\alpha_1 \approx \arcsin \left\{ \frac{\sin \alpha_{10}}{1 - 165 \cdot 10^{-7} [t^2 - 148(t - 20) - 400]} \right\}. \quad (241)$$

На рис. 201 представлены зависимости угла ввода луча в металл от температуры, рассчитанные по формулам (144) и (241) для случая $\alpha_{10} = 70^\circ$. Как это видно из рис. 201, приращения углов ввода луча при контактном (кривая 1) и иммерсионном (кривая 2) способах обратны по знаку.

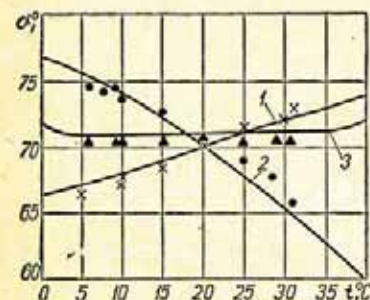


Рис. 201. Расчетные зависимости величины угла α_1 ввода луча в сталь от температуры t :

1 — при непосредственном контакте призмы с поверхностью металла; 2 — при иммерсионном способе передачи ультразвуковой волны от излучателя через воду; 3 — при термостабильном способе передачи ультразвуковой волны от излучателя через призму и воду; точки — эксперимент.

Обозначив отношение синуса угла α_{10} ввода луча в металл к скорости C_{t_0} распространения поперечной волны в нем через P_0 , т. е. $P_0 = \frac{\sin \alpha_{10}}{C_{t_0}}$, на основании закона Снеллиуса получим (рис. 200, е):

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{\sin(\theta + \alpha_{ж0})}{C'_{ж}}; \\ \alpha_{ж0} &= \arcsin \left(\frac{C'_{ж}}{C'_{t_0}} \sin \beta \right). \end{aligned} \right\} \quad (242)$$

где $\alpha_{ж0}$ — угол преломления волны на выходе ее из призмы при температуре воды и призмы $t = t_0$; $C'_{ж}$ — скорость распространения продольной волны в воде при $t = t_0$; C'_{t_0} — то же в материале призмы при $t = t_0$.

Так как скорость ультразвука в металле практически не зависит от его температуры в рабочем интервале, условие термостабильности угла ввода луча имеет вид

$$P(t) = \frac{\sin[\theta + \alpha_{ж}(t)]}{C_{ж}(t)} = P_0. \quad (243)$$

Раскрыв правую часть уравнения (243) и подставив в него выражения для $\alpha_{ж}(t)$, $C_{ж}(t)$ и $C_{t_0}(t)$, получим

$$P(t) = P_0 = \sin \theta \sqrt{\frac{1}{[1557 - 0,0245(74 - t)^2]^2} - \frac{\sin^2 \beta}{[2730 - 3t]^2} + \frac{\sin \beta \cos \theta}{2730 - 3t}}. \quad (244)$$

Если учесть, что в практике контроля температура воды, используемой в качестве контактирующей жидкости, и температура воздуха в помещении не выходят за пределы $0 - 40^\circ \text{C}$, то значения углов θ_0 и β_0 , обеспечивающие термостабильность угла ввода луча, могут быть оценены из условия выполнения равенства (244) при температурах 0° и 40° . Полагая $P(0^\circ) = P(40^\circ)$, находим

$$\text{tg } \theta_0 = \frac{0,017 \cdot \sin \beta_0}{\sqrt{0,492 - 0,134 \sin^2 \beta_0} - \sqrt{0,428 - 0,147 \sin^2 \beta_0}}. \quad (245)$$

Решение уравнения (245) представлено на рис. 202 кривой $\theta_0 = F_1(\beta_0)$, по которой для каждого значения угла β_0 призмы можно найти соответствующее значение угла θ_0 наклона призмы в воде, обеспечивающее равенство углов ввода луча в любой металл при температурах 0 и 40°C .

Из всех возможных сочетаний углов θ_0 и β_0 нужно выбрать такие значения, которые соответствуют заданному углу α_{10} ввода луча в контролируемый металл. Углы θ и β связаны с углом α_{10} выражением, вытекающим из соотношения (242):

$$\sin \left[\theta + \arcsin \left(\frac{C'_{ж}}{C'_{t_0}} \sin \beta \right) \right] = \frac{C'_{ж}}{C'_{t_0}} \sin \alpha_{10}. \quad (246)$$

На рис. 202 представлено семейство кривых $\theta = F_2(\beta)$, рассчитанных по выражению (246) для α_{10} , равных 40, 50, 60, 65, 70 и 80°.

Точка пересечения кривой $\theta_0 = F_1(\beta_0)$ с одной из кривых $\theta = F_2(\beta)$, соответствующей заданному углу α'_{10} , определяет значения углов θ'_0 и β'_0 , которые являются решением системы уравнений (245), (246). При углах θ'_0 и β'_0 волна в металле будет распространяться под углом α'_{10} , величина которого должна оставаться практически постоянной при изменении температуры. Для примера на рис. 201 построена расчетная температурная зависимость (кривая 3) угла ввода луча в сталь через призму с углом $\beta'_0 = 29^\circ 40'$, расположенную под углом $\theta'_0 = 9^\circ 30'$ к поверхности металла. Величины θ_0 и β_0 определены по номограмме (рис. 202) для угла $\alpha'_{10} = 70^\circ$. На этом же рисунке отображены результаты экспериментальных исследований температурных приращений угла ввода луча при трех различных способах ввода ультразвука.

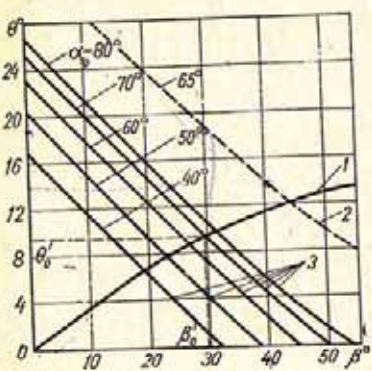


Рис. 202. Номограмма для определения оптимальных значений угла призмы β_0 и угла ее наклона θ_0 в зависимости от требуемого угла ввода луча α_{10} в металл:

1 — $\theta_0 = F_1(\beta_0)$ — для любого металла; 2 — $\theta = F_2(\beta)$ — для меди; 3 — $\theta = F_2(\beta)$ — для стали.

Для исследований были изготовлены призмы (рис. 203), обеспечивающие при температуре $t_0 = 20^\circ \text{C}$ угол ввода

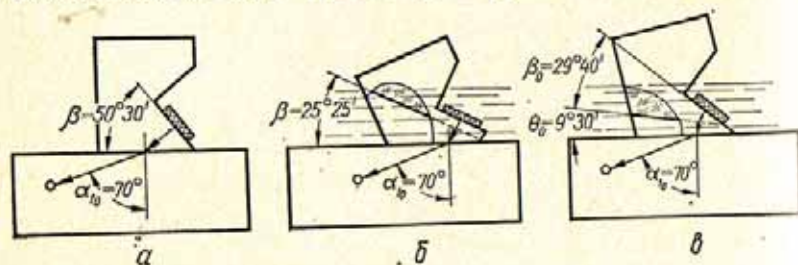


Рис. 203. Схемы исследования температурной зависимости угла ввода луча в металл контактными (а), иммерсионными (б) и термостабильными (в) способами.

$\alpha_{10} \approx 70^\circ$. Угол призмы и угол ее наклона в случае ввода колебаний через призму и слой воды были определены по номограмме (см. рис. 202).

Как видно из рис. 201, результаты расчета и эксперимента совпадают и подтверждают возможность создания термостабильной системы ввода колебаний в металл. Учитывая, что небольшие отклонения угла наклона призмы в воде приводят к значительным изменениям угла ввода луча в металл (см. гл. VI), целесообразно призму устанавливать в локальную ванну, обеспечивающую постоянство выбранного угла наклона призмы. Одна из конструкций локальной ванны с электромагнитами показана на рис. 204.

Рассчитано, что коэффициенты прозрачности по энергии для термостабильного способа несколько выше соответствующих коэффициентов для широко применяемого контактного способа ввода колебаний.

При проверке данных расчета установлено, что чувствительность термостабильного и контактного способов ввода колебаний в пре-

делах точности эксперимента одинакова. Термостабильная система ввода колебаний применяется при контроле сварных соединений из меди (см. гл. VIII).

При автоматическом прозвучивании необходимо постоянно следить за качеством акустического контакта. Осуществить это можно двумя путями: 1) проверкой наличия контактирующей среды между искателем и металлом (косвенный контроль); 2) определением величины интенсивности проходящих в металл колебаний (непосредственный контроль) [32].

Непосредственный контроль может осуществляться измерением амплитуды донного отражения продольной волны [181], излучаемой специальной пластиной в призму искателя и вводимой в металл в том же месте, где вводится основная (рабочая) поперечная ультразвуковая волна

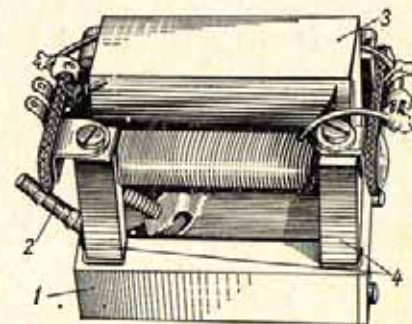


Рис. 204. Локальная ванна конструкции НИИ мостов:

1 — ванна; 2 — штуцер для подвода воды под искатель; 3 — искатель с призмой из органического стекла; 4 — электромагнит.

(рис. 205, а), или же измерением амплитуды поперечной волны, отраженной от поверхности металла (рис. 205, б).

Второй способ непосредственного контроля акустического контакта применяют при дефектоскопии сварных швов труб.

Для проверки первого способа непосредственного контроля были измерены величины эхо-сигналов от искусственных дефектов при прозвучивании образцов призма-

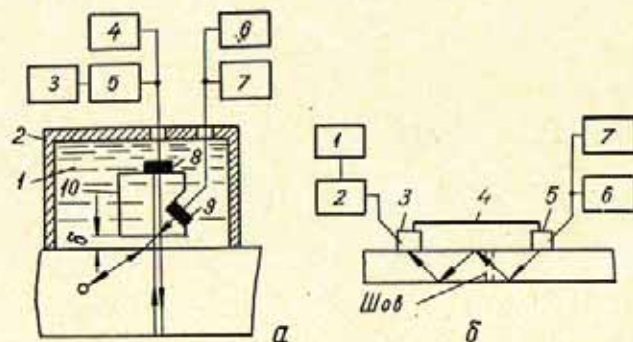


Рис. 205. Схема непосредственного контроля качества акустического контакта:

а — измерением величины донного импульса (1 — контактирующая жидкость; 2 — ванна; 3 — устройство прекращения контроля и подачи аварийного сигнала при нарушении контакта; 4, 5 — генератор и приемник контрольного сигнала; 6, 7 — генератор и приемник рабочего канала; 8, 9 — пьезоэлементы; 10 — призма искателя); б — измерением интенсивности прошедших через шов колебаний (1 — устройство прекращения контроля и подачи аварийного сигнала при нарушении контакта; 2 — приемник контрольного канала; 3 — приемный контрольный искатель; 4 — механическая связь искателей; 5 — приемно-излучающий рабочий искатель; 6, 7 — генератор и приемник рабочего канала).

тическим искателем и амплитуды донного импульса при прозвучивании тех же образцов прямым искателем. Качество поверхности образцов, на которые устанавливали искатели, а также величина зазора между искателем и металлом были различными. Установлено [32], что метод оценки качества акустического контакта для поперечной волны по величине донного отражения продольной волны может быть использован лишь при непосредственном соприкосновении призмы искателя с поверхностью металла, заведомо не имеющей грубых неровностей.

В некоторых случаях в качестве тест-сигнала об акустическом контакте можно использовать уровень реверберационных шумов из призмы (см. гл. III) или амплитуду эхо-сигнала от специального отражателя в призме искателя [157, 115].

2. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ШВОВ

Результатом механизированного и автоматизированного контроля должен быть документ (ультразвукограмма), который содержит информацию о выявленных дефектах, позволяющую оператору оценить качество сварного соединения в соответствии с предъявляемыми к нему техническими требованиями.

При автоматическом контроле оценка качества сварного соединения должна выполняться автоматически. Однако и в этом случае для суждения о стабильности технологического процесса сварки целесообразно получить ультразвукограмму, отмечая на ней не только дефекты, являющиеся браковочным признаком, но и несплошности, допустимые по техническим условиям.

При автоматическом контроле в ряде случаев желательно получать документ в виде ультразвукограмм двух видов.

Ультразвукограмма I вида характеризует отсутствие или наличие в шве дефектов, их расположение по длине и ширине шва и относительные размеры, а иногда и глубину залегания.

Ультразвукограмма II вида представляет собой фотографию изображения поперечного сечения шва в месте обнаружения дефекта, характеризующую конфигурацию выявленных дефектов и их расположение по сечению шва.

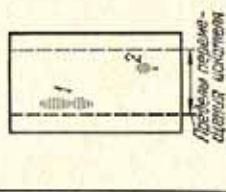
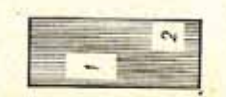
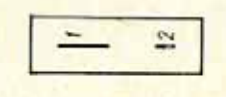
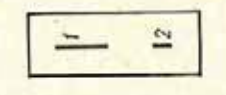
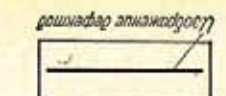
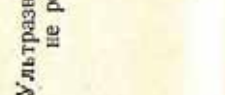
Искажения в изображениях дефектов на ультразвукограммах во многом будут определяться способом сканирования и разрешающей способностью аппаратуры. В табл. 25 приведены эскизы ультразвукограмм, которые могут быть получены при контроле одного и того же шва с использованием различных способов сканирования [32].

Анализируя рассмотренные способы сканирования и ультразвукограммы, приходим к следующим выводам.

Способ продольно-поперечного перемещения искателя позволяет регистрировать два вида ультразвукограмм.

Ультразвукограммы, получаемые при контроле шва

Таблица 25

Ультразвукограмма шва при контроле способом				
Расположение дефектов в контролируемом шве	продольно-поперечного перемещения искателя	бегающего луча	качающегося луча	продольного перемещения искателя
I вида				
				
II вида				
				

Ультразвукограмма II вида не регистрируется

При этом ультразвукограмма I вида дает представление о взаимном расположении дефектов, их протяженности по длине шва и об относительных размерах дефектов; ультразвукограмма II вида позволяет судить о конфигурации озвучиваемой части дефектов и расположении их по сечению шва.

Способ бегающего луча позволяет получать аналогичные ультразвукограммы двух видов, однако при использовании мозаичного преобразователя разрешающая способность этого способа, точность определения относительных размеров дефектов и координат их расположения ниже, чем способа продольно-поперечного перемещения искателя. Искажения в изображении дефекта на ультразвукограммах II вида, получаемых при контроле таким способом, определяются размерами приемно-излучающего элемента и могут быть настолько значительными, что практически судить о форме дефекта не удастся. Искажения значительно уменьшаются, если использовать электронное или электромеханическое перемещение приемно-излучающей области пьезопреобразователя достаточно больших размеров [181].

Способ качающегося луча дает возможность получать ультразвукограммы двух видов. При этом ультразвукограмма I вида характеризует лишь протяженность выявленных дефектов по длине шва. По точности определения протяженности дефектов, их конфигурации и расположению по сечению данный способ ничем не уступает способу продольно-поперечного перемещения искателя.

Способ продольного перемещения искателя позволяет фиксировать лишь ультразвукограмму I вида, характеризующую расположение и протяженность дефектов только по длине шва.

Способ поперечного перемещения искателя обеспечивает лишь регистрацию дефектов в шве без определения места их расположения.

Безусловно, информация, содержащаяся в ультразвукограммах I и II вида, может быть записана на одном документе — ультразвукограмме III вида. На ультразвукограмме III вида не воспроизводятся изображения дефектов, а условно, в виде кода, регистрируется необходимая информация об этих дефектах. При высоких скоростях сканирования запись ультразвукограмм должна вестись на быстродействующие носители информации (кино- и магнитные

ленты, перфоленты и т. п.). Там, где скорость контроля невелика, можно применять типовые многоканальные самопишущие приборы. На рис. 206 в качестве примера приведен возможный вариант ультразвукограммы III вида сварного соединения с дефектами, схематично показанного на том же рисунке. Каналы 1, а; 1, б; 2, а и 2, б используются для отметки несплошностей, выявленных в шве на глубине $(0-0,25)\delta$, $(0,25-0,5)\delta$, $(0,5-0,75)\delta$ и $(0,75-1)\delta$ соответственно; каналы 4, а; 4, б; 5, а и 5, б — для записи расположения выявленных дефектов

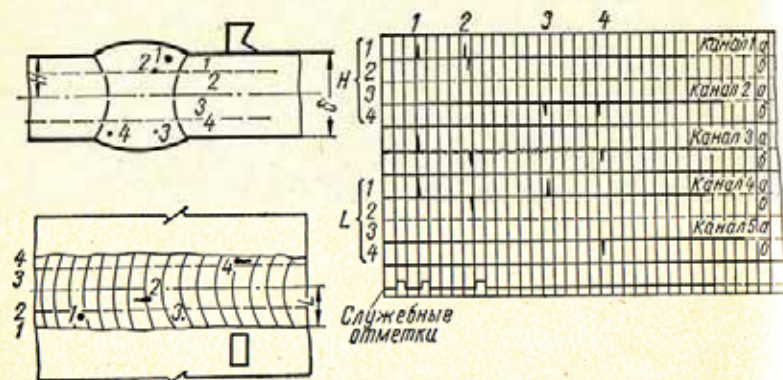


Рис. 206. Ультразвукограмма III вида.

по ширине шва. Канал 3, а регистрирует дефекты, недопустимые по эквивалентной площади; канал 3, б отмечает дефекты, недопустимые по условной протяженности. Эти признаки записываются в виде пиков постоянной амплитуды. Если дефект находится на границе раздела зон, то он фиксируется последовательно двумя пиками. Кроме того, на записывающее устройство канала 3 при нормальной работоспособности дефектоскопа подается переменное напряжение, благодаря чему при этом на ультразвукограмме вычерчивается волнистая линия. Служебный канал используется для служебных и масштабных отметок.

Весьма важной характеристикой системы регистрации документа при автоматическом контроле является разрешающая способность системы. Под разрешающей способностью в данном случае следует понимать способность аппаратуры раздельно воспроизводить расположенные близко дефекты. Повышению разрешающей способности

по многом способствует улучшение направленности поля искателя и уменьшение длительности зондирующих импульсов. Дальнейшее повышение разрешающей способности может быть достигнуто за счет применения методов, разработанных в НИИ мостов ЛИИЖТ. Рассмотрим способы повышения разрешающей способности при получении ультразвукограмм I и II вида.

На ультразвукограмме I вида при каждом цикле поперечного сканирования шва регистрируется условная ширина выявляемого дефекта. При этом условная ширина дефекта не имеет однозначной связи с истинными размерами дефекта и может превышать их на два порядка и более (см. § 4 гл. VII).

Существенное превышение условной ширины дефектов над их истинными размерами является основной причиной снижения фронтальной разрешающей способности при автоматическом контроле по сравнению с разрешающей способностью при ручном контроле. Разрешающую способность можно повысить путем приближения условной ширины дефектов к истинным размерам.

Для приближения условной ширины к истинным размерам дефектов при механизированном сканировании с использованием существующей аппаратуры предлагается способ радиотехнического обострения диаграммы направленности [40].

Сущность этого способа заключается в том, что эхосигналы с выхода системы временной селекции дефектоскопа подаются на регистратор ультразвукограммы через специальное устройство, усиливающее их только при малой величине или равенстве нулю производной огибающей эхосигналов по времени t сканирования.

Устройство (рис. 207, а) состоит из каскада формирования огибающей пачки эхосигналов, каскада дифференцирования огибающей и каскада антисовпадений [41]. На один вход каскада антисовпадений поступают эхосигналы с выхода селектирующей системы дефектоскопа (рис. 207, а), а на второй вход — напряжение, пропорциональное первой производной огибающей эхосигналов по времени t поперечного перемещения искателя (напряжение аналога производной). Напряжение — аналога производной запирает каскад антисовпадений, благодаря чему усиливаются лишь те эхосигналы из пачки, которые по времени соответствуют весьма малой, близкой к нулю, величине этого

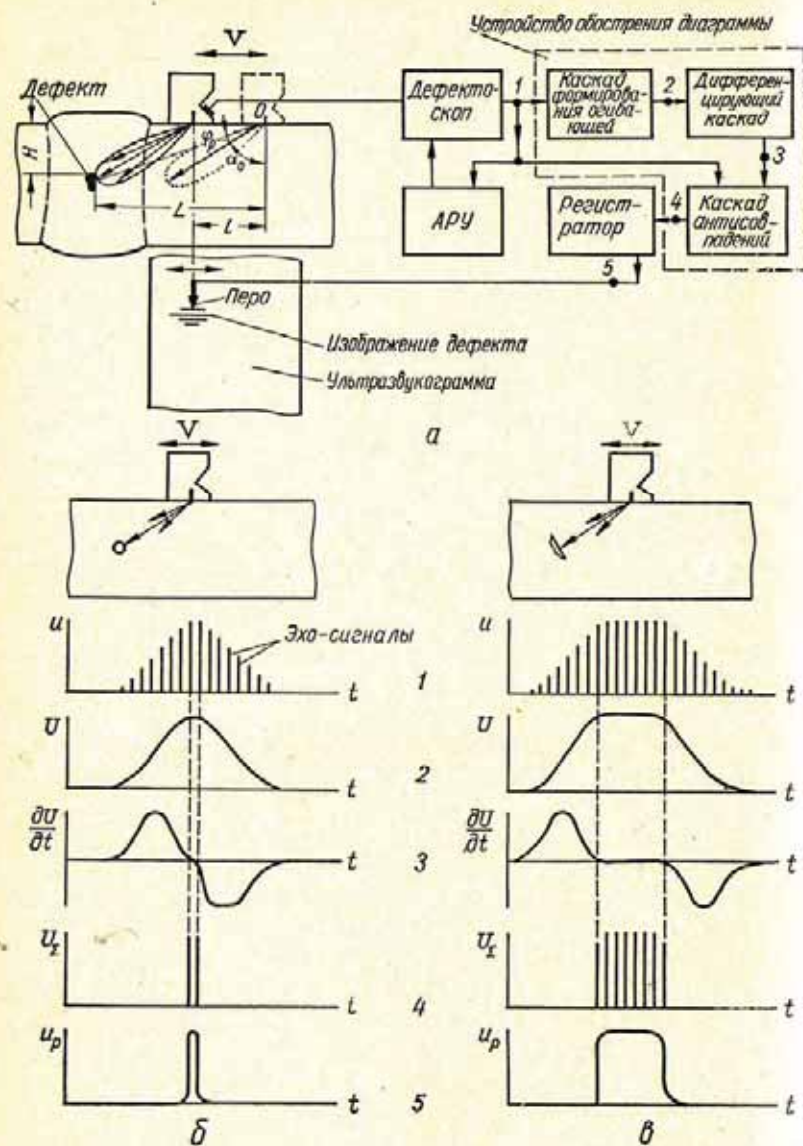


Рис. 207. Функциональная схема устройства радиотехнического обострения диаграммы направленности искателя.

напряжения. Эхо-сигналы с выхода каскада антисовпадений управляют регистратором изображений выявленных дефектов. В идеальном случае регистрация изображений дефектов округлой формы будет производиться только в момент озвучивания их под углом ввода луча, что эквивалентно контролю шва искателем с идеально обостренной диаграммой направленности в виде тонкой нити, совпадающей с акустической осью. При этом условная ширина дефектов, записанная на ультразвукограмме, должна значительно меньше отличаться от их истинных размеров, чем это имеет место при записи ультразвукограмм известными способами (рис. 207, б, в).

Огибающая $U(t)$ пачки эхо-сигналов от отражателя с круговой индикатрисой рассеяния может быть описана выражением (191), если в нем аргумент α_i записать как функцию времени t .

Из рис. 207 видно, что

$$\alpha_i = \arccos \frac{H}{r(\alpha_i)} = \frac{H}{\sqrt{(L-l)^2 + H^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L}{H} - \frac{l}{H}\right)^2 + 1}}.$$

Принимая $l = Vt$ (V — скорость сканирования) и $L = H \operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_p)$ (φ_p — половина угла раскрытия основного лепестка на нулевом уровне), получаем

$$\alpha_i = \arccos \frac{1}{\sqrt{\left[\operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_p) - \frac{V}{H} t\right]^2 + 1}} = \arccos \frac{1}{\sqrt{B(t)}}. \quad (247)$$

Заметим, что если сканирование осуществляется при движении искателя вперед, то α_i падает с увеличением t . Из выражений (191), (126) и (247) при условии введения в дефектоскоп системы автоматической регулировки усиления (АРУ) и аппроксимации основного лепестка диаграммы направленности соотношением (124) находим:

$$U_i = \mu \left\{ \psi \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{B(t)}} - \alpha_0 \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{B(t)} \exp \left[-2\delta H \sqrt{B(t)} \right] - A_0 \right\}, \quad (248)$$

где

$$\mu = K \frac{\Delta U}{A_0};$$

$$\psi = \frac{1}{\cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_1 - \alpha_0) \right] \cos^2 \alpha_1 \exp \left(-\frac{2\delta H}{\cos \alpha_1} \right)};$$

$$B(t) = 1 + \left[\operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_p) - \frac{V}{H} t \right]^2.$$

Функция $U(t)$ определяет амплитуду сигнала на выходе приемного тракта при t , лежащем в интервале

$$\frac{H}{V} \cdot \frac{\sin(\varphi_p - \varphi_\Delta)}{\cos(\alpha_0 + \varphi_p) \cos(\alpha_0 + \varphi_\Delta)} \leq t \leq \frac{H}{V} \cdot \frac{\sin(\varphi_p + \varphi_\Delta)}{\cos(\alpha_0 + \varphi_p) \cos(\alpha_0 - \varphi_\Delta)},$$

где φ_Δ — половина угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности искателя на заданном относительном уровне отсечки A .

Вне указанного интервала амплитуда выходного сигнала $U(t)$ тождественно равна нулю. Полагая, что временной анализ напряжения огибающей пачки эхо-сигналов осуществляется при движении искателя вперед без каких-либо погрешностей, находим выражение для напряжения аналога производной:

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} = 2\mu\psi \frac{V}{H} \cdot \frac{1}{B^2(t)} \cos^2 \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{B(t)}} - \alpha_0 \right) \right] \times$$

$$\times \exp \left[-2\delta H \sqrt{B(t)} \right] \left\{ \frac{\pi}{5\varphi_0} \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{B(t)}} - \alpha_0 \right) \right] + \right.$$

$$\left. + \sqrt{B(t) - 1} [1 + \delta H \sqrt{B(t)}] \right\}. \quad (249)$$

При этом напряжение $U_2(t)$ на выходе каскада антисовпадений, выполняющего операцию алгебраического сложения напряжений, составит:

$$U_2(t) = U_2(t) - \xi \left| \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right| \quad \text{при } U_2(t) > \xi \left| \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|;$$

$$U_2(t) = 0 \quad \text{при } U_2(t) \leq \xi \left| \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|,$$

где

$$U_2(t) = \begin{cases} U(t) \sum_{k=0}^m (1kT_n - 1kT_n + \tau) & \text{— при подаче на вход} \\ \text{каскада пачки из } m \text{ сигналов [82];} \\ U(t) & \text{— при подаче на вход каскада огибающей} \\ & \text{пачки эхо-сигналов;} \end{cases}$$

τ — длительность эхо-сигнала; T_n — период следования эхо-сигналов; ξ — коэффициент пропорциональности, определяемый коэффициентами ξ_0 передачи дифференцирующего устройства (сек) и безразмерным коэффициентом ξ_y передачи нормирующего усилителя; m — количество эхо-сигналов в пачке.

Если регистратор фиксирует изображение дефекта в течение времени, когда $|U_2(t)| > 0$, то условная ширина дефекта

$$\Delta x = V(t_2 - t_1), \quad (251)$$

где t_2 и t_1 — корни уравнения, получаемого из выражения (250)

$$U(t) = \xi \left| \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|. \quad (252)$$

При $\xi = 0$, т. е. при выключении устройства радиотехнического обострения диаграммы направленности, условная ширина $\Delta x(0)$ максимальна и определяется выражением (215). Отношение $v = \frac{\Delta x(\xi)}{\Delta x(0)}$ характеризует повышение разрешающей способности за счет введения предлагаемого устройства.

Уравнение (252) в общем виде не поддается анализу. Графическое решение этого уравнения для типового случая ($\alpha_0 = 50^\circ$, $\varphi_0 = 3,5^\circ$, $\delta = 0,002 \text{ мм}^{-1}$, $H = 75 \text{ мм}$ и $V = 100 \text{ мм/сек}$) и полученная в результате решения зависимость $v = F(\xi)$ для $A_0 = 0,25$ отображены на рис. 208. Из выражений (248) и (249), а также рис. 208 следует, что повышение v разрешающей способности тем существеннее, чем меньше угол ввода луча и глубина расположения отражателя и чем больше направленность поля искателя, скорость сканирования и коэффициент усиления усилителя напряжения-аналога производной.

Предельное значение повышения разрешающей способности ограничивается минимальным значением $\Delta t_{\min} = t_2 - t_1$, при котором еще гарантируется выделение эхо-сигнала каскадом антисовпадений. За такое значение $\Delta t_{\min}$ следует принять двойной период T следования эхо-сигналов:

$$\Delta t_{\min} = 2T = \frac{2}{F}.$$

При $F = 2 \div 3 \text{ кГц}$ максимальное повышение разрешающей способности может составить $v = 0,005 \div 0,0002$.

Столь высокое повышение разрешающей способности практически не реализуемо.

Точность регистрации положения изображений дефектов на ультразвукограмме I вида при использовании устройства радиотехнического обострения диаграммы направленности будет определяться точностью формирования напряжения огибающей пачки эхо-сигналов и точностью дифференцирования этого напряжения.

Формирование напряжения огибающей пачки может быть осуществлено пиковым детектором с фильтром низких частот на выходе. Количество импульсов в пачке от точечного дефекта

$$m = F \frac{\Delta x}{V}, \quad (253)$$

где F — частота повторения зондирующих импульсов; Δx — условная ширина дефекта на нулевом уровне отсечки, определяемая равенством (208), в котором $\alpha_{11} = \alpha_0 + \varphi_p$ и $\alpha_1 = \alpha_0 - \varphi_p$.

Учитывая, что $\varphi_p \approx 2,5\varphi_0$, из выражений (253) и (200) находим

$$m = \frac{FH}{V} [\operatorname{tg}(\alpha_0 + 2,5\varphi_0) - \operatorname{tg}(\alpha_0 - 2,5\varphi_0)].$$

Обычно скорость поперечного сканирования не превышает 100 мм/сек. Минимальное число $m_{\min}$ эхо-сигналов в пачке будет при $H = H_{\min} = 20$ мм и $\alpha_0 = \alpha_{0\min} = 50^\circ$. Принимая $F = 2000$ гц и $V = V_{\max} = 100$ мм/сек, получим $m_{\min} = 320$.

При столь значительном числе импульсов в пачке не представляет технических трудностей обеспечить высокую точность формирования напряжения огибающей пачки [126].

Дифференцирование напряжения огибающей будет выполняться с некоторой погрешностью, в результате чего напряжение аналога производной не будет совпадать с математическим выражением соответствующей производной. Погрешность дифференцирования обуславливается схемой и параметрами дифференцирующего устройства. Наиболее простым устройством, посредством которого может быть осуществлено дифференцирование, является цепь из емкости C и сопротивления R . Дифференцирование посредством RC -цепи сопровождается погрешностями, вызывающими искажение выходного сигнала в начальный момент времени

и фазовое искажение выходного сигнала, определяемое углом сдвига Θ .

Приближенный анализ процесса дифференцирования напряжения огибающей последовательности эхо-сигналов поз-

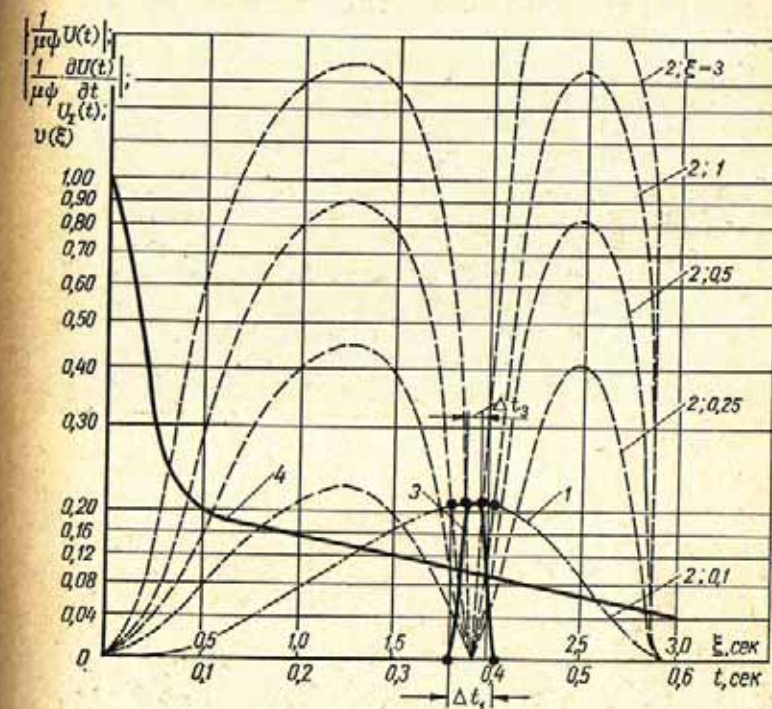


Рис. 208. Графики расчета повышения разрешающей способности при регистрации ультразвукограмм I вида:

1 — $\left| \frac{1}{\mu\phi} U(t) \right|$; 2 — $\left| \frac{1}{\mu\phi} \frac{dU(t)}{dt} \right|$; 3 — $U_2(t)$ для $\xi = 1$; 4 — $v = F(\xi)$; $\Delta t = t_2 - t_1$.

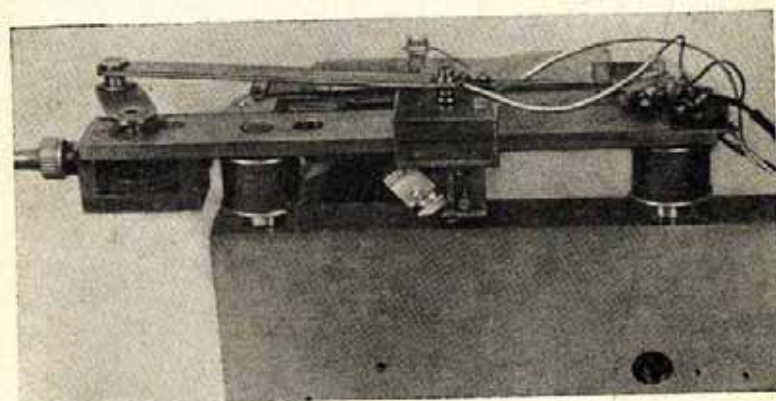
волил получить выражение постоянной времени RC -цепи, при которой фазовые искажения не приводят к ошибкам в регистрации ультразвукограмм, превышающим ошибки при ручном контроле:

$$RC \leq 0,1 \frac{H}{V} \cdot \frac{\varphi_0 (\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + 1)}{0,2\varphi_0 \operatorname{tg} \alpha_0 + 1}. \quad (254)$$

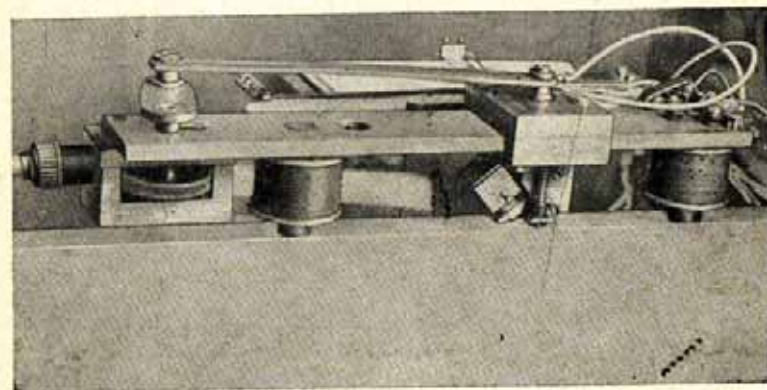
Постоянная времени RC дифференцирующей цепи должна рассчитываться исходя из наименее благоприятных значе-

ний параметров H , V , α_0 и φ_0 , при которых правая часть неравенства (254) минимальна. Тогда при любых других значениях параметров фазовый сдвиг будет менее расчетного.

Предлагаемый способ экспериментально исследовали на специальной установке и образцах с различными моделями де-



а



б

Рис. 209. Общий вид образцов с моделями дефектов и устройством сканирования.

фектов (рис. 209). Блок-схема установки показана на рис. 210. Формирование огибающей производилось с помощью пикового детектора с фильтром низких частот; постоянная времени дифференцирующей цепочки $RC = 5,1 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \times 10^{-6} = 0,006 \text{ сек.}$ На рис. 211 приведены фотографии форм

напряжений в различных точках схемы и ультразвукограмм при выявлении моделей дефектов при скорости сканирования $V = 50 \text{ мм/сек.}$ Для каждой модели дефекта даны две ультразвукограммы, одна из которых получена при использовании рассматриваемого устройства (Π в положении I), а другая — без него (Π в положении II). Вертикальная линия на ультразвукограммах определяет положение пера, найденное при перемещении искателя вручную и соответствующее максимальной амплитуде эхосигнала от модели дефекта.

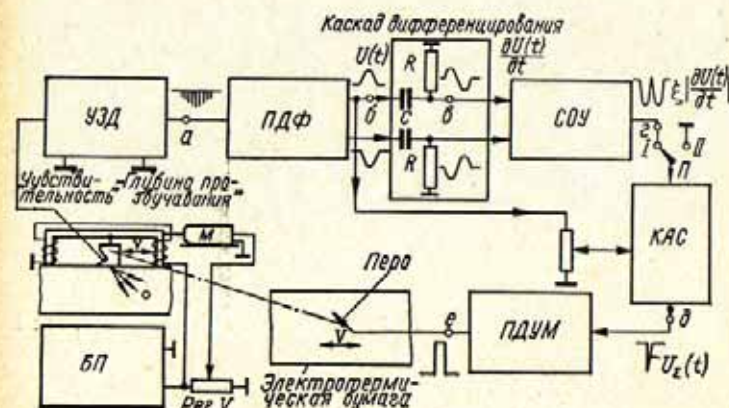
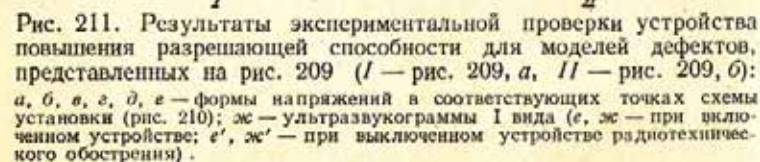


Рис. 210. Блок-схема экспериментальной установки для проверки способа повышения разрешающей способности при регистрации ультразвукограмм I вида:

УЗД — ультразвуковой дефектоскоп; ПДФ — пиковый детектор с фильтром; СОУ — смеситель, ограничитель и усилитель; КАС — каскад антисовпадений; ПДУМ — пиковый детектор с усилителем мощности; БП — блок питания; М — мотор.

Как видно из рис. 211, данные эксперимента хорошо согласуются с теоретическими предпосылками и подтверждают принципиальную возможность использования предлагаемого способа для повышения разрешающей способности при регистрации ультразвукограмм I вида.

Ультразукограммы II вида удобно получать на осциллографическом индикаторе типа В. На экране электронно-лучевой трубки индикатора воспроизводится (рис. 212) линия развертки, расположенная под углом к вертикали, равным углу α_0 наклона акустической оси искателя. Длительность развертки равна времени прохождения



На отклоняющие пластины трубки импульсы подается (старшимпульс)

ГР

ГВИ

СУ

На лампы совпадения

На модулятор трубки

ПТ

Линейное изображение дефекта 2

Diagram illustrating the control system for a tube with inclined plates. The system includes a control unit (ГР) and a generator (ГВИ) connected to a switch (СУ) and a modulator (ПТ). The modulator is connected to the tube (Т) and the lamp (Л). The tube is shown with inclined plates (1) and a defect (2). The diagram also shows the geometry of the tube, including the angle of inclination α_0 , the distance L , and the radius R . A detailed view of the tube shows the defect (2) and the inclined plates (1) with dimensions $l = M \cdot r$, θ , θ_0 , and α_0 .

ГР — генератор развертки; ГВИ — генератор высокочастотных импульсов; ПТ — приемный тракт; СУ — синхронизирующее устройство.

Модулятор электронно-лучевой трубки связан с выходом приемного тракта дефектоскопа. Импульсы, возникающие на выходе видеоусилителя дефектоскопа в момент обнаружения дефекта, уменьшают яркость электронного луча и вызывают появление темных точек на развертке в местах, соответствующих расположению озвучиваемого контура дефекта в данном сечении шва.

Для наблюдений на индикаторе типа В одного или нескольких выявленных дефектов необходимо получить с минимально возможными искажениями отдельные изображения их на экране электронно-лучевой трубки.

Разрешающая способность (минимальное расстояние между дефектами, раздельно различаемыми на экране) и возможные искажения в изображении дефектов при регистрации ультразвукограммы II вида зависят от: длительности τ ультразвукового импульса длительности τ_1 видеоимпульса, подаваемого на индикатор; масштаба M изображения и размера пятна d_n электроннолучевой трубки; угла расхождения и угла ввода ультразвукового луча.

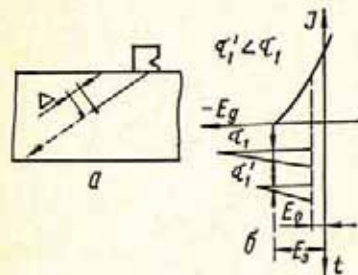


Рис. 213. Схема расчета разрешающей способности от длительности и формы ультразвукового и видеоимпульса

Δ — расстояние между дефектами; E_g — напряжение на управляющей сетке трубки; I — ток луча в трубке; t — время; E_2 — напряжение смещения на управляющей сетке, соответствующее нормальной яркости; E_3 — напряжение на управляющей сетке, запирающее трубку по току (нулевая яркость).

скопа, глубиной залегания и характером дефекта, а также качеством акустического контакта искателя с металлом. Если $\tau_1 > \tau$, то разрешающая способность Δ (рис. 213, а) связана с τ_1 соотношением, вытекающим из выражения (166)

$$\Delta \approx \frac{C_1 \tau_1}{2}. \quad (255)$$

Для увеличения разрешающей способности и получения изображений, не зависящих от перечисленных факторов, целесообразно использовать более короткие ультразвуковые импульсы, а модуляцию по яркости производить предварительно нормализованными по длительности и амплитуде видеоимпульсами с выхода приемного тракта дефектоскопа. Уменьшение длительности ультразвуковых импульсов будет сопровождаться повышением разрешающей

способности до тех пор, пока длительность импульсов превышает длительность развертки в пределах пятна на экране. Длительность пятна зависит от его диаметра и масштаба изображения (скорости развертки). Таким образом, разрешающая способность при получении изображений дефектов может обуславливаться длительностью ультразвуковых импульсов или же масштабом изображения и диаметром пятна.

Разрешающая способность, определяемая длительностью τ импульсов, и разрешающая способность, обуславливаемая масштабом M изображения и диаметром d_n пятна, будут равны, если число импульсов, которые могут разместиться во времени при длине r пути ультразвукового луча будет равно числу пятен, которые могут уложиться на линии развертки длиной l , т. е.

$$\frac{2r}{C_1 \tau} = \frac{l}{d_n} = \frac{Mr}{d_n}, \quad (256)$$

где $\frac{2r}{C_1 \tau}$ — число импульсов, которые могут разместиться во времени при длине r пути ультразвукового импульса в контролируемом участке; $\frac{Mr}{d_n}$ — число пятен, которые могут уложиться на линии развертки длиной Mr .

Используя формулу (256), можно определить минимальный масштаб изображения, позволяющий реализовать предельную разрешающую способность, обуславливаемую длительностью ультразвукового импульса:

$$M_{\min} = \frac{2d_n}{C_1 \tau}. \quad (257)$$

Масштаб получаемого на экране изображения найдем из соотношения (см. рис. 212)

$$D^2 = (a_0)^2 = (MH)^2 + (ML + MH \operatorname{tg} \alpha_0)^2,$$

откуда

$$M = \frac{D}{\sqrt{H^2 + (L + H \operatorname{tg} \alpha_0)^2}}, \quad (258)$$

где D — диаметр экрана электронно-лучевой трубки; H — толщина контролируемого слоя; L — величина поперечного перемещения искателя.

Применительно к стыковым швам формула (258) принимает вид

$$M = \frac{D}{\sqrt{H^2 + (2H \operatorname{tg} \alpha_0 - d)^2}}, \quad (259)$$

где d — стрела искателя.

Из выражений (257) и (259) можно определить величину рабочего диаметра экрана, при котором разрешающая способность будет максимальна:

$$D \geq \frac{2d_n \sqrt{H^2 + (2H \operatorname{tg} \alpha_0 - d)^2}}{C_t \tau}. \quad (260)$$

Из выражения (260) следует, что для контроля стыковых соединений толщиной $H = 100$ мм искателем с углом $\alpha_0 \leq 65^\circ$, излучающим ультразвуковые импульсы длительностью $\tau \approx 2$ мксек, рабочий диаметр типовой электронно-лучевой трубки, у которой обычно $d_n \approx 0,5$ мм, должен быть не менее 66 мм.

Искажения при получении видимого изображения дефекта будут тем меньше, чем меньше угол расхождения и угол ввода ультразвукового луча.

Экспериментальные исследования регистрации ультразвукограммы II вида подтвердили изложенные выше теоретические предпосылки.

Исследования производили на стальных образцах, в которых были имитированы дефекты в виде отверстий диаметром 1,5 мм, и на стыковых сварных швах толщиной 40 мм.

Искатель, подключенный к дефектоскопу УЗД-НИИМ-5, автоматически перемещался с помощью специального приспособления по поверхности образца, покрытой слоем трансформаторного масла. Видеоимпульсы с выхода дефектоскопа для нормализации подавались на ждущий блокинг-генератор. Изображение поперечного сечения контролируемого образца воспроизводилось на экране электронно-лучевой трубки.

Поворот линии развертки на необходимый угол α_0 достигался подачей напряжения развертки на горизонтально и на вертикально-отклоняющие пластины трубки одновременно. Смещение развертки синхронно с перемещением

искателя обеспечивалось напряжением, подаваемым на горизонтально-отклоняющие пластины с движка на потенциометре, жестко связанного с искателем. Яркость развертки модулировалась импульсами, поступающими непосредственно с выхода видеоусилителя дефектоскопа, или нормализованными импульсами, снимаемыми с блокинг-генератора.

На рис. 214 и 215 приведены ультразвукограммы II вида, полученные при контроле образцов. Видно, что



Рис. 214. Фотографии экрана трубки при выявлении трех отверстий диаметром 1,5 мм, расположенных на расстоянии 3,5 мм друг от друга (глубина залегания первого отверстия 25 мм):

a — модуляция по яркости осуществлялась видеоимпульсом, угол ввода луча $\alpha = 50^\circ$; $б$ — модуляция по яркости осуществлялась нормализованным видеоимпульсом, $\alpha = 50^\circ$; $в$ — то же, $\alpha = 65^\circ$.

для достижения большей разрешающей способности при получении ультразвукограммы II вида, не зависящей в сильной степени от чувствительности и акустического контакта, следует использовать предварительно нормализованный видеоимпульс выходного каскада приемника дефектоскопа (рис. 214, a , $б$). Искажения в изображении дефектов увеличиваются с увеличением угла ввода ультразвукового луча (рис. 214, $б$, $в$).

При близком расположении друг от друга дефектов и большой чувствительности возможно появление на экране ложных изображений выявленных дефектов вследствие вторичных отражений от них ультразвукового импульса. Если два или более одинаковых по размерам

Применительно к стыковым швам формула (258) принимает вид

$$M = \frac{D}{\sqrt{H^2 + (2H \operatorname{tg} \alpha_0 - d)^2}}, \quad (259)$$

где d — стрела искателя.

Из выражений (257) и (259) можно определить величину рабочего диаметра экрана, при котором разрешающая способность будет максимальна:

$$D \geq \frac{2d_n \sqrt{H^2 + (2H \operatorname{tg} \alpha_0 - d)^2}}{C_{\Gamma}}. \quad (260)$$

Из выражения (260) следует, что для контроля стыковых соединений толщиной $H = 100$ мм искателем с углом $\alpha_0 \leq 65^\circ$, излучающим ультразвуковые импульсы длительностью $\tau \approx 2$ мксек, рабочий диаметр типовой электронно-лучевой трубки, у которой обычно $d_n \approx 0,5$ мм, должен быть не менее 66 мм.

Искажения при получении видимого изображения дефекта будут тем меньше, чем меньше угол расхождения и угол ввода ультразвукового луча.

Экспериментальные исследования регистрации ультразвукограммы II вида подтвердили изложенные выше теоретические предпосылки.

Исследования производили на стальных образцах, в которых были имитированы дефекты в виде отверстий диаметром 1,5 мм, и на стыковых сварных швах толщиной 40 мм.

Искатель, подключенный к дефектоскопу УЗД-НИИМ-5, автоматически перемещался с помощью специального приспособления по поверхности образца, покрытой слоем трансформаторного масла. Видеоимпульсы с выхода дефектоскопа для нормализации подавались на ждущий блокинг-генератор. Изображение поперечного сечения контролируемого образца воспроизводилось на экране электронно-лучевой трубки.

Поворот линии развертки на необходимый угол α_0 достигался подачей напряжения развертки на горизонтально и на вертикально-отклоняющие пластины трубки одновременно. Смещение развертки синхронно с перемещением

искателя обеспечивалось напряжением, подаваемым на горизонтально-отклоняющие пластины с движка на потенциометре, жестко связанного с искателем. Яркость развертки модулировалась импульсами, поступающими непосредственно с выхода видеоусилителя дефектоскопа, или нормализованными импульсами, снимаемыми с блокинг-генератора.

На рис. 214 и 215 приведены ультразвукограммы II вида, полученные при контроле образцов. Видно, что



Рис. 214. Фотографии экрана трубки при выявлении трех отверстий диаметром 1,5 мм, расположенных на расстоянии 3,5 мм друг от друга (глубина залегания первого отверстия 25 мм):

а — модуляция по яркости осуществлялась видеоимпульсом, угол ввода луча $\alpha = 50^\circ$; б — модуляция по яркости осуществлялась нормализованным видеоимпульсом, $\alpha = 50^\circ$; в — то же, $\alpha = 65^\circ$.

для достижения большей разрешающей способности при получении ультразвукограммы II вида, не зависящей в сильной степени от чувствительности и акустического контакта, следует использовать предварительно нормализованный видеоимпульс выходного каскада приемника дефектоскопа (рис. 214, а, б). Искажения в изображении дефектов увеличиваются с увеличением угла ввода ультразвукового луча (рис. 214, б, в).

При близком расположении друг от друга дефектов и большой чувствительности возможно появление на экране ложных изображений выявленных дефектов вследствие вторичных отражений от них ультразвукового импульса. Если два или более одинаковых по размерам

дефекта расположены по линии распространения ультразвуковых колебаний, на экране трубки возможно воспроизведение изображения лишь дефекта, ближайшего к искателю (рис. 215).

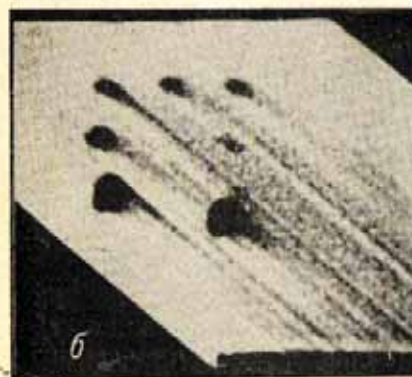


Рис. 215. Расположение отверстий диаметром 1,5 мм в образце (а) и фотография экрана при выявлении их методом продольно-поперечного перемещения искателя (б, в).

Следует отметить, что реализация рассмотренных предложений в существующей аппаратуре с целью механизации и автоматизации контроля сварных соединений не представляет технических трудностей.

3. ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ЭХО-СИГНАЛОВ И ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

На данном этапе развития ультразвуковой дефектоскопии из всего объема информации, содержащейся в отраженном сигнале, используется лишь информация, связанная с амплитудой эхо-сигнала и временным сдвигом его по отношению к зондирующему импульсу.

В связи с этим эффективность систем амплитудной и временной селекции обуславливает достоверность результатов ультразвукового контроля. Параметры селективных систем выбирают, исходя из идеализированного представления ультразвукового пучка в виде тонкого луча, совпадающего с осью диаграммы направленности (см. гл. III). При ручном контроле такое допущение не приводит к грубым ошибкам, так как оператор после обнаружения эхо-сигналов производит дополнительное селектирование путем измерения координат отражающей поверхности, предварительно располагая искатель так, чтобы отражающая поверхность находилась на оси диаграммы направленности. При автоматизированном контроле с помощью известных дефектоскопов исключается возможность такого дополнительного селектирования. Это является одной из основных причин низкой помехоустойчивости автоматизированного контроля и применения его лишь для предварительной отбраковки сомнительных участков с последующим уточнением качества их путем повторного ручного контроля [181, 182].

Рассмотрим процесс селектирования эхо-сигналов при автоматизированном контроле типовой аппаратурой. Если контролируемый слой величиной H расположен на глубине h (рис. 216, 217), то временной сдвиг T_0 и длительность t_c селектирующего импульса должны быть выбраны в соответствии с выражениями (35), в одно из которых входит время t_n распространения ультразвука в призме искателя.

Время прохождения ультразвука в призме искателя определяется длиной пути его в призме (рис. 216) и составляет: для колебаний, излучаемых наиболее близким к поверхности металла краем пластины

$$t_n \approx 0;$$

для ультразвуковых колебаний, распространяющихся по оси луча

$$t_{n_0} = \frac{D \operatorname{tg} \beta}{C_{t_1}};$$

для колебаний, излучаемых наиболее удаленным от поверхности металла краем пластины

$$t_{n_2} = \frac{2D \operatorname{tg} \beta}{C_{t_1}}.$$

В связи с этим при автоматизированном контроле слоя, находящегося в ближней зоне искателя, могут быть

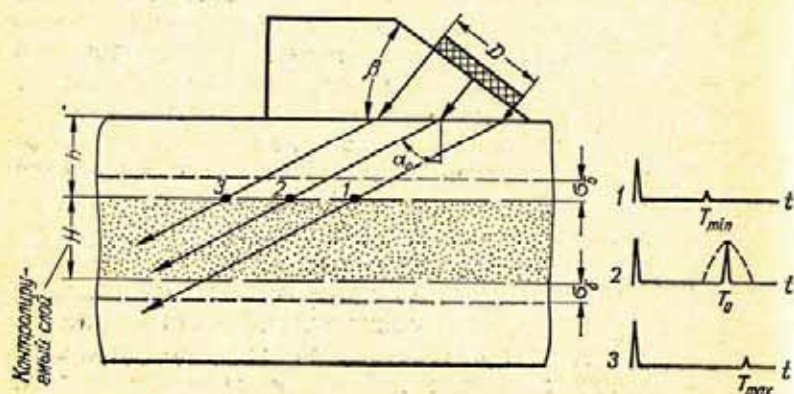


Рис. 216. Схема селектирования эхо-сигналов при расположении отражателей в ближней зоне искателя.

зафиксированы ложные эхо-сигналы от отражающих поверхностей, расположенных в области σ_0 вне слоя (рис. 216). Величина σ_0 определяется соотношением

$$\begin{aligned} \sigma_0 &\approx \frac{C_{t_2}}{2} (t_{n_2} - t_{n_0}) \cos \alpha_0 = \frac{C_{t_2}}{2} (t_{n_2} - t_{n_1}) \cos \alpha_0 = \\ &= \frac{C_{t_2}}{2} t_{n_0} \cos \alpha_0. \end{aligned} \quad (261)$$

После некоторых преобразований получим

$$\sigma_0 \leq \frac{1}{2} \frac{C_{t_2}}{C_{t_1}} D \operatorname{tg} \beta \sqrt{1 - \left(\frac{C_{t_2}}{C_{t_1}}\right)^2 \sin^2 \beta}. \quad (262)$$

Если расстояние до контролируемого слоя существенно превышает протяженность ближней зоны, то разностью времени распространения отдельных частей ультразвукового пучка в призме искателя можно пренебречь и рассматривать искатель как приемно-передающий элемент, расположенный на границе призмы с металлом. В этом случае временной сдвиг T_i эхо-сигнала по отношению к зондирующему импульсу будет определяться выражением

$$T_i \approx \frac{2h}{\cos \alpha_i C_{t_2}},$$

где α_i — угол преломления, под которым озвучивается отражатель.

Так как

$$\alpha_0 - \varphi_1 < \alpha_i < \alpha_0 + \varphi_2,$$

то

$$T_{\min} \approx \frac{2h}{C_{t_2} \cos (\alpha_0 - \varphi_1)};$$

$$T_{\max} \approx \frac{2h}{C_{t_2} \cos (\alpha_0 + \varphi_2)};$$

$$T_0 \approx \frac{2h}{C_{t_2} \cos \alpha_0},$$

где φ_1 и φ_2 — углы раскрытия основного лепестка диаграммы направленности.

Учитывая, что $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi_p$, находим величину аналогичных областей σ_{d_1} и σ_{d_2} для дальней зоны (рис. 217). Максимальная величина области $\sigma_{d_{lm}}$ определяется из соотношения (рис. 217)

$$\begin{aligned} \sigma_{d_{lm}} &\approx \frac{1}{2} C_{t_2} (T_{\max} - T_0) \cos (\alpha_0 + \varphi_p) \approx \\ &\approx \frac{1}{2} C_{t_2} \left[\frac{2h}{C_{t_2} \cos (\alpha_0 + \varphi_p)} - \frac{2h}{C_{t_2} \cos \alpha_0} \right] \cos (\alpha_0 + \varphi_p) \approx \\ &\approx \left[1 - \frac{\cos (\alpha_0 + \varphi_p)}{\cos \alpha_0} \right] h. \end{aligned} \quad (263)$$

Таким же образом получим

$$\sigma_{d_{2m}} \approx (h + H) \left[\frac{\cos (\alpha_0 - \varphi_p)}{\cos \alpha_0} - 1 \right]. \quad (264)$$

При наличии в приемном тракте дефектоскопа ограничения по минимуму в выражения (263) и (264) вместо угла

φ_p следует подставлять значение угла φ_Δ , соответствующего уменьшению амплитуды эхо-сигнала до величины порога ограничения.

Максимальная абсолютная погрешность ΔH в измерении глубины $H = h$ расположения отражателя в дальней зоне равна σ_{Δ_1} , а относительная погрешность

$$A_\alpha = \left| \frac{\sigma_{\Delta_1}}{H} \right| = 1 - \frac{\cos(\alpha_0 + \varphi_\Delta)}{\cos \alpha_0}. \quad (265)$$

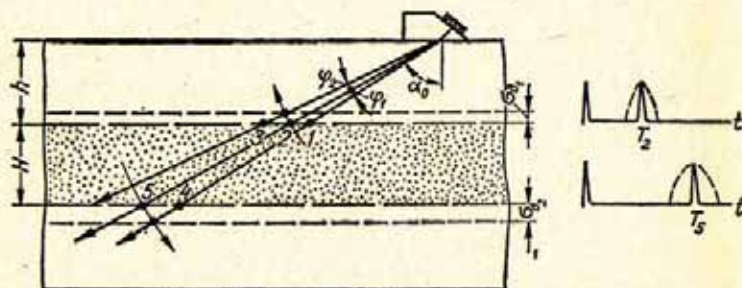


Рис. 217. Схема селектирования эхо-сигналов при расположении отражателей в дальней зоне искателя.

В табл. 26 приведены расчетные и экспериментальные значения ΔH и A_α , полученные при ручном и автоматизированном контроле с использованием существующей аппаратуры. Исследования выполнены на стальном образце.

Таблица 26

Результаты исследований погрешности измерения глубины расположения отражателя

H_0 , мм	Ручной контроль					Автоматизированный контроль									
						$\Delta\varphi \approx 3,2^\circ$					$\Delta\varphi \approx 6,5^\circ$				
	Расчет		Эксперимент			Расчет		Эксперимент			Расчет		Эксперимент		
	ΔH , мм	A_α , %	H , мм	ΔH , мм	A_α , %	ΔH , мм	A_α , %	H , мм	ΔH , мм	A_α , %	ΔH , мм	A_α , %	H , мм	ΔH , мм	A_α , %
20	0,6	3	20,5	0,5	2,5	2,6	13	22	2,0	10	6,6	33	26	6,0	30
50	1,5	3	51,0	1,0	2,6	6,6	13	55	5,0	10	16,6	33	66	16,0	32
75	2,2	3	78,2	3,2	4,3	9,8	13	83	8,0	10,5	24,8	33	97	22,0	29

имеющем боковые отверстия диаметром 1,5 мм на глубине H , равной 20, 50 и 75 мм. Данные для автоматизированного контроля соответствуют уровню отсечки в приемном тракте, равному 0,8 ($\Delta\varphi \approx 3,2^\circ$) и 0,3 ($\Delta\varphi = 6,5^\circ$).

Из табл. 26 видно, что погрешность селектирования и измерения глубины расположения дефекта при автоматизированном контроле с помощью известной аппаратуры может достигать весьма существенной величины: (10—15%) при относительном уровне отсечки 0,8 и (30—33%) при относительном уровне отсечки 0,3. Относительный уровень отсечки зависит от амплитуды сигнала. В связи с тем, что максимальная амплитуда эхо-сигнала определяется размерами, формой, ориентацией и глубиной расположения дефекта, погрешность измерения глубины при автоматизированном контроле является величиной случайной, лежащей в пределах от 0 до $\sigma_{\Delta_{1m}}$. Среднеквадратическая ошибка измерений составляет приблизительно одну треть максимальной и, следовательно, в рассматриваемом случае может достигать 10%.

Повышение точности селектирования эхо-сигналов и измерения координат должно вестись, прежде всего, в направлении создания систем с улучшенной пеленгационной характеристикой. Под пеленгационной характеристикой дефектоскопа при автоматизированном контроле условимся понимать зависимость напряжения на входе регистрирующего устройства от пеленга α .

Возможная ошибка пеленга при использовании существующей аппаратуры зависит от точности определения максимума эхо-сигнала и от кривизны пеленгационной характеристики по направлению максимума (см. § 6 гл. VI). Учитывая соотношение (151), пеленгационная ошибка применяемого метода максимума $\Delta\alpha_m$ при озвучивании отражателя с круговой индикатрисой рассеяния равна

$$\Delta\alpha_m \approx \sqrt{\frac{2 \frac{\Delta U}{U(\alpha_0)}}{\frac{\partial^2 U(\alpha_0)}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{1}{U(\alpha_0)}}} = \sqrt{\frac{2 \frac{\Delta U}{U(\alpha_0)}}{P_m}}, \quad (266)$$

где $\frac{\partial^2 U(\alpha_0)}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{1}{U(\alpha_0)} = P_m$ — пеленгационная способность дефектоскопа при работе по методу максимума.

При постоянной точности определения максимума эхо-сигнала погрешность пеленгации падает с увеличением пеленгационной способности.

Пеленгационная способность дефектоскопа может быть повышена за счет устройства радиотехнического обострения диаграммы направленности искателя. При введении данного устройства измерение координат будет выполняться уже не по методу максимума, а по методу, несколько напоминающему собой метод равноточной зоны, используемый в радиолокации. Действительно, в этом случае пеленг дефекта определяется значением угла α_n , при котором напряжение огибающей пачки эхо-сигналов от дефекта становится равным напряжению аналога модуля производной от этой огибающей. При этом напряжения сравниваются амплитудным компаратором, расположенным на выходе приемного тракта дефектоскопа. Тогда пеленгационная характеристика $U_z(\alpha)$ дефектоскопа с устройством радиотехнического обострения диаграммы направленности будет описываться выражением

$$U_z(\alpha) = K [QU(\alpha) - \Delta U] - \xi KQ \left| \frac{\partial U(\alpha)}{\partial \alpha} \right|, \quad (267)$$

где первый член соответствует напряжению огибающей, а второй — напряжению аналога производной на входе компаратора.

Равенством этих напряжений, т. е. $U_z(\alpha) = 0$, определяется пеленг α_n дефекта.

Условие $U_z(\alpha) = 0$ выполняется при двух значениях аргумента: α_n^I и α_n^{II} , где $\alpha_n^I < \alpha_0$, а $\alpha_n^{II} > \alpha_0$. Физический смысл будет иметь лишь одно из этих значений в зависимости от направления движения искателя, при котором производится отсчет координат. При движении искателя вперед пеленг отражателя определяется значением α_n^{II} .

Срабатывание компаратора при автоматизированном контроле будет происходить при значении $U_z(\alpha)$, отличном от нуля. Допустим, что зона нечувствительности компаратора лежит в пределах $\pm \Delta U_k$. Это значит, что пеленг отражателя будет измерен с некоторой погрешностью $|\Delta \alpha_p|$. Для определения величины $\Delta \alpha_p$ разложим функцию $U_z(\alpha)$ в ряд Тейлора, ограничившись, ввиду малости величины $\Delta \alpha$, первыми двумя членами:

$$\Delta U_z = \pm KQ \left[\left| \frac{\partial U(\alpha)}{\partial \alpha} \right| - \xi \left| \frac{\partial^2 U(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right| \right] \Delta \alpha. \quad (268)$$

Здесь ΔU_z принимают с плюсом для $\alpha < \alpha_0$ и с минусом для $\alpha > \alpha_0$. Положив $\Delta U_z = \Delta U_k$ и разделив обе части равенства (268) на $U(\alpha_n)$, определим пеленгационную ошибку $\Delta \alpha_p$ и пеленгационную способность P_p :

$$\Delta \alpha_p = \frac{\Delta U_k}{KQU(\alpha_n)}; \quad (269)$$

$$P_p = \frac{\left| \frac{\partial U(\alpha_n)}{\partial \alpha} \right|}{U(\alpha_n)} - \xi \frac{\left| \frac{\partial^2 U(\alpha_n)}{\partial \alpha^2} \right|}{U(\alpha_n)}. \quad (270)$$

Произведение $KQU(\alpha_n)$ в выражении (269) представляет собой амплитуду эхо-сигнала на входе компаратора и в ламповых схемах составляет 10—30 в. Величина $|\Delta U_k|$, характеризующая зону нечувствительности компаратора, определяется его схемой и при таких величинах сравниваемых напряжений не превышает 0,5 в. [17]. Тогда

$$\frac{\Delta U_k}{KQU(\alpha_n)} \approx 0,015 \div 0,05. \quad (271)$$

Учитывая, что при озвучивании дефекта расстояние r от точки ввода луча до отражающей поверхности меняется в незначительных пределах, в выражении (126) для $U(\alpha)$ можно принять $\exp(-2\delta r) \approx 1$ и

$$\frac{1}{r^n(\alpha_n)} \approx \frac{1}{r^n(\alpha_0)} \approx \frac{1}{(H/\cos \alpha_0)^2},$$

что допустимо при $|\alpha_n - \alpha_0| \ll \alpha_0$.

Тогда, после аппроксимации в выражении (126) функции $\Phi(\alpha)$ равенством (124), легко получить выражения для членов, входящих в уравнение (270). Эти выражения содержат множитель $\lg \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_n - \alpha_0) \right]$.

В связи с тем, что при $V = \text{const}$ угол α меняется во времени неравномерно, значение α_n следует определять из уравнения (252). После преобразований находим

$$\lg \left[\frac{\pi}{5\varphi_0} (\alpha_n - \alpha_0) \right] \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\delta \varphi_0}{\pi} \cdot \frac{H}{V} \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha_0}. \quad (272)$$

С учетом изложенного выражение для максимальной пеленгационной ошибки при использовании устройства радиотехнического обострения диаграммы направленности примет вид

$$|\Delta\alpha_p| \approx \frac{0,015 \div 0,05}{2 \lg \alpha_0 - 2 \frac{V}{H} \left(\frac{\pi \cos \alpha_0}{5\varphi_0} \right)^2 - 0,5 \frac{1}{\xi} \cdot \frac{H}{V} \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha_0}} \quad (273)$$

Из выражений (272) и (273) видно, что ошибка пеленга дефекта определяется шириной диаграммы φ_0 направленности и коэффициентом усиления ξ нормирующего усилителя. Кроме того, пеленгационная ошибка зависит от скорости сканирования V и глубины H расположения отражателя: она тем меньше, чем уже диаграмма направленности, больше коэффициент усиления и скорость сканирования и чем меньше глубина расположения отражателя.

Для типового искателя ($\alpha_0 = 50^\circ$, $\varphi_0 = 3,5^\circ$), глубины расположения дефекта $H = 100$ мм и параметров аппаратуры $V = 50$ мм/сек и $\xi = 0,5$ пеленгационная ошибка не превышает $0,003$ рад, а погрешность измерения глубины — $0,6$ мм.

Недостатком метода радиотехнического обострения диаграммы направленности является то, что величина пеленгационной ошибки зависит от скорости сканирования V . При значениях V , близких к нулю, способ радиотехнического обострения диаграммы направленности не реализуем, а приведенные выражения теряют физический смысл.

Этого недостатка лишен метод сравнения [89], [92].

Сущность метода сравнения состоит в получении от отражающей поверхности двух эхо-сигналов, соответствующих озвучиванию ее под различными углами с помощью искателя с двумя пьезопреобразователями, и сравнении соответствующих амплитуд сигналов. Принцип работы устройства, реализующего указанный способ, показан на рис. 218.

С точки зрения повышения пеленгационной чувствительности целесообразно производить измерения в области направления, по которому крутизна характеристики направленности искателя имеет максимальное значение.

Способ в контактном варианте может быть осуществлен, если применять искатель с преобразователями

в виде кольца и диска, расположенных эксцентрично и под определенными углами β_1 и β_2 . Расчет параметров искателя сводится к определению таких значений β_1 , β_2 и диаграмм направленности $\Phi_1(\beta_1)$ и $\Phi_2(\beta_2)$ по заданному направлению пеленгования α_0 , $= F(\beta_0)$, при которых эхосигналы, регистрируемые обоими преобразователями по направлению α_0 , равны [92].

Пеленгационная ошибка способа сравнения $(\Delta\alpha) < 0,007$ рад и не зависит от скорости сканирования.

Имея способы пеленгации дефектов при механизированном сканировании со столь высокой точностью, превышающей соответствующую точность при ручном контроле, не представляет технических трудностей осуществить автоматическое временное селектирование эхосигналов и измерение координат с погрешностями, не превышающими соответствующих погрешностей при ручном контроле.

Для селектирования полезных эхосигналов из совокупности ложных необходимо ввести в установку для автоматизированного контроля дополнительные генераторы стробирующих импульсов и каскад совпадений, на вход которого, как и обычного, будут подаваться стробирующие импульсы, а на второй — импульсы с выхода компаратора или с выхода схемы сравнения.

Автоматическое измерение координат при механизированном контроле может быть реализовано, например, по принципу, используемому для определения координат с помощью стрелочного прибора при ручном контроле (см. § 3 гл. III). Естественно, что процесс измерения должен быть произведен в момент, когда искатель находится в положении, при котором дефект озвучивается под углом α_0 . При таком положении искателя на выходе устройства радиотехнического обострения или устройства сравнения возникает импульс.

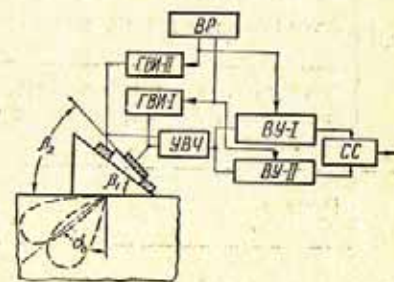


Рис. 218. Функциональная схема дефектоскопа, работающего по способу сравнения:

ГВИ — генератор высокочастотных импульсов; ВР — временной распределитель; ВУ — видеоусилитель; СС — схема сравнения; УВЧ — усилитель высокой частоты.

Таблица 27

Экспериментальные данные измерения глубины H расположения цилиндрического отражателя

H , мм	Вид контроля	$H_{\text{ср}}$, мм	Средне-квадратическая ошибка, мм
20	Ручной	21,66	0,523
	Автоматизированный, типовая аппаратура	18—24	
	Автоматизированный с устройством радиотехнического обострения диаграммы направленности	20,30	0,955
50	Ручной	51,43	0,495
	Автоматизированный, типовая аппаратура	46—56	
	Автоматизированный с устройством радиотехнического обострения диаграммы направленности	51,83	0,449
75	Ручной	75,43	0,753
	Автоматизированный, типовая аппаратура	71—85	
	Автоматизированный с устройством радиотехнического обострения диаграммы направленности	74,96	0,443

Примечание. Величина $H_{\text{ср}}$ взята на основании 20 измерений.

Этот импульс может быть использован для управления системой селекции I (рис. 219, а), пропускающей через себя на устройство II измерения глубины зондирующий и эхо-импульсы (рис. 219, б), следующие за импульсом компаратора (или устройства сравнения).

Полученные выводы проверяли на установке (рис. 219), к выходу которой был подключен измеритель коор-

динат со стрелочным прибором. С помощью установки измеряли глубину расположения цилиндрических отверстий в стальном образце при сканировании наклонным искателем с углом $\alpha_0 = 50^\circ$ вручную и при механизированном сканировании как при включенной, так и при выключенной системе радиотехнического обострения диаграммы направленности. Точность отсчета глубины по стрелочному прибору составляла 0,5 мм. Результаты исследований

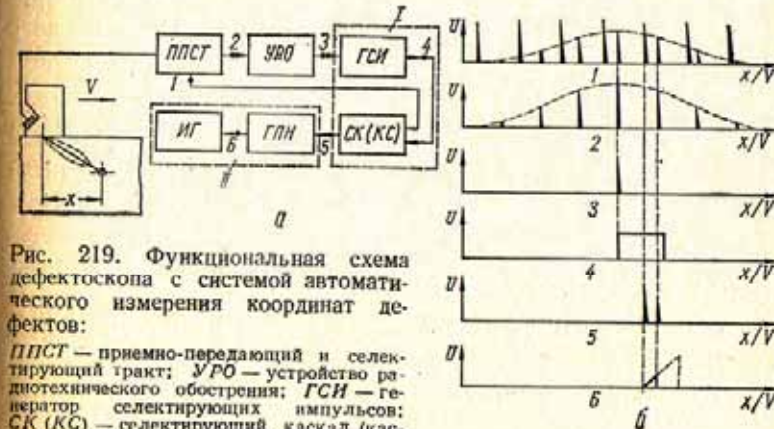


Рис. 219. Функциональная схема дефектоскопа с системой автоматического измерения координат дефектов:

ППСТ — приемно-передающий и селектирующий тракт; УРО — устройство радиотехнического обострения; ГСИ — генератор селектирующих импульсов; СК(КС) — селектирующий каскад (каскад совпадений); ГПН — генератор пилообразного напряжения; ИГ — измеритель глубины.

представлены в табл. 27. Из приведенных данных видно, что предложенный способ автоматического измерения координат обладает точностью, соответствующей точности ручного контроля.

4. СКОРОСТЬ СКАНИРОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

Выходным устройством дефектоскопа для автоматизированного контроля является регистратор того или иного типа. Для уменьшения чувствительности дефектоскопа к помехам необходимо, чтобы регистратор срабатывал лишь после приема определенного наперед заданного количества N сигналов об обнаружении дефекта. Для этого в регистраторе должно быть предусмотрено

устройство, обеспечивающее срабатывание регистратора (индикатора) только после поступления N -го сигнала. Таким образом число N характеризует количественно инерционность регистратора (см. § 2 гл. III), причем инерционность, некритичную к амплитуде сигналов.

Независимо от схемы построения регистратора скорость сканирования V не должна превышать величины, при которой за время озвучивания дефектов, подлежащих выявлению, на регистратор поступит не менее N сигналов от каждого дефекта. Путь искателя, в течение которого воспринимаются эхо-сигналы от дефекта, равен его условной ширине Δx . Максимальная скорость сканирования, обеспечивающая прием N сигналов от любого дефекта,

$$V_{\max} = \frac{\Delta x}{t} = \frac{\Delta x}{\frac{1}{F} N} = \frac{F}{N} \Delta x, \quad (274)$$

где Δx — условная ширина дефекта, измеряемая длиной зоны перемещения искателя со скоростью $V \ll V_{\max}$, в которой регистрируется дефект; t — время прохождения приемно-излучающим элементом расстояния Δx ; F — частота следования зондирующих импульсов; $\frac{1}{F}$ — промежуток времени между двумя любыми эхо-сигналами; $\frac{1}{F} N$ — время, необходимое для приема N сигналов.

В связи с этим при скорости сканирования V , близкой к $V_{\max}$, выявляемость дефектов обуславливается прежде всего их условной шириной. При установленных значениях скорости сканирования V , частоте посылки ультразвуковых импульсов F и инерционности индикатора N дефекты, условная ширина которых меньше

$$\Delta x_{\min} = \frac{N}{F} V, \quad (275)$$

регистрироваться не будут.

Если в дефектоскопе отсутствует система автоматической регулировки усиления, то условная ширина дефекта при прочих равных условиях будет тем больше, чем выше условная чувствительность дефектоскопа и чем больше эквивалентная площадь дефекта (см. § 4 гл. VII). Поэтому условие (275) означает, что с возрастанием скорости сканирования падает предельная чувствительность контроля.

Экспериментально значение Δx условной ширины может быть определено как усредненное значение многократных и тщательных лабораторных измерений, выполненных при весьма малой скорости сканирования и высокой стабильности акустического контакта. В практике дефектоскопии измеренные значения условной ширины, вследствие флуктуаций акустического контакта, могут быть существенно меньше величины Δx . Вероятность того, что условная ширина дефектов при автоматизированном контроле окажется равной Δx всегда меньше единицы,

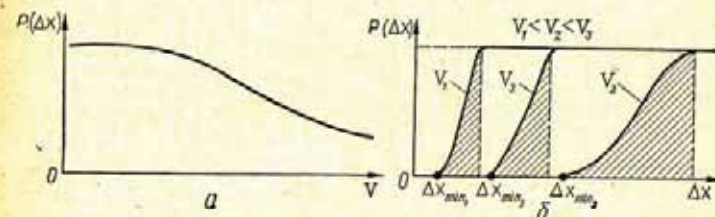


Рис. 220. К зависимости выявляемости дефектов от скорости сканирования.

т. е. $P(\Delta x) < 1$. Вероятность $P(\Delta x)$ тем меньше, чем больше флуктуации акустического контакта, т. е., чем выше скорость сканирования V (рис. 220, а).

Таким образом, увеличение скорости сканирования сопровождается как снижением чувствительности контроля, так и ухудшением надежности выявления дефектов, условная ширина которых незначительно превышает соответствующее значение $\Delta x_{\min}$ (рис. 220, б).

Предположив, что флуктуации акустического контакта отсутствуют, рассмотрим изменения предельной чувствительности S контроля, обуславливаемые увеличением скорости сканирования V .

Пусть аппаратура настроена при скорости сканирования $V \approx 0$ по отражателям на глубине $H = 75$ на предельную чувствительность S_1 таким образом, что эхо-сигналы начинают поступать на индикатор при их амплитуде на входе приемного тракта, равной 0,75 своего максимального значения ($A_0 = 0,75$). Огибающая последовательности эхо-сигналов во времени t сканирования отражателя S_1 при различных скоростях сканирования показана на рис. 221. На этом же рисунке приведены огибающие для

аналогичных отражателей площадью S_2 и S_3 , большей S_1 , расположенных на той же глубине. Расчеты огибающих выполнены в предположении, что отражатели имеют индикатрису, близкую к круговой, и затухание ультразвука на пути до отражателя весьма мало ($\delta H \approx 0$); при расчетах принято $af = 15 \text{ ммМгц}$, $\alpha_0 = 65^\circ$, $S_3 = 3S_1$, $S_2 = 2S_1$, $V_3 = 3V_1$ и $V_2 = 2V_1$.

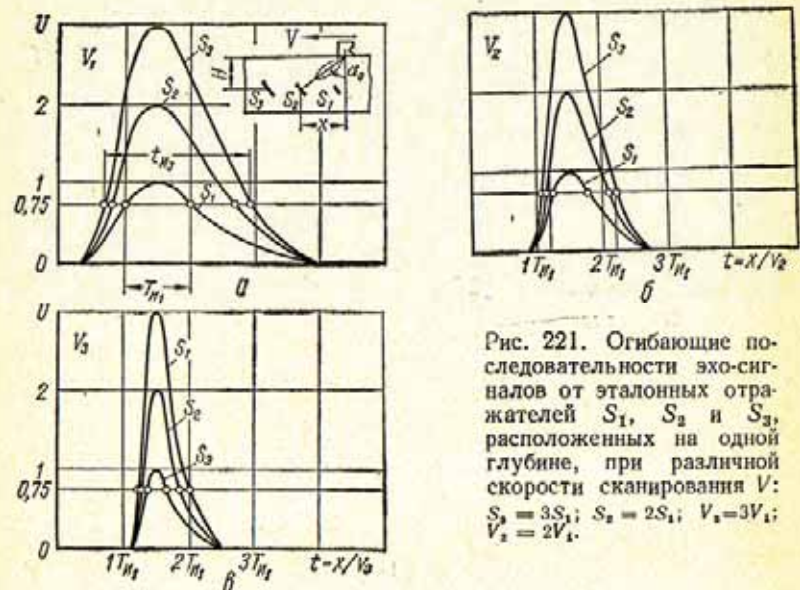


Рис. 221. Огибающие последовательности эхо-сигналов от эталонных отражателей S_1 , S_2 и S_3 , расположенных на одной глубине, при различной скорости сканирования V : $S_3 = 3S_1$; $S_2 = 2S_1$; $V_3 = 3V_1$; $V_2 = 2V_1$.

По мере увеличения скорости сканирования V время t_n , в течение которого на регистратор поступают эхо-сигналы от отражателя ($t_n = \frac{\Delta x}{V}$), сокращается. При этом будут регистрироваться все дефекты, для которых еще выполняется неравенство

$$t_n = \frac{\Delta x}{V} \geq \frac{N_0}{F_0} = T_n, \quad (276)$$

где T_n — инерционность индикатора.

Если принять $T_n = T_{n1}$, то при скорости $V \leq V_1$ автомат будут зафиксированы все три рассматриваемых отражателя (рис. 221, а). Скорость V_1 является максимальной, при которой еще может быть выявлен отражатель S_1 . Это значит, что скорости V_1 соответствует предельная чувст-

вительность S_1 (на глубине $H = 75 \text{ мм}$). При скорости $V_2 = 2V_1$ из трех отражателей будет зарегистрирован лишь отражатель S_3 (рис. 221, б), а при скорости $V_3 = 3V_1$ автомат не выявит ни один из рассматриваемых отражателей (рис. 221, в). Имея огибающие последовательности эхо-сигналов во времени сканирования t и зная инерционность индикатора T_n , легко графоаналитически рассчитать снижение чувствительности с увеличением скорости сканирования V . Для удобства расчета при построении огибающих по оси ординат следует откладывать относительную величину U/U_m , а по оси абсцисс — обобщенный параметр

$$\frac{t}{T_n} = \frac{x/V}{N/F}.$$

Результаты графоаналитического расчета изменения предельной чувствительности, характеризованного отношением S/S_1 , где S_1 — предельная чувствительность при $V = V_1$ и $T_n = T_{n1}$, отображены графически на рис. 222 для $A_0 = 0,75$ и регистраторов с различной инерционностью: $0,25T_{n1}$, $0,5T_{n1}$, T_{n1} и $2T_{n1}$.

Из рисунка видно, что увеличение скорости сканирования даже при отсутствии флуктуаций акустического контакта может привести к весьма значительной потере чувствительности контроля.

Ослабление чувствительности определяется произведением инерционности регистратора T_n на скорость сканирования V . Одинаковая чувствительность при механизированном контроле с помощью различных установок, настроенных на одну и ту же условную или предельную чувствительность по эталону № 1 или тест-образцу может быть достигнута, если соблюдается равенство параметров.

$$T_{n1}V_1 = T_{n2}V_2 = \dots = T_{nn}V_n.$$

Произведение $T_n V$ является весьма важным параметром аппаратуры автоматизированного контроля, имеет размерность мм и определяет минимальную величину

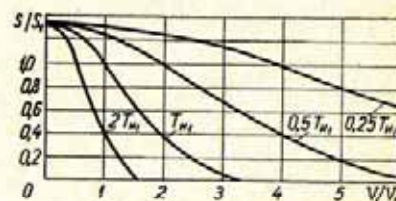


Рис. 222. Зависимости изменения предельной чувствительности S от скорости сканирования V при различной инерционности T_n регистратора.

условной ширины дефектов, которые могут быть выявлены этой аппаратурой.

Ослабление чувствительности при одной и той же величине параметра $T_H V$ может определяться также и глубиной H расположения отражателя. Обусловлено это зависимостью

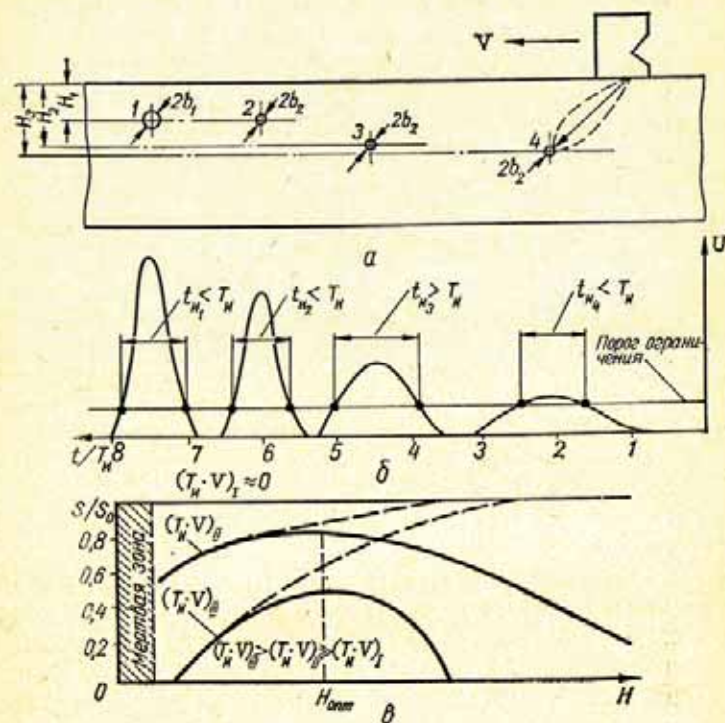


Рис. 223. К зависимости предельной чувствительности контроля при скоростном сканировании от глубины расположения отражателя (дефекта).

условной ширины дефекта от глубины его залегания (см. гл. VII). На рис. 223 показана связь ослабления предельной чувствительности, вызываемого увеличением скорости сканирования, с глубиной H расположения дефекта. На рис. 223, а изображен контролируемый объект, содержащий четыре дефекта диаметром b_1 и b_2 ($b_1 > b_2$), а на рис. 223, б — огибающие последовательности эхо-сигналов во времени сканирования t . Из рис. 223, б видно, что при установленном соотношении скорости V и инерцион-

ности регистратора T_H будет выявлен лишь дефект 3, поскольку только для этого дефекта выполняется неравенство (276).

В то же время при ручном контроле были бы выявлены все четыре дефекта, причем наиболее устойчиво выявлялся бы дефект 1, а не 3.

Очевидно, что для выявления дефекта 1, несмотря на его большие размеры и меньшую глубину расположения по сравнению с дефектом 3, необходимо увеличить условную чувствительность дефектоскопа на время поступления эхо-сигналов от этого дефекта. То же самое необходимо сделать и для обнаружения дефектов 2 и 4.

Введение в дефектоскоп временной регулировки чувствительности (ВРЧ) обеспечило бы только возможность обнаружения дефекта 4, но не 1 и 2.

Ослабление чувствительности контроля S , вызванное увеличением скорости сканирования, по сравнению с чувствительностью S_0 при ручном контроле ($V \approx 0$), в зависимости от глубины H расположения дефекта показано на рис. 223, б. При этом S и S_0 — предельные чувствительности для одной и той же глубины H при скоростном и ручном сканировании соответственно. Пунктирные линии относятся к случаю, когда в аппаратуре имеется система ВРЧ, а сплошные — когда отсутствует.

Из рис. 223, б следует, что при отсутствии ВРЧ при автоматизированном контроле лучше будут выявляться дефекты, расположенные на некоторой глубине H_{opt} . Дефекты, расположенные на глубине $H < H_{opt}$, будут выявляться значительно хуже и могут быть пропущены как при отсутствии, так и при наличии ВРЧ. Это явление до настоящего времени не учитывалось при разработке установок для автоматизированного контроля.

Для выравнивания чувствительности по глубине при скоростном контроле в аппаратуру следует ввести новую систему временной регулировки чувствительности. Чтобы отличать эту систему временной регулировки от широко применяемой системы ВРЧ будем обозначать ее ВРЧ-А.

Системы ВРЧ построены так, чтобы максимальная амплитуда эхо-сигнала на выходе дефектоскопа от одного и того же дефекта оставалась постоянной при изменении глубины расположения дефекта.

Система ВРЧ-А должна обеспечивать выявление одного и того же дефекта независимо от глубины его расположения при скорости $V \gg 0$. Введение

системы ВРЧ-А существенно повысит надежность механизированного и автоматизированного ультразвукового контроля.

Шаг сканирования выбирают из расчета надежного выявления всех недопустимых дефектов в сварном соединении. Величина шага сканирования равна эффективному диаметру ультразвукового пучка. Эффективный диаметр ультразвукового пучка определяется требованиями к постоянству чувствительности, величиной контролируемого слоя в направлении луча и расстоянием его от излучателя. Если предположить, что величина контролируемого слоя, расположенного на глубине h , весьма мала (например, стык контактной сварки) и слой расположен в дальней зоне излучателя, то эффективный диаметр

$$D_s \approx 2r \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (277)$$

где r — расстояние контролируемого слоя от излучателя; φ_1 — угол раскрытия ультразвукового луча, соответствующий некоторому наперед заданному уменьшению C амплитуды эхо-сигнала по сравнению с максимальным значением.

Учитывая, что $\varphi_1 > 9^\circ$ ($\operatorname{tg} \varphi_1 \approx \varphi_1$) и $r = h / \cos \alpha_0$, получаем

$$D_s \approx 2 \frac{h}{\cos \alpha_0} \varphi_1. \quad (278)$$

При малых значениях угла φ_1 величину его можно определить по формуле

$$\varphi_1 \approx K \frac{\lambda_t}{a}, \quad (279)$$

где λ_t — длина поперечной волны; a — радиус преобразователя; K — коэффициент, зависящий от принятой величины C и определяемый из уравнения, описывающего диаграмму направленности поля излучателя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча.

Тогда, с учетом соотношения (279), выражение (278) примет вид

$$D_s = 2K \frac{h}{\cos \alpha_0} \frac{\lambda_t}{a}. \quad (280)$$

Для приближенной оценки значения K можно воспользоваться выражением (11), полагая, что $C = \Phi^2(\varphi_1)$. Так, например, если принять, что колебания чувствитель-

ности контроля стальных изделий в зависимости от положения дефекта в сечении луча не должны превышать 30% ($C = 70\%$), радиус излучателя $a = 6$ мм, частота ультразвуковых колебаний $2,5$ МГц, глубина расположения начала контролируемого слоя $h = 20$ мм и угол ввода луча $\alpha_0 = 65^\circ$, то величина эффективного диаметра луча составит приблизительно 4 мм.

5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

Сварное соединение по результатам контроля обычно оценивают как пригодное или как непригодное к эксплуатации в зависимости от наличия или отсутствия включений в шве; размера включений; характера включений; минимального расстояния $l_{\min}$ между отдельными включениями; числа включений на определенной длине шва.

При ультразвуковой дефектоскопии можно получить информацию (см. гл. VII):

- 1) о наличии или отсутствии дефектов в сварном соединении;
- 2) о координатах расположения дефекта;
- 3) об эквивалентных размерах дефекта по максимальной амплитуде эхо-сигнала от него;
- 4) о конфигурации и ориентации дефекта по его индикатору рассеяния (или условной высоте и ширине);
- 5) об условной протяженности дефекта;
- 6) о расстоянии между дефектами;
- 7) о количестве дефектов на определенной длине шва;
- 8) о среде, заполняющей дефект, по фазе отраженного сигнала.

Однако этой информации не всегда оказывается достаточно для отнесения шва к пригодному или непригодному.

Таким образом, при оценке качества шва по данным ультразвукового контроля возможны следующие выводы:

- 1) шов пригоден к эксплуатации («пригоден»);
- 2) шов не пригоден к эксплуатации («брак»);
- 3) качество шва сомнительное («неопределенность»).

Для автоматической оценки качества проконтролированного соединения предусматривается дешифратор. По существу дешифратор является счетно-решающим устройством,

Таблица 28

Данные для программирования работы дешифратора дефектоскопа при ультразвуковом контроле некоторых сварных соединений

Тип сварного соединения	Состояние шва по результатам ультразвукового контроля (ультразвукограмма)	Качество шва по документу дешифратора		
		«Пригоден»	«Брак»	«Неопределенность»
Стыковой шов I категории пролетного строения железнодорожного моста	Включений нет	×		
	Включение протяженностью более 0,04δ + 5 мм		×	
	Четыре и более включений любой величины на 1 м шва		×	
	Два любых включения при расстоянии менее 45 мм между ними		×	
	Включения величиной менее 0,04δ + 5 мм каждое, при расстоянии более 45 мм между любыми двумя включениями и общем числе их менее четырех на 1 м шва			×
Стык электроконтактной или газопрессовой сварки рельса	Дефектов нет	×		
	Один или несколько дефектов любой величины в любом месте шва		×	
Стыковые швы цилиндрической части паровозных котлов	Включений нет	×		
	Включение протяженностью более 5 мм		×	
	Включения любой протяженности при расстоянии между ними менее 50 мм		×	

Продолжение табл. 28

Тип сварного соединения	Состояние шва по результатам ультразвукового контроля (ультразвукограмма)	Качество шва по документу дешифратора		
		«Пригоден»	«Брак»	«Неопределенность»
Стыковые швы цилиндрической части паровозных котлов	Включения любой протяженности при числе более семи на 1 м шва		×	
	Включения протяженностью менее 5 мм каждое при расстоянии между двумя любыми включениями более 50 мм и при общем числе их менее семи на 1 м шва	×		

Примечание. δ — толщина шва.

программированным в соответствии с техническими условиями на качество сварки, в которое непрерывно при контроле вводятся данные прозвучивания. Очевидно, что на выходе дешифратора в результате решения должен быть получен документ с одной из следующих характеристик качества шва: пригоден; брак; неопределенность.

В табл. 28 приведены примеры программ, которые могут быть положены в основу работы дешифратора при контроле некоторых сварных соединений.

Из перечисленной выше информации в известной аппаратуре используется информация 1, 2, 3, 5, 6 и 7.

При этом наличие дефекта в шве, его координаты, эквивалентные размеры, протяженность и расстояние до ближайшего дефекта выражаются на выходе приемно-сигнализирующего устройства соответственно появлением пачек эхо-сигналов, интервалом времени между зондирующим импульсом и эхо-сигналом максимальной амплитуды, величиной этой амплитуды, временем поступления пачек эхо-сигналов от одного и того же дефекта и интервалом времени между эхо-сигналами от выявляемого и предшествующего дефектов. Поэтому работа дешифратора может быть основана на измерении амплитуды U_r

эхо-сигналов, времени t_n поступления пачек эхо-сигналов от каждого включения, интервала времени T_n между окончанием обнаружения эхо-сигналов от предыдущего включения и началом поступления эхо-сигналов от последующего включения, числа n сигналов от отдельных включений, пришедших за время T_n контроля определенной длины шва, и последующем сравнении каждой из четырех измеренных величин с заданными и введенными в дешифратор.

Если хотя бы одна из измеренных величин U_T , t_n , $\frac{1}{T_n}$, n окажется равной или большей, чем величины U'_T , t'_n , $\frac{1}{T'_n}$, n' , предусмотренные программой, то на выходе дешифратора должен появиться сигнал «Брак». Если эти величины будут меньше заданных, то дешифратор выдаст сигнал «Неопределенность». Только в случае отсутствия включений дешифратор не фиксирует показаний «Брак» и «Неопределенность», что будет свидетельствовать о хорошем качестве шва.

Сравнение амплитуд U_T и U'_T выполняется амплитудным селектором, часто совмещаемым с приемно-сигнализирующим устройством. Функции сравнения остальных величин обычно передаются дешифратору.

На рис. 224 в качестве примера приведена элементарная функциональная схема дешифратора. В этой схеме интегратор суммирует время поступления эхо-импульсов от одного и того же дефекта в процессе перемещения искательного устройства вдоль шва. Это время пропорционально протяженности дефекта. Канал I сравнивает длительность t_n сигнала на выходе интегратора с заданной t'_n , т. е. протяженность выявленных включений с заданной допустимой протяженностью. Если $t_n \geq t'_n$, то на выходе канала I появляется сигнал, запускающий каскад выдачи сигнала «Брак».

Канал II измеряет интервал T_n между сигналами на выходе интегратора, т. е. расстояние между включениями, и сравнивает интервал T_n с заданной допустимой величиной T'_n . При $T_n \leq T'_n$ на выходе канала II появляется сигнал запуска каскада выдачи сигнала «Брак».

Канал III подсчитывает число n сигналов, появившихся от отдельных дефектов на выходе интегратора за время T_k , т. е. за время контроля определенной длины шва. Если подсчитанное число n окажется равным или больше

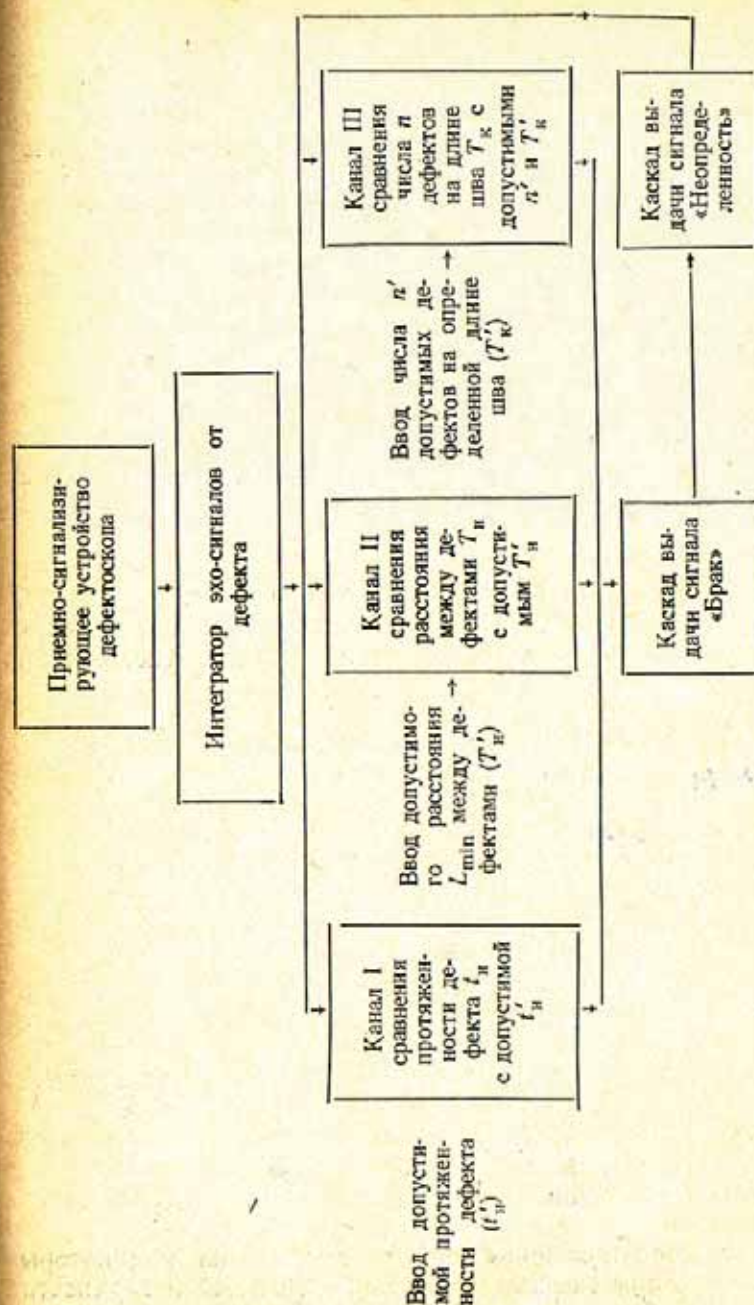


Рис. 224. Функциональная схема дешифратора.

заданной допустимой величины n' , то сигнал с выхода канала III вызывает срабатывание каскада выдачи информации «Брак».

Каждый сигнал с выхода интегратора запускает каскад выдачи сигнала «Неопределенность», что свидетельствует об обнаружении какого-то включения в шве. Если же обнаруженное включение окажется недопустимым, то появится сигнал «Брак». При этом сигнал «Неопределенность» будет сброшен импульсом, поступившим с каскада выдачи сигнала «Брак».

Глава XII

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Возможности автоматического ультразвукового контроля, характер получаемого при этом документа, а также принцип построения системы контроля во многом определяется методом сканирования сварного соединения.

1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСКАТЕЛЯ

Метод продольного перемещения искателя целесообразно использовать для контроля качества сварных швов небольшой толщины и угловых швов в соединениях длиной более 300—500 мм.

Для одновременного прозвучивания нескольких зон шва, например, верхней и нижней половин стыкового соединения, в ряде случаев необходимо применять несколько искателей, размещенных в общем устройстве. Чтобы устранить возможность регистрации одним из искателей ультразвуковых импульсов, излучаемых другим искателем, в аппаратуре должна быть обеспечена частотная селекция или поочередная работа искателей (каналов).

Для предотвращения проникновения на индикаторы и регистраторы эхо-импульсов от неровностей поверхности

шва в каждом канале должна осуществляться селекция. Результаты контроля целесообразно регистрировать на ленте 3 (рис. 225), отмечая показания каждого канала в отдельности. При такой системе регистрации можно судить о глубине расположения выявленного включения. Так, например, регистрация дефекта пером 1 канала ближней зоны в шве при контроле стыкового соединения свидетельствует о расположении дефекта в верхней части его. Если дефект расположен в нижней части шва, то он будет отмечен пером 2 дальней зоны. Регистрация одного и того же дефекта перьями обоих каналов возможна только при залегании включения в середине шва.

Расстояние L между перьями должно соответствовать расстоянию l между пьезоэлементами искательной системы, т. е. $L = Ml$, где M — масштаб регистрации ультразвукограммы.

Возможная функциональная схема ультразвуковой двухканальной установки для контроля швов методом продольного перемещения искателя приведена на рис. 225. Схемой предусматривается косвенный контроль за акустическим контактом, например, по уровню заполнения ванны контактирующей жидкостью.

Прозвучивание стыковых соединений обеспечивается перемещением вдоль шва искательного устройства с рядом приемно-излучающих пьезоэлектрических пластин. Для выявления дефектов, различным образом ориентированных в шве, искательному устройству придается вращательное движение или некоторые искатели в устройстве разворачивают на $3—10^\circ$ по отношению к нормали к оси шва.

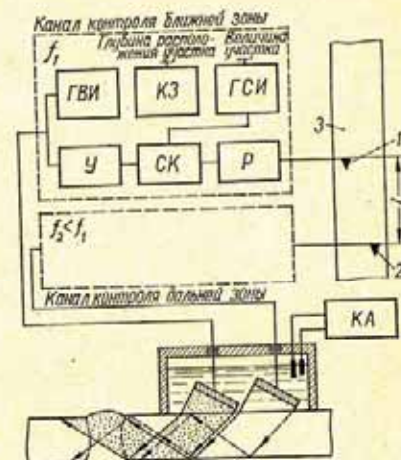


Рис. 225. Функциональная схема двухканального ультразвукового дефектоскопа для контроля качества стыковых швов методом продольного перемещения искателя:

ГВИ — генератор высокочастотных импульсов; КЗ — каскад задержки; ГСИ — генератор селективирующих импульсов; У — усилитель; СК — селектирующий каскад; Р — регистратор; КА — каскад контроля акустического контакта.

Угол ввода ультразвукового луча, количество, положение и размеры пьезоэлектрических пластин определяют толщину сварного соединения.

Диаграмму направленности поля искателей выбирают такой, чтобы обеспечивалась приблизительно одинаковая чувствительность к дефектам, расположенным на разной глубине.

В некоторых установках, особенно при контроле труб, для обеспечения надежного обнаружения дефектов различной ориентации и характера применяют эхо-теневой метод четырехканального прозвучивания сварного шва

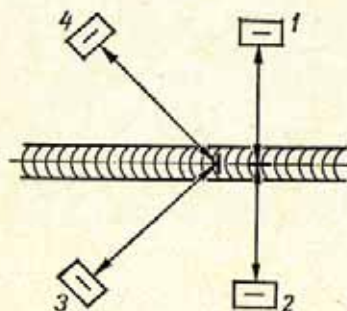


Рис. 226. Схема прозвучивания сварного шва:

1, 2 — искатели обнаружения продольных дефектов; 3, 4 — искатели обнаружения поперечных дефектов.

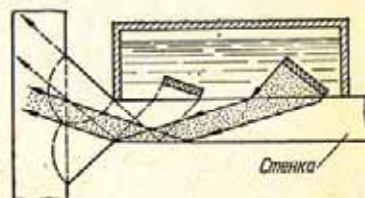


Рис. 227. Схема прозвучивания углового шва.

(рис. 226). Дефекты с продольной и поперечной ориентацией выявляются с одинаковой чувствительностью благодаря наличию двух пар искателей: для продольных и поперечных дефектов [4].

Прозвучивание угловых швов небольшой толщины осуществляется с помощью двух приемно-излучающих пластин. Одна из этих пластин предназначена для выявления несплошности и других дефектов в корне шва, а вторая — дефектов, расположенных в остальной части шва (рис. 227). Диаметр пьезоэлектрических пластин в этом случае зависит от толщины примыкаемого листа (стенки) и величины катетов шва.

Для контроля швов малой ширины и протяженности, но большой высоты, например, рельсовых стыков, выполненных электроконтактной сваркой, более удобно применять метод поперечного перемещения искателя.

Прозвучивание больших сварных сечений осуществляется составным вибратором или несколькими составными

вибраторами, расположенными на различных поверхностях соединения.

Документ, регистрирующий результаты контроля, характеризует лишь наличие или отсутствие дефектов в проверенном шве.

Аппаратура для контроля швов методом продольного перемещения искателя. Метод продольного перемещения искателя весьма широко применяется при контроле качества сварки труб в стационарных условиях [6, 4, 7, 133, 85].

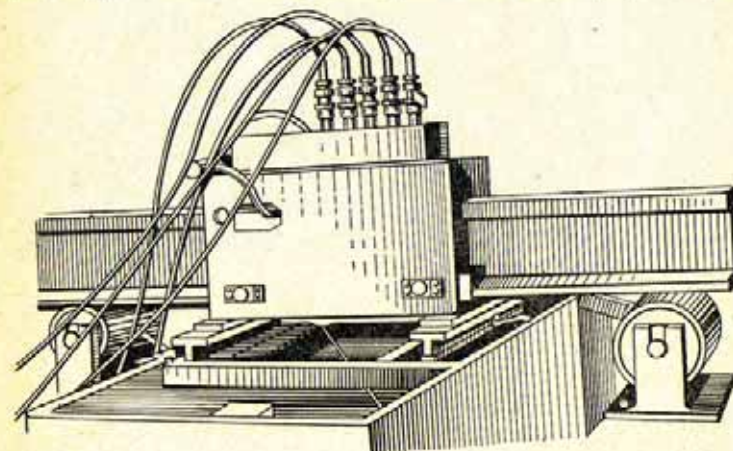


Рис. 228. Искательная система макета установки УРДА-1 (НИИМ).

Передвижная установка для автоматического контроля швов листов описывается в работе [32]. Шов прозвучивается двумя искателями, расположенными в локальных ваннах (см. рис. 225). Ванны, установленные в общий кожух, перемещаются вдоль шва с помощью специальной каретки, которая движется на электромагнитных колесах. На каретке размещаются кассеты с электротермической бумагой, которая «разворачивается» при контроле вдоль шва. Дефекты фиксируются на ней черными линиями. Установка представляет собой двухканальный дефектоскоп с рабочими частотами 1,8 и 2,5 Мгц.

По ультразвукограмме, записанной на токочувствительной бумаге в масштабе 1 : 1, можно судить о протяженности дефектных участков и определить их местоположение в соединении.

Аппаратура для контроля швов методом поперечного перемещения искателя. Метод поперечного перемещения искателя в настоящее время используется в установках для контроля швов контактной сварки рельсов (рис. 228, 229) [91, 93, 181].

В процессе контроля рельс пропускают через систему, в которой размещены группы искателей, предназначенных для прозвучивания головки, шейки и подошвы рельса. На лицевой панели индикаторного блока имеются динамик

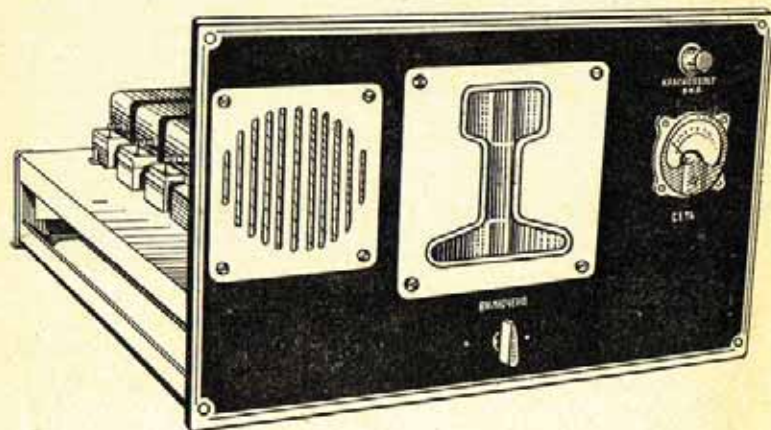


Рис. 229. Индикаторный блок макета установки УРДА-1 (НИИМ).

и табло, которые являются индикаторами обнаружения дефектов. При выявлении дефекта подается звуковой сигнал, а на табло освещается та часть сечения рельса (головка, шейка или подошва), в которой обнаружен дефект.

Акустический контакт осуществляется через воду, непрерывно подаваемую под искатели.

2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ Способом ~~методом~~ продольно-поперечного перемещения искателя

Способ ~~Метод~~ продольно-поперечного перемещения искателя обеспечивает наибольшие возможности в определении относительных размеров, координат залегания и конфигурации выявленных при контроле дефектов.

Его целесообразно использовать для контроля стыковых швов толщиной от 20 до 80 мм.

При толщинах менее 20 мм достаточно знать, в каком месте по длине шва и в какой его половине располагаются выявленные дефекты. Эти данные могут быть получены при контроле более простыми методами продольного перемещения искателя или бегающего луча.

Максимальная толщина металла, которая может быть проконтролирована ~~методом~~ продольно-поперечного перемещения искателя, ограничивается падением чувствительности вследствие увеличения пути прохождения ультразвуковых колебаний в металле. Кроме того, с увеличением толщины металла возрастают пределы перемещения искателя в направлении, перпендикулярном шву, что ведет к усложнению конструкции и увеличению размеров автомата. Контроль швов толщиной свыше 80 мм более целесообразно производить методом качающегося луча.

Сущность рассматриваемого метода заключается в следующем (рис. 230). Искателю, установленному в специальное приспособление, механизмом сообщается продольно-поперечное перемещение, при котором обеспечивается построчное прозвучивание контролируемого объема шва любой длины. С искателем связано устройство наблюдения с регистратором. Регистратор, управляемый индикатором приемно-сигнализирующего устройства, отмечает на ультразвукограмме I или III вида положения устройства наблюдения только в момент обнаружения дефектов. Таким образом, по наличию отметок и по их взаимному расположению можно судить о наличии дефектов, их местонахождении по длине шва и взаимном расположении в шве.

Размеры получаемой при этом ультразвукограммы соответствуют размерам проконтролированного участка.

Для предотвращения проникновения на индикатор эхо-импульсов от неровностей поверхности шва в приемно-сигнализирующем устройстве должна осуществляться селекция сигналов.

С целью получения ультразвукограмм II вида (изображение поперечного сечения шва) применяется индикатор типа В (см. разд. 2 гл. XI).

Для получения документа (ультразвукограммы II вида) с изображением поперечного сечения шва экран трубки автоматически фотографируется в момент обнаружения дефекта.

При контроле на экране электронно-лучевой трубки последовательно воспроизводятся изображения поперечных сечений шва по всей его длине. Число воспроизводимых на экране изображений

$$N = \frac{l}{S},$$

где l — длина контролируемого участка шва; S — шаг продольного перемещения искателя.

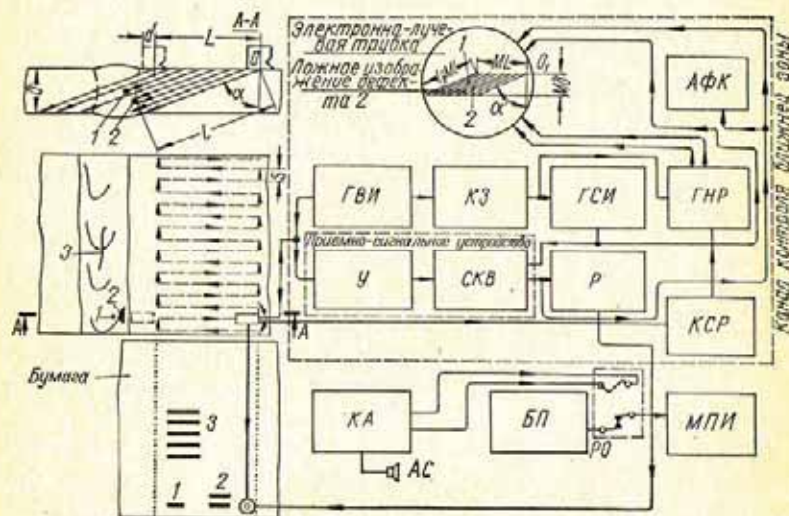


Рис. 230. Функциональная схема установки для автоматического контроля швов методом продольно-поперечного перемещения искателя:

ГВИ — генератор высокочастотных импульсов; КЗ — каскад задержки; ГНГ — генератор напряжения развертки; КСР — каскад смещения развертки; У — усилитель высокой частоты с детектором; СКВ — селектирующий каскад-видеоусилитель; Р — регистратор; АФК — автоматическая фотокамера; КА — каскад контроля акустического контакта; АС — аварийный сигнализатор; РО — реле остановки перемещения искателя; МПИ — механизм перемещения искателя; БП — блок питания.

С точки зрения дефектоскопии интерес представляют изображения дефектных сечений, которые и должны в процессе контроля подвергаться съемке с помощью автоматической фотокамеры. При непрерывном дефекте значительной протяженности автоматическая съемка должна производиться через определенные интервалы, так как нет практического смысла непрерывно фотографировать все изображения сечений дефектного участка шва. Ве-

личина интервала съемки выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечивалось получение достаточных данных для оценки качества шва и ремонта дефектных участков. При этом, однако, должно производиться фотографирование всех одиночных дефектов, которые могут отличаться друг от друга по своим размерам.

Процесс автоматического фотографирования заключается в следующем (рис. 231). При обнаружении дефекта импульс с выхода приемного тракта дефектоскопа воздействует на блок выдержки интервала расстояния при обнаружении непрерывного дефекта. Сигнал с выхода этого блока приводит в состояние готовности устройство управления затвором фотокамеры.



Рис. 231. Функциональная схема каскада автоматического фотографирования.

С целью получения качественной фотографии всего сечения необходимо, чтобы экспонирование началось не с момента обнаружения дефекта, а лишь с начала ближайшего прямого или обратного хода искателя и длилось в течение этого хода. В связи с этим включение устройства управления затвором фотокамеры производится фиксаторами при достижении искателем одного из крайних положений.

Блок выдержки интервала расстояния выдает управляющий сигнал на устройство управления затвором фотокамеры при обнаружении каждого одиночного дефекта а в случае выявления непрерывного дефекта — через интервал 10—15 мм от сечения, изображение кото-

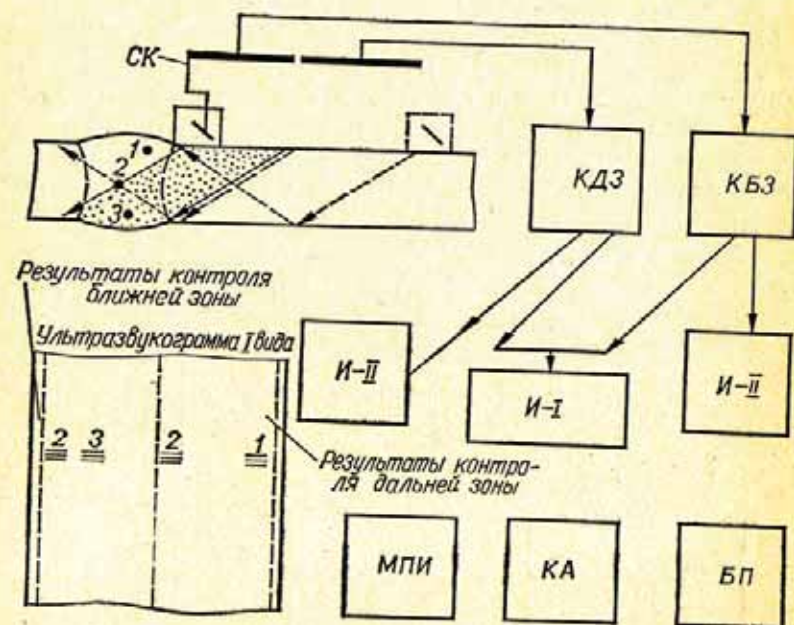


Рис. 232. Функциональная схема двухканальной установки для контроля стыковых швов методом продольно-поперечного перемещения искателя.

СК — скользящий контакт; КДЗ — канал контроля дальней зоны; КБЗ — канал контроля ближней зоны; И — I — индикатор ультразвукограммы I вида; И — II — индикатор ультразвукограммы II вида; БП — блок питания; КА — каскад контроля акустического контакта; МПИ — механизм перемещения искателя.

рого фотографировалось. По окончании экспонирования производится автоматическая перемотка фотопленки.

Прозвучивание швов обеспечивается продольно-поперечным перемещением искателей в определенных пределах. Для выявления различных образом ориентированных дефектов искателям придается вращательное движение. Способ прозвучивания, угол ввода луча и пределы перемещения искателя определяются толщиной металла и шириной валика усиления шва.

В гл. VII, VIII показано, что даже для контроля одного и того же стыкового шва должны быть последовательно применены разные способы прозвучивания с помощью одного или различных искателей. Смена способов прозвучивания и искателей требует перестройки режима работы каскада задержки и генератора селективирующих импульсов. Поэтому при ручном контроле, как правило, сначала ведется прозвучивание нижней части шва прямым лучом, а затем, после перестройки дефектоскопа, — прозвучивание верхней части шва отраженным лучом.

При автоматическом контроле прозвучивание может и должно осуществляться за один проход искательной системы вдоль шва. Для этого в искательном устройстве размещается один или два приемно-излучающих элемента, которые автоматически, например, через специальные шины, размещенные на механизме перемещения искателя, подключаются к ультразвуковому дефектоскопу (рис. 232). В ультразвуковом дефектоскопе предусматриваются два самостоятельных канала — для прозвучивания шва прямым (канал контроля ближней зоны) и отраженным (канал контроля дальней зоны) лучом. Блок-схема каналов приведена на рис. 230. Очевидно, что в обоих каналах может быть использован общий приемно-передающий тракт, если прозвучивание всего сечения шва ведется одним искателем. Оба канала имеют общий выход на индикатор ультразвукограммы I вида и самостоятельные выходы на индикаторы ультразвукограмм II вида.*

На одной из половин ультразвукограммы I вида отмечаются изображения дефектов, выявленных при прозвучивании прямым лучом, а на другой половине — изображения дефектов, выявленных при прозвучивании однократно отраженным лучом. Индикаторы ультразвукограмм II вида регистрируют изображения поперечных сечений шва, в которых обнаружены дефекты при прозвучивании прямым лучом (индикатор канала ближней зоны) и отраженным (индикатор канала дальней зоны).

В ряде случаев вместо ультразвукограмм I и II вида достаточно и более целесообразно получать ультразвукограммы III вида.

* При усложнении схемы дефектоскопа возможна регистрация ультразвукограмм II вида обеих половин шва на общем индикаторе.

Для обеспечения надежного контроля необходимо, чтобы каждое сечение шва было прозвучено n раз. В связи с этим шаг продольного перемещения искателя S должен составлять n -ную часть от ширины эффективного диаметра ультразвукового луча D_s , т. е.

$$S = \frac{D_s}{n}.$$

Естественно, что постоянство величины шага S независимо от скорости контроля может быть обеспечено, если скорости поперечного и продольного перемещений искателя связаны между собой определенным образом. Скорость продольного движения искателя, т. е. скорость контроля, прямо пропорциональна скорости его поперечного движения (см. рис. 230):

$$V_{пр} \approx \frac{S}{2L} V_n, \quad (281)$$

где V_n — скорость поперечного перемещения искателя; $V_{пр}$ — скорость продольного перемещения искателя; L — шаг поперечного перемещения искателя; S — шаг продольного перемещения искателя.

Максимально возможная скорость поперечного перемещения искателя обуславливается частотой излучения ультразвуковых импульсов и может быть оценена из соотношения

$$\frac{N}{F} = \frac{D_s}{V_{n\max}}, \quad (282)$$

где N — число ультразвуковых импульсов, которыми должна быть облучена любая точка контролируемого объема ($N = 1; 2; 3; 4; \dots$) в процессе каждого поперечного перемещения (хода) искателя; F — частота излучения ультразвуковых импульсов; D_s — эффективный диаметр луча; $V_{n\max}$ — максимально возможная скорость поперечного перемещения искателя; $\frac{N}{F}$ — время, необходимое для излучения N импульсов; $\frac{D_s}{V_{n\max}}$ — время прохождения приемно-излучающим элементом расстояния D_s , равного ширине ультразвукового луча.

Из формул (281) и (282) получим выражение для максимально допустимой скорости контроля шва

$$V_{пр\max} = \frac{1,8 D_s^2 F}{L} \cdot \frac{1}{nN}, \quad (283)$$

где $V_{пр\max}$ — максимальная скорость, м/с, при которой еще каждое сечение прозвучивается n раз и каждая точка объема при каждом поперечном ходе искателя озвучивается N ультразвуковыми импульсами.

Для перемещения искателя при автоматическом контроле данным методом могут быть использованы приспособления с различными кинематическими схемами.

Приспособление, общий вид и кинематическая схема которого приведены на рис. 233, разработано НИИМостов в 1954 г. для прозвучивания однотипных швов небольшой протяженности при выполнении исследований.

Весь механизм перемещения искателя и записи ультразвукограммы размещен на раме, присасывающейся к контролируемому объекту тремя электромагнитами.

Синхронизация поперечного движения искателя с продольным обеспечивается зубчатой передачей $z_3 - z_4$, связывающей между собой вращение червяка и работу кулисного механизма.

Вращательное движение червяку 3 передается от двигателя 1 через шестеренчатую пару $z_1 - z_2$. Искатель вставляется в держатель, укрепленный на ползуне с помощью направляющих и пружин; пружины обеспечивают необходимое давление искателя на металл в процессе контроля. Над держателем 4 искателя установлено перо с электромагнитом, прижимающим перо к бумаге в момент обнаружения дефекта. Кассета с рулоном писчей бумаги располагается над пером. Автоматическая остановка искателя в момент окончания контроля осуществляется с помощью концевого выключателя. Границы хода искателя отмечаются на ультразвукограмме.

Размеры регистрируемой ультразвукограммы не более 210×130 мм.

На рис. 234 показана кинематическая схема приспособления, применявшегося в ГДР при опытах по автоматизации контроля швов.

Все приспособление смонтировано в алюминиевой раме, размещенной на четырех колесах. При перемещении

рамы на 2 см коническая шестерня 5 делает один оборот. Закрепленный на этой шестерне тросик 4 приводит в движение перпендикулярно ко шву искатель 1 и одновременно сжимает пружину 2, возвращающую искатель обратно.

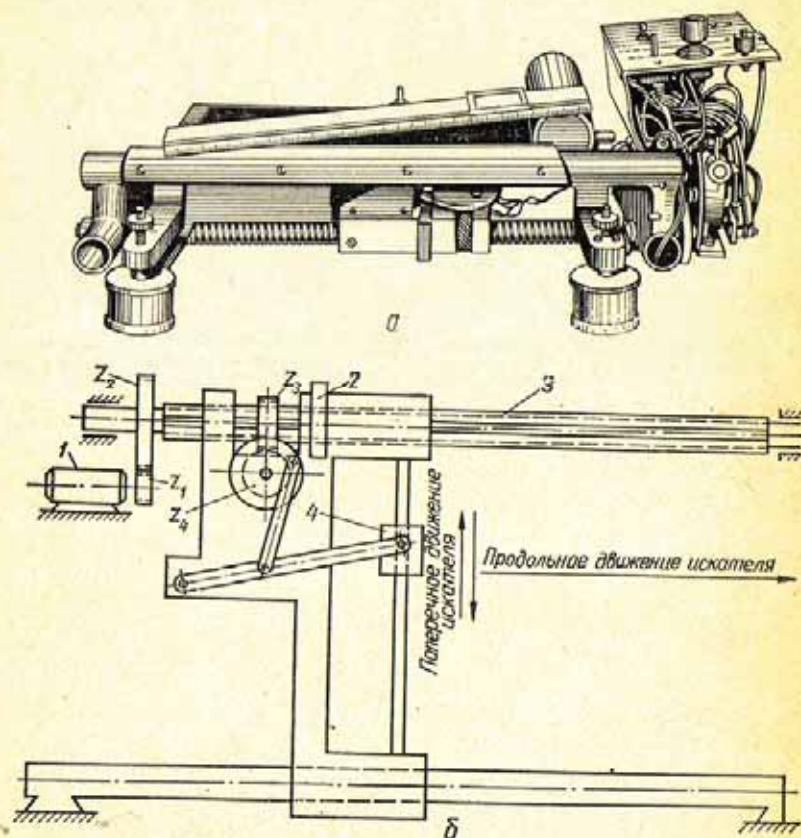


Рис. 233. Приспособление для прозвучивания швов методом продольно-поперечного перемещения искателя:
а — общий вид; б — кинематическая схема. 1 — двигатель, 2 — гайка отжимная, 3 — червяк, 4 — держатель.

Штанга 3, которая связана шарниром с шестерней 6, насаженной на конце приводного вала 7, сообщает искателю маятниковое движение.

Приспособление было рассчитано на скорость контроля не более 0,2 м/ч, без регистрации ультразвукограммы.

Значительно большая скорость контроля (до 10 м/ч) может быть достигнута при применении самоходной каретки (рис. 235) [32].

Движение каретки осуществляется электродвигателем, приводящим в движение стальные колеса в виде валиков.

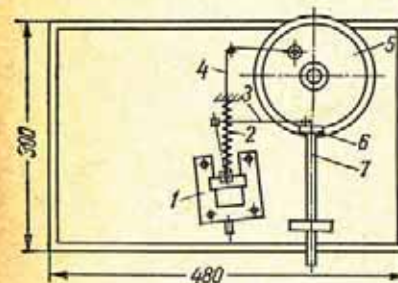


Рис. 234. Кинематическая схема приспособления для механического перемещения искателя.

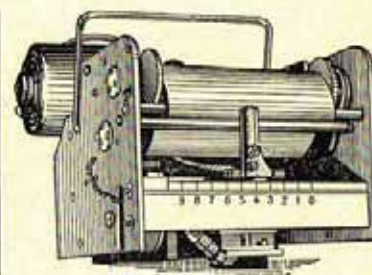


Рис. 235. Общий вид каретки для автоматического контроля швов методом продольно-поперечного перемещения искателя.

В каретке имеется индукционная катушка, насаженная на станину. Магнитный поток, создаваемый постоянным током, протекающим через катушку, замыкается через станину, колеса и контролируемый металл, притягивая каретку к контролируемому объекту.

Поперечное перемещение искателя связано с продольным движением каретки кулисным механизмом через фрикционную муфту. Фрикционная муфта ограничивает пределы перемещения искателя в поперечном ко шву направлении и предохраняет автомат от возможного повреждения при наличии на поверхности, по которой перемещается искатель, крупных выступов и брызг металла. Результаты контроля фиксируются на электротермической

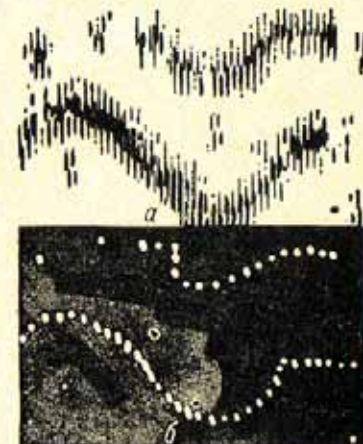


Рис. 236. Ультразвукограмма (а) и рентгенограмма (б) плиты толщиной 12 мм, в которой имитированы дефекты.

бумаге с помощью пера, размещенного над искателем. Механизм перемотки электротермической бумаги из подающей кассеты в приемную рассчитан так, что длина перемотанной части строго равна длине пути, пройденного автоматом.

На рис. 236 приведена ультразвукограмма, полученная с помощью дефектоскопа УЗД-НИИМ-2 и экспериментального приспособления для автоматического контроля (рис. 233). Для сравнения рядом с ультразвукограммой помещена рентгенограмма.

3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ~~МЕТОДОМ~~ БЕГАЮЩЕГО ЛУЧА

~~МЕТОДОМ~~
~~МЕТОДОМ~~
~~МЕТОДОМ~~

Методом бегущего луча целесообразно контролировать стыковые и угловые швы небольшой протяженности. Предлагаемый ~~метод~~ заключается в следующем. Искатель, состоящий из мозанки приемно-излучающих пьезоэлектрических элементов, подключается к приемно-сигнализирующему устройству и генератору электрических импульсов через устройство построчного прозвучивания. Переключение элементов осуществляется таким образом, что ультразвуковой луч постепенно обегает весь объем контролируемого участка. Размеры контролируемого участка определяются размерами искателя.

Устройство построчного прозвучивания выдает на устройство наблюдения данные о координатах луча, благодаря чему в устройстве наблюдения определенным образом копируется движение ультразвукового луча. Элемент, копирующий движение луча, имеет два состояния, которые определяются отсутствием или наличием сигналов на выходе приемно-сигнализирующего устройства.

В приемно-сигнализирующем устройстве применена селекция по времени поступающих на вход приемника сигналов. Программа работы временного селектора постоянно корректируется устройством построчного прозвучивания, если каждый ряд (строка) пьезоэлектрических элементов излучает ультразвуковой пучок в металл под своим углом, или же устанавливается однажды в начале работы, если все элементы излучают луч под одним и тем же углом.

Положение копирующего устройства и его состояние регистрируются в виде документа.

Для выявления различным образом ориентированных дефектов прозвучивание необходимо производить под различными углами к оси шва.

В качестве устройства наблюдения удобно использовать электронно-лучевую трубку, на экране которой воспроизводится развертка типа С. При этом длина строк соответствует длине искателя, а высота кадра — ширине искателя. Для воспроизведения развертки используются данные в виде напряжений, получаемые с устройства построчного прозвучивания и характеризующие собой номер строки и пластины в строке, подключенной в данный момент к приемно-сигнализирующему устройству. В момент обнаружения дефекта импульсы с выхода усилителя поступают через пиковый детектор на модулятор трубки, запирая ее и вызывая потемнение экрана в месте, соответствующем положению пластины в искателе, обнаруживающей дефект. Для регистрации документа контроля (ультразвукограммы I вида) изображение, получаемое на экране трубки, автоматически фотографируется.

Надежный акустический контакт может быть обеспечен путем ввода ультразвуковых колебаний через слой воды с косвенным контролем за его качеством.

Функциональная схема одной из установок для автоматического контроля качества швов представлена на рис. 237 [32].

Частота F_c строк должна быть не более той, при которой каждый из n_c элементов в ряду при каждом включении успевает излучить не менее N зондирующих импульсов:

$$F_c \leq \frac{F}{N n_c}, \quad (284)$$

где F_c — частота строк; F — частота посылок импульсов; n_c — число элементов в строке; N — число импульсов, излучаемых пластиной при каждом ее подключении.

Стыковой шов может быть полностью прозвучен с одной (рис. 238, б, г) или с двух (рис. 238, а, в) поверхностей листа. Прозвучивание соединений листов толщиной более 20 мм ведется по схемам, приведенным на рис. 238, а, б. Контроль швов листов меньших толщин осуществляется по схемам, показанным на рис. 238, в, г.

Для прозвучивания углового шва при толщине привариваемого листа 10—20 мм может быть применен искатель

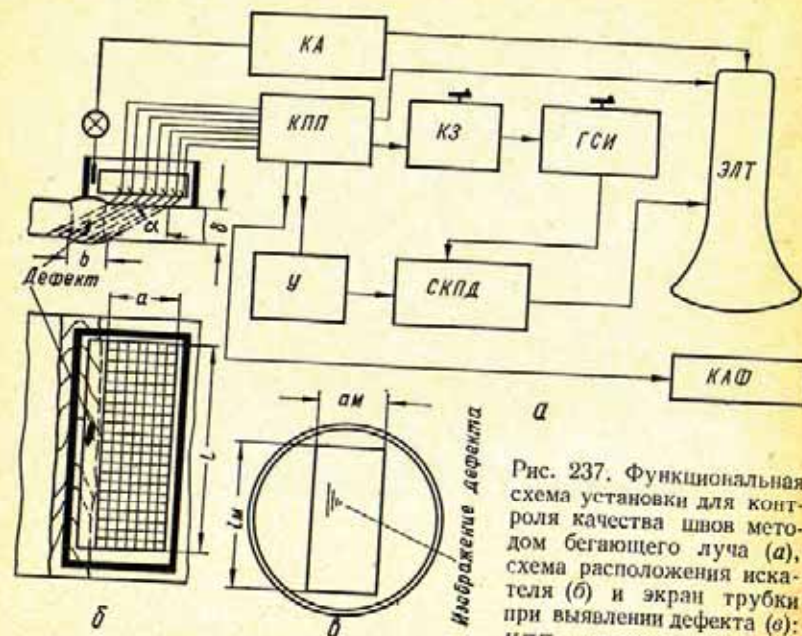


Рис. 237. Функциональная схема установки для контроля качества швов методом бегающего луча (а), схема расположения искателя (б) и экран трубки при выявлении дефекта (в): КПП — каскад построочного прозвучивания; У — усилитель высокой частоты с детектором; СКПД — селектирующий каскад с пиковым детектором; КЗ — каскад задержки; ГСИ — генератор селектирующих импульсов; ЗЛТ — электронно-лучевая трубка; КАФ — каскад автоматического фотографирования; КА — каскад контроля за акустическим контактом.

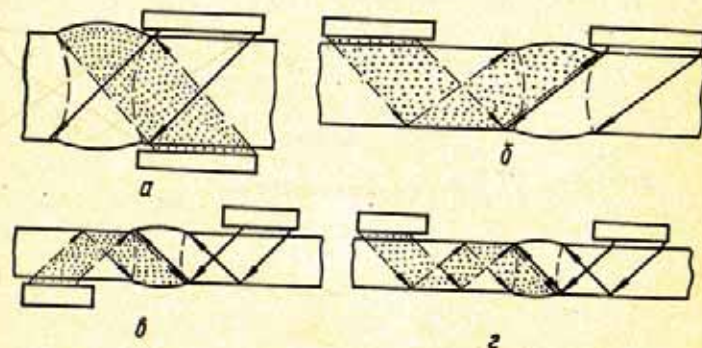


Рис. 238. Схема прозвучивания стыковых швов при контроле методом бегающего луча.

с двумя рядами пластин. Первый ряд пластин излучает колебания в металл под углом α_1 и предназначен для выявления дефектов в части шва, прилегающей к поверхности валика. Второй ряд, излучающий колебания под углом α_2 , предназначен для выявления дефектов в корне шва (рис. 239).

С практически достаточной точностью для прозвучивания угловых швов при толщине стенки $\delta = 10 \div 20$ мм можно применить один искатель с двумя рядами пластин, излучающих колебания под углами $\alpha_1 = 45^\circ$ и $\alpha_2 = 70^\circ$.

Для прозвучивания углового соединения с помощью пластин, излучающих колебания под углами $\alpha_1 = 45^\circ$ и $\alpha_2 = 70^\circ$, может быть применен общий канал с единой системой селекции.

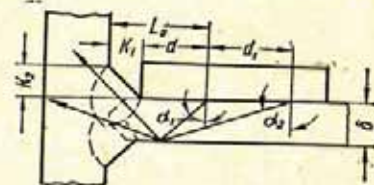


Рис. 239. Схема прозвучивания углового шва при контроле методом бегающего луча.

Первая экспериментальная установка для контроля швов методом бегающего луча была сконструирована в 1956 г. в НИИмостов [32]. Установка состоит из: искателя; блока построочного прозвучивания; ультразвукового дефектоскопа типа НИИМ-2; индикаторного блока (устройство наблюдения); малогабаритного фотоаппарата типа «Зоркий» (устройство регистрации).

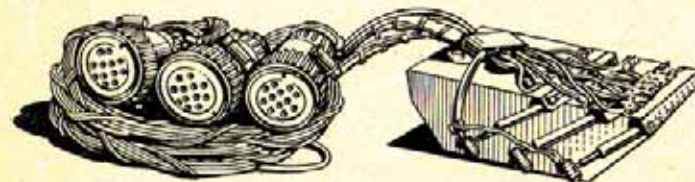
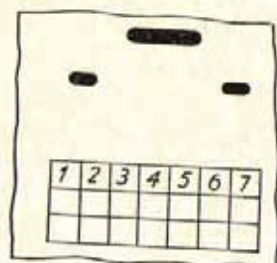


Рис. 240. Экспериментальный искатель для контроля сварных соединений методом бегающего луча.

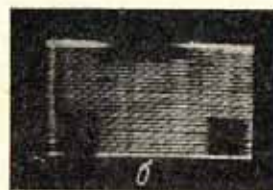
Искатель (рис. 240) выполнен в виде призмы из органического стекла, в которой установлены три ряда пьезоэлектрических пластин. Все пластины электрически изолированы друг от друга и могут излучать ультразвук в металл под одним и тем же углом.

Блок построочного прозвучивания служит для поочередного подключения каждой пластины к ультразвуковому

дефектоскопу и получения данных в виде электрических напряжений, характеризующих собой номер ряда и пластины в ряду, подключенной в данный момент к дефектоскопу. Эти напряжения используются для смещения электронного луча трубки индикаторного блока, благодаря чему электронный луч на экране копирует движение ультра-

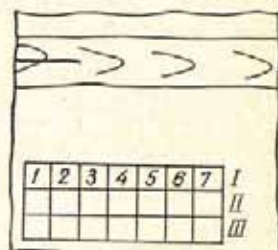


а



б

Рис. 241. Схема контроля (а) и ультразвукограмма (б) стальной плиты толщиной 40 мм с искусственными дефектами в виде пазов глубиной и шириной 4 мм.



а



б

Рис. 242. Схема контроля (а) и ультразвукограмма (б) стыкового сварного шва с частичным непроваром; толщина металла 20 мм.

звукового луча в шве. При этом на экране трубки воспроизводится развертка типа С. Длина строк соответствует длине искателя, а высота кадра — ширине искателя.

Яркость луча меняется при изменении напряжения на управляющей сетке трубки путем закорачивания сопротивления в цепи питания трубки контактами реле. В обычном состоянии контакты реле замкнуты, что соответствует нормальной яркости и фокусировке изображения на экране.

В момент обнаружения дефекта контакты реле размыкаются, напряжение смещения увеличивается, запирая

электронно-лучевую трубку и вызывая потемнение экрана в месте, соответствующем положению пластины, обнаружившей дефект.

Таким образом, размеры кадра на экране соответствуют размерам контролируемого участка, а темные места на кадре — местам обнаружения дефектов.

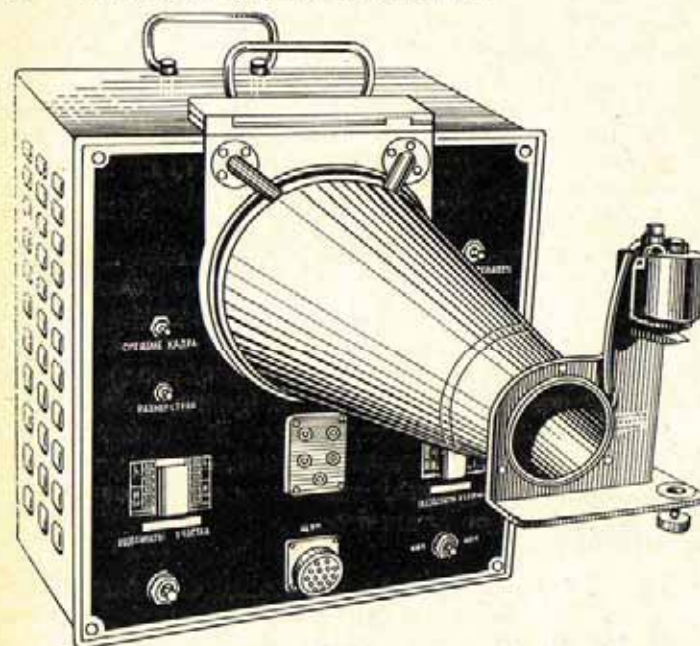


Рис. 243. Экспериментальная ультразвуковая установка УЗУ-1Б (НИИМ) для контроля швов методом бегающего луча.

Для получения более качественного изображения каждому ряду пьезоэлектрических пластин соответствует 13 строк в кадре, для чего в блоке синхронизации применяется червячная передача от механизма строчной развертки к механизму кадровых развертки. Частота кадров не сказывается на яркости изображения, так как трубка имеет экран с большим временем послесвечения. Для получения документа контроля изображение на экране трубки фотографируется.

На рис. 241, 242 приведены ультразвукограммы плиты и сварного соединения, полученные при контроле методом бегающего луча.

В установке УЗУ-1Б (рис. 243) модуляция яркости развертки производится напряжением, снимаемым с выхода пикового детектора, включенного в цепь управляющей сетки трубки [32]. На вход пикового детектора подаются предварительно нормализованные по амплитуде и длительности видеопульсы, возникающие на выходе каскада совпадений только при обнаружении дефектов. В процессе работы искатель присасывается к металлу с помощью электромагнитов. Акустический контакт создается заполнением водой пространства между искателем и металлом. Контроль за качеством акустического контакта осуществляется с помощью электродов, размещенных в искателе и блокирующих при отсутствии воды возможность включения установки.

Включение установки производится нажатием кнопки, расположенной на искателе. При этом включается реле, подающее напряжение на автопуск фотоаппарата и на механизм построчного прозвучивания. Механизм построчного прозвучивания производит последовательное подключение пьезоэлектрических пластин к приемно-излучающему тракту установки и воспроизводит на экране трубки развертку типа С. По окончании цикла контроля происходит сброс реле, отключается механизм прозвучивания и закрывается затвор аппарата.

4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕГОСЯ ЛУЧА СПОСОБОМ *способ*

Рассмотренные *методы* прозвучивания предусматривают использование искательных систем с фиксированным углом ввода луча. Применение этих методов нецелесообразно для контроля швов большой толщины.

Стыковые швы большой толщины необходимо прозвучивать под различными углами.

Естественно, что прозвучивание швов при автоматическом контроле с помощью искателей с различными углами ввода луча значительно усложнило бы процесс контроля и снизило его надежность.

Более рациональным является *способ* ~~метод~~ контроля ряда изделий, в частности стыковых сварных швов большой толщины, с помощью искателя (рис. 244), излучающего ультразвуковой луч под непрерывно и автоматически меняющимся углом (метод качающегося луча). Сущность

предлагаемого метода для автоматического контроля швов заключается в следующем. Искатель, излучающий качающийся ультразвуковой луч, перемещается вдоль шва. Качание луча и перемещение искателя осуществляется таким образом, что обеспечивается полное прозвучивание всего контролируемого объема шва (рис. 244, 245).

Регистрирующее устройство, копирующее движение искателя вдоль шва, имеет два состояния, определяемых наличием или отсутствием сигнала на выходе приемно-сигнализирующего устройства. Это устройство, как и в предыдущих методах, содержит временной селектор. Длительность селектирующего импульса определяется углом ввода луча, так как с изменением угла ввода луча меняется время прохождения импульсами расстояния от приемно-излучающего элемента до заданной глубины контроля и обратно.

Запись ультразвукограммы I вида производится регистрирующим устройством путем отметки его качественного

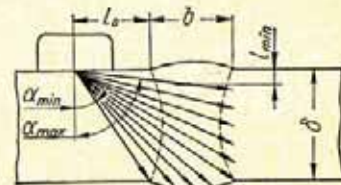


Рис. 244. Схема прозвучивания сварных швов при контроле методом качающегося луча.

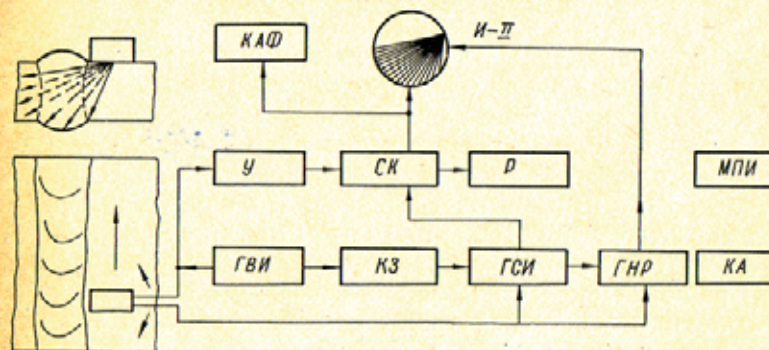


Рис. 245. Функциональная схема установки для автоматического контроля качества швов методом качающегося луча [32]:

ГВИ — генератор высокочастотных импульсов; У — усилитель с детектором; КЗ — каскад задержки синхронизирующего импульса на время прохождения ультразвука через искатель; ГСИ — генератор селективного импульса со счетно-следящим устройством; ГНР — генератор напряжения развертки; СК — селектирующий каскад; Р — регистратор дефектов; И-П — индикатор ультразвукограммы II вида; КАФ — каскад автоматического фотографирования; МПИ — механизм перемещения искателя; КА — каскад контроля акустического контакта.

состояния на ленте. Получаемый документ позволяет судить о месторасположении выявленных дефектов и о их протяженности по длине шва.

Для получения ультразвукограмм II вида на экране электронно-лучевой трубки воспроизводится линия развертки, всегда расположенная под углом к вертикали, равным углу α ввода ультразвукового луча в металл. При качании ультразвукового луча происходит качание линии развертки. Длительность развертки равна времени прохождения ультразвуковым импульсом расстояния от поверхности, на которой расположено искательное устройство, до заданной глубины и обратно. Так как это время зависит от угла ввода луча, то длительность развертки будет постоянно меняться. Длина развертки соответствует в определенном масштабе длине пути ультразвукового импульса в контролируемом участке металла при данном угле ввода луча.

Модулятор электронно-лучевой трубки связан с выходом приемно-сигнализирующего устройства (селектирующим каскадом). Импульсы, возникающие на выходе приемно-сигнализирующего устройства только в момент обнаружения дефекта, уменьшают яркость электронного луча и вызывают появление темных точек на развертке в местах, соответствующих расположению озвучиваемого контура дефекта в данном сечении шва. Для получения документа с изображением поперечного сечения шва (ультразвукограммы II вида) экран трубки фотографируется с помощью автомата, описание которого дано в § 2 настоящей главы.

Для контроля сварных соединений ~~методом~~ качающегося луча должны быть применены специальные искательные головки, отвечающие определенным требованиям. В частности, желательно, чтобы при излучении колебаний искательной головкой при изменении угла ввода луча оставались постоянными скорость качания луча, расстояние центра излучения от передней грани искателя и время пробега ультразвукового импульса в искателе.

Поставленным требованиям удовлетворяет искатель с непрерывно и автоматически меняющимся углом ввода луча, схема которого приведена на рис. 33 [44].

При качании луча угол падения должен изменяться в пределах, обеспечивающих возбуждение в контролируемом металле только поперечных волн. Этим условием определяется минимальный угол ввода поперечной волны в металл $\alpha_{\min}$.

При контроле изделий из стали $\alpha_{\min} \approx 34^\circ$ (см. гл. I). В функции приемно-сигнализирующего устройства входят усиление сигналов, поступающих на искатель, и выделение с помощью временного селектора эхо-сигналов от дефектов. В данном дефектоскопе временная селекция поступающих на вход усилителя сигналов применена для того, чтобы на индикаторы не проникали зондирующий импульс, импульсы, отраженные от поверхности металла, а также импульсы, являющиеся результатом многократных отражений зондирующего импульса в контролируемом объекте. Для этого необходимо, чтобы:

а) приемник начал усиливать, т. е. пропускать сигналы на индикаторы, с момента входа зондирующего импульса в контролируемый металл;

б) время t_c , в течение которого приемник усиливает, всегда равнялось времени пробега ультразвукового импульса от поверхности, на которую установлен искатель, до заданной глубины контроля δ (или до заданного расстояния от центра излучения искателя L) и обратно.

При этом (рис. 246)

$$t_c = \frac{2l}{C_t} = \frac{2\delta}{C_t} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = K \delta \sec \alpha \quad (285)$$

или

$$t_c = \frac{2l}{C_t} = \frac{2L}{C_t} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} = KL \operatorname{cosec} \alpha, \quad (286)$$

где C_t — скорость распространения поперечной ультразвуковой волны в контролируемом металле; K — коэффициент, равный $\frac{2}{C_t}$.

Ввиду того, что угол α ввода луча непрерывно и автоматически изменяется в определенных пределах (рис. 246), необходимо, чтобы время t_c работы приемника дефектоскопа также непрерывно и автоматически изменялось по закону $\sec \alpha$ или $\operatorname{cosec} \alpha$ в пределах, определяемых заданной глубиной δ или протяженностью L контролируемого участка [24].

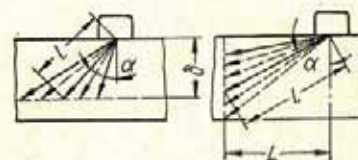


Рис. 246. Схема контроля искателем, излучающим качающийся луч.

Выполнение пункта «а» обеспечивается применением каскада задержки начального импульса со временем задержки $2t_n$, равным времени прохождения импульса в искателе.

Выполнение пункта «б» обеспечивается применением каскада совпадений и генератора селективирующих импульсов, длительность импульса которого автоматически изменяется по закону $\sec \alpha$ или $\operatorname{cosec} \alpha$ благодаря тому, что в генераторе установлено счетно-следящее устройство, кинематически связанное с механизмом изменения угла α ввода луча.

Счетно-следящее устройство в генераторе связывает угол α ввода луча с длительностью t_c селективирующего импульса через промежуточный параметр (напряжение, емкость, сопротивление), определяющий длительность генерируемого импульса, и выполняет функции [24, 32]:

1) постоянного наблюдения за изменением угла ввода луча α и непрерывной подачи значения угла α в решающее устройство;

2) постоянного решения уравнений (285, 286) для заданных значений C_t , δ , L , $\Delta\alpha$ и выдачи результата решения в виде параметра (напряжение, емкость или сопротивление), линейно связанного с длительностью генерируемого импульса.

В генераторе селективирующих импульсов со счетно-следящим устройством должна быть предусмотрена возможность регулировки величины контролируемого участка (толщины δ или протяженности L).

При контроле сварных швов методом качающегося луча искательная головка перемещается вдоль шва на определенном от него расстоянии. Для выявления дефектов, различным образом ориентированных в шве, искательной головке придается вращательное движение.

Минимальное расстояние L_0 от искателя до шва определяется минимальным углом ввода луча (см. рис. 244):

$$L_0 = \delta \operatorname{tg} \alpha_{\min}, \quad (287)$$

где δ — толщина металла; $\alpha_{\min}$ — минимальный угол ввода луча.

При прозвучивании только прямым лучом с одной поверхности остается мертвая зона, не подвергающаяся контролю. Высота $l_{\min}$ этой зоны зависит от максимального угла ввода луча и от ширины валика усиления шва

$$l_{\min} = (L_0 + 0,5b) \operatorname{ctg} \alpha_{\max} = (\delta \operatorname{tg} \alpha_{\min} + 0,5b) \operatorname{ctg} \alpha_{\max},$$

где b — ширина валика усиления шва; $\alpha_{\max}$ — максимальный угол ввода луча; $\alpha_{\min}$ — минимальный угол ввода луча; L_0 — расстояние центра излучения искателя от валика усиления.

Скорость контроля определяется скоростью перемещения системы вдоль шва.

Для повышения надежности контроля целесообразно, чтобы каждое сечение шва было прозвучено N_c раз, где $N_c > 1$. При таком

условии скорость продольного движения искательной системы вдоль шва (скорость контроля) может быть определена из соотношения [32]

$$V_k \leq \frac{2D_3 n}{N_c}, \quad (288)$$

где V_k — скорость контроля; D_3 — эффективный диаметр ультразвукового луча; n — скорость вращения кулачка.

Максимальная скорость качания, т. е. скорость вращения кулачка n , обуславливается частотой F следования ультразвуковых импульсов и тем количеством N импульсов, которыми предполагается озвучить каждую точку сечения шва при каждом качании луча.

Максимальная скорость вращения кулачка определяется уравнением

$$n \leq 57 \frac{D_3 F}{N I}.$$

Следует отметить, что при механическом качании с большой скоростью могут образовываться завихрения жидкости и пузыри в ней, создающие помехи при контроле. Поэтому в ряде случаев более эффективным может оказаться использование электрических способов качания луча.

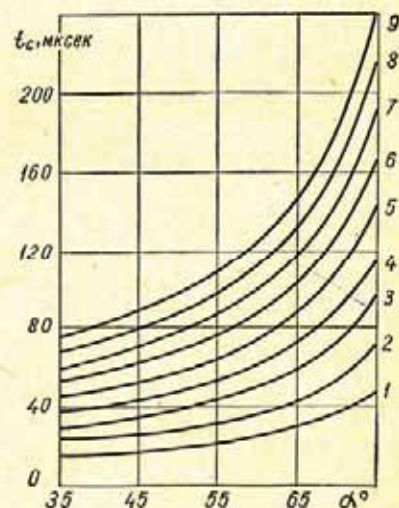


Рис. 247. Зависимость длительности t_c селективирующего импульса от угла ввода луча α при различных глубинах контроля:

1—9 — глубина контроля соответственно равна 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм

Как отмечалось, длительность селектирующего импульса должна изменяться по определенному закону при изменении угла ввода луча. Так, при прозвучивании стальных изделий на глубину δ длительность импульса t_c должна изменяться при изменении угла ввода луча α по закону

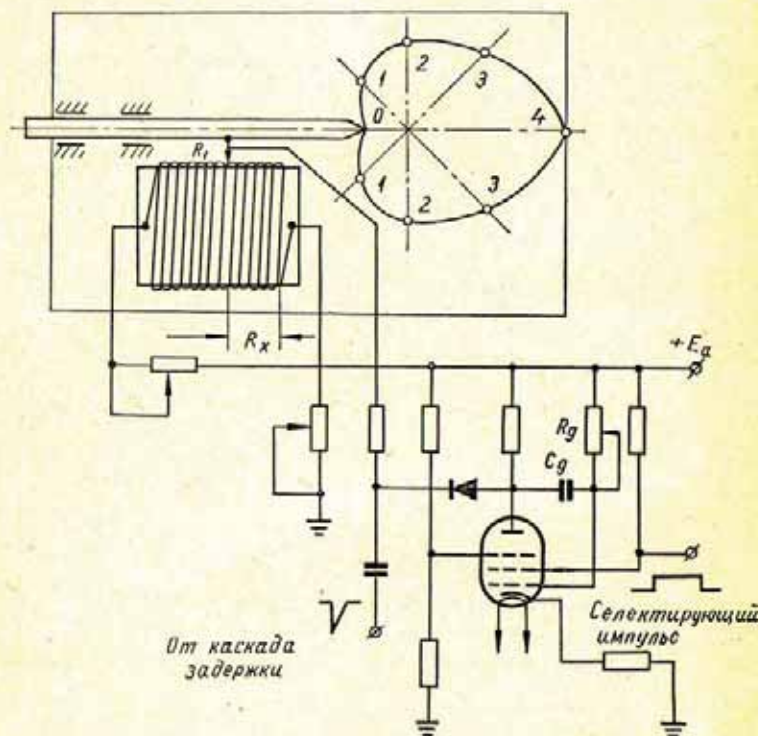
$$t_c = 0,61 \delta \sec \alpha. \quad (289)$$


Рис. 248. Схема генератора селектирующих импульсов со счетно-следящим устройством.

Естественно, что при прозвучивании изделий различной толщины δ длительность импульса t_c будет изменяться с изменением угла ввода луча α в различных пределах (рис. 247). Для постоянного изменения длительности селектирующего импульса по закону, описываемому формулой (289), в генераторе следует предусмотреть счетно-следящее устройство. Счетно-следящее устройство может связывать длительность t_c импульса с углом ввода луча α

через промежуточный параметр (напряжение, емкость, сопротивление), определяющий длительность генерируемого импульса. Если упомянутый параметр линейно связан с длительностью генерируемого импульса, то величина A этого параметра должна изменяться по закону

$$A = 0,61 \sec \alpha. \quad (290)$$

Естественно, что в генераторе необходимо иметь ручку регулировки пределов изменения длительности селектирующего импульса в зависимости от глубины участка, выбранного для контроля. Генератор селектирующих импульсов может быть собран по схеме любого ждущего генератора прямоугольных импульсов с плавной регулировкой длительности генерируемых импульсов.

Наиболее стабильным генератором прямоугольных импульсов является фантастрон. Длительностью генерируемых фантастроном импульсов можно управлять путем изменения напряжения на аноде фантастрона, определяемого положением движка потенциометра R_1 , т. е. величиной сопротивления R_x (рис. 248).

Изменение длительности импульса пропорционально значению $\sec \alpha$ может быть осуществлено путем изменения параметра R_x по закону

$$R_x = K \cdot 0,61 \sec \alpha, \quad (291)$$

что легко выполнить с помощью кулачкового механизма, изображенного на рис. 248. Профиль кулачка выполняется таким, чтобы расстояние x , а следовательно, и сопротивление R_x изменялось по закону, описываемому уравнением (291).

Регулировка пределов изменения длительности селектирующего импульса в зависимости от толщины δ контролируемого слоя может осуществляться с помощью потенциометра R_g или емкости C_g . На рис. 249 приведены в виде

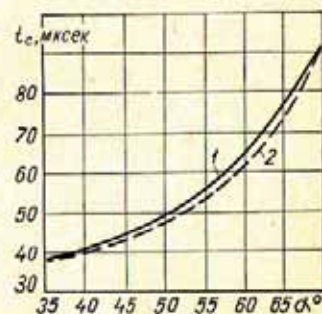


Рис. 249. Зависимость длительности селектирующего импульса, генерируемого фантастроном от угла ввода луча α :
1 — эксперимент; 2 — расчет.

графика результаты измерений длительности селектирующего импульса, генерируемого по схеме, изображенной на рис. 248, при настройке генератора на глубину контроля $\delta = 50$ мм, в зависимости от угла ввода луча. Представляется, что метод качающегося луча должен стать одним из основных при контроле соединений толщиной 50 мм и более.

Из изложенного в гл. XI—XII видно, что механизация и автоматизация процесса дефектоскопии позволяет не только повысить надежность контроля, но и открывают новые возможности в получении и обработке информации о качестве сварного соединения, которые не могут быть реализованы при ручном контроле с помощью известной аппаратуры.

Тем не менее при контроле ряда соединений, в частности соединений сложной конфигурации или соединений малой протяженности, более рациональным может оказаться применение аппаратуры, позволяющей получать объективный документ контроля (ультразвукограммы) при сканировании искателем ручную.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Н. П. Неразрушающий контроль качества сварных соединений закладных деталей. — В сб.: «Производство арматуры и закладных деталей». М., МДНТП, 1971.
2. Аникеев А. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов тонкостенных труб. — В сб.: «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений». М., ГОСИНТИ, 1963.
3. Барышев С. Е., Литвинцев А. И., Михайлов И. В. Калибратор напряжения в ультразвуковом дефектоскопе и его использование. — «Дефектоскопия», 1965, № 2.
4. Бобров В. Т. Автоматическая дефектоскопия сварных швов труб. — «Автоматическая сварка», 1967, № 8.
5. Бобров В. Т., Железнов С. С., Казаков Л. В. Устройство для ультразвукового контроля сварных швов труб. Авт. свид. № 216355. — «Бюллетень изобретений и товарных знаков», 1968, № 14.
6. Бобров В. Т. и др. Установка для высокоскоростного контроля сварных швов труб в потоке. — «Дефектоскопия», 1968, № 5.
7. Бобров В. Т. и др. Установка ДУК-15ЦЛАМ для автоматического ультразвукового контроля сварных швов труб. — «Дефектоскопия», 1968, № 6.
8. Богословский Ю. Б. и др. Призматический щуп для ультразвуковой дефектоскопии. Авт. свид. № 100433. — «Заводская лаборатория», 1952, № 7.
9. Богословский Ю. В. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-7Н. М., «Советское радио», 1957.
10. Бодашкин А. Л. Контактная искательная головка. Авт. свид. № 219851. — «Бюллетень изобретений», 1968, № 13.
11. Бражников Н. И., Марголин В. С. Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. М., «Энергия», 1960.
12. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957.
13. Волченко В. Н. Количественная оценка надежности сварных соединений. Л., ЛДНТП, 1969.
14. Временная инструкция по ультразвуковой дефектоскопии рельсов в пути дефектоскопом ДУК-13ИМ. Л., ЛИИЖТ, 1968.
15. Временное положение о применении ультразвуковой дефектоскопии для контроля качества сварных соединений. Л., ЛИИЖТ, 1965.
16. Временные технические условия на изготовление сварных конструкций железнодорожных вагонов. М., НИИинформтяжмаш, 1965.

17. Гиттис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М., Госэнергоиздат, 1961.
18. Голодаев Б. Г. Оценка чувствительности зеркально-теневого метода ультразвукового контроля. — «Заводская лаборатория», 1964, № 8.
19. Голубев А. С. Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта. — «Акустический журнал», 1961, № 7, 2.
20. Голубев А. С., Меркулов Л. Г., Щукин В. А. К вопросу о достижении оптимальной чувствительности при эхо-методе ультразвуковой дефектоскопии. — «Заводская лаборатория», 1962, № 2.
21. Горбунов А. И. О повышении разрешающей способности импульсных ультразвуковых дефектоскопов. — «Дефектоскопия», 1968, № 6.
22. Гурвич А. К. Ультразвуковой эхо-дефектоскоп. Авт. свид. № 920994. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 21.
23. Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений. Л., ЛДНТП, 1955.
24. Гурвич А. К. Импульсный ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 106990. — «Бюллетень изобретений», 1957, № 6.
25. Гурвич А. К. Возможные методы автоматического контроля качества сварных швов методом ультразвуковой дефектоскопии. М., МДНТП, 1957.
26. Гурвич А. К. Аппаратура для ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. — «Заводская лаборатория», 1959, № 7.
27. Гурвич А. К. Получение видимых изображений поперечных сечений швов при ультразвуковой дефектоскопии. — «Заводская лаборатория», 1960, № 1.
28. Гурвич А. К. Импульсный ультразвуковой дефектоскоп для обнаружения трещин в стенках отверстий изделия. Авт. свид. № 142796. — «Бюллетень изобретений», 1961, № 22.
29. Гурвич А. К. Исследования по ультразвуковому контролю качества стыковых сварных соединений из алюминиевого сплава АМг-6. — «Автоматическая сварка», 1962, № 4.
30. Гурвич А. К. Зеркально-теневого метод ультразвуковой дефектоскопии. М., «Машиностроение», 1970.
31. Гурвич А. К. Стандартизация метода ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. — В сб.: «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений». М., ГОСИНТИ, 1963.
32. Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений. Киев, Гостехиздат УССР, 1963.
33. Гурвич А. К. Щуп к ультразвуковому иммерсионному дефектоскопу. Авт. свид. № 175300. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 1.
34. Гурвич А. К. О неточности патента США № 3074268, кл. 73 — 67. 5, 1963. — «Дефектоскопия», 1966, № 4.
35. Гурвич А. К. О «чувствительности» и «угле ввода луча» при ультразвуковой дефектоскопии. — «Дефектоскопия», 1966, № 6.
36. Гурвич А. К. Диаграммы направленности наклонных искателей. — «Дефектоскопия», 1966, № 6.
37. Гурвич А. К. Обоснование принципа количественной оценки эффективности систем неразрушающего контроля качества сварных соединений. — В сб.: «Объем, достоверность и экономичность контроля качества сварных соединений». Л., ЛДНТП, 1972.

38. Гурвич А. К. Влияние поглощения ультразвука на диаграмму направленности наклонных искателей. — «Дефектоскопия», 1967, № 1.
39. Гурвич А. К. Координатная шкала к ультразвуковым дефектоскопам. — «Заводская лаборатория», 1968, № 3.
40. Гурвич А. К. Способ селекции эхо-сигналов при автоматическом контроле изделий ультразвуковым эхо-импульсным дефектоскопом. Авт. свид. № 227671. — «Бюллетень изобретений», 1969, № 2.
41. Гурвич А. К. Устройство для селекции эхо-сигналов при контроле изделий ультразвуковым эхо-импульсным дефектоскопом. Авт. свид. № 227672. — «Бюллетень изобретений», 1969, № 2.
42. Гурвич А. К. Ультразвуковой зеркально-теневого дефектоскоп. Авт. свид. № 252700. — «Бюллетень изобретений», 1969, № 29.
43. Гурвич А. К. и др. Ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 104659. — «Бюллетень изобретений», 1956, № 11.
44. Гурвич А. К., Кукли А. С. Щуп для ультразвукового дефектоскопа. Авт. свид. № 107280. — «Бюллетень изобретений», 1957, № 7.
45. Гурвич А. К., Кукли А. С. Ультразвуковые дефектоскопы типа УЗД-НИИМ-5 и применение их при контроле качества сварных и клепаных соединений. Л., ЛИИЖТ, 1961.
46. Гурвич А. К. и др. Ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 173473. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 15.
47. Гурвич А. К., Огрызков Р. С. Ультразвуковой импульсный дефектоскоп. Авт. свид. № 175700. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 20.
48. Гурвич А. К., Шаповалов П. Ф. Применение ультразвуковых дефектоскопов ДУК-13ИМ при контроле качества сварных соединений. Л., ЛДНТП, 1968.
49. Гурвич А. К., Русаков Н. А. Имитатор эталонного отражателя в ультразвуковом дефектоскопе ДУК-11ИМ. — «Заводская лаборатория», 1968, № 1.
50. Гурвич А. К., Круг Г. А., Шаповалов П. Ф. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-6М. — «Путь и путевое хозяйство», 1968, № 10.
51. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Основные параметры ультразвукового контроля сварных соединений, принципы их стандартизации и эталонирования. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
52. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И., Арбит И. И. Комплект эталонных образцов и вспомогательных устройств КЭУ-1. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
53. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. О воспроизводимости чувствительности ультразвукового контроля по эталонным отражателям различного вида. — В сб.: «Ультразвуковой контроль сварных соединений». Л., ЛДНТП, 1972.
54. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Индикатрисы рассеяния как источник дополнительной информации о выявленных дефектах. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
55. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. АВРД- и ВРД-диаграммы для оценки характеристик дефектов, выявленных при ультразвуковом контроле наклонным искателем. Труды Всесоюзной научно-технической конференции «Современные методы и средства контроля качества материалов и изделий без разрушения». Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1970.

56. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Исследование способов измерения условной высоты дефектов. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
57. Гурвич А. К., Шукин В. А. Сравнительная оценка способов измерения условной протяженности дефектов. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
58. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Отношение условной ширины к условной высоте дефекта как информационная характеристика о конфигурации и ориентации дефекта. — В сб.: «Ультразвуковой контроль сварных соединений». Л., ЛДНТП, 1972.
59. Гурвич А. К. О технико-экономической оценке дефектоскопичности сварных соединений. — «Сварочное производство», 1970, № 6.
60. Десятник М. Ш., Круг Г. А. Счетная линейка для ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
61. Дианов В. Ф., Ермолов И. Н. Диаграмма для измерения протяженных дефектов ультразвуковым методом. — «Дефектоскопия», 1971, № 6.
62. Дианов Д. Б. К вопросу о переходе ультразвуковых волн через границу раздела двух твердых сред. Труды семинара. Л., ЛЭТИ, 1958.
63. Дианов Д. Б. Исследование направленности призматических преобразователей. — «Дефектоскопия», 1965, № 2.
64. Ермолов И. Н. Контроль качества массивных сварных соединений различных типов ультразвуковым методом. — В сб.: «Методы контроля качества сварных швов и конструкций». Кн. 50. Л., НТОМашпром, 1958.
65. Ермолов И. Н. Чувствительность контроля и точность измерения координат дефектов при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений большой толщины. — В сб.: «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений». М., ГОСИНТИ, 1963.
66. Ермолов И. Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии. — «Дефектоскопия», 1965, № 6.
67. Ермолов И. Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии. Курс лекций, ч. 1, П. М., Горный институт, 1966, 1968.
68. Ермолов И. Н. Исследование чувствительности теневого метода ультразвуковой дефектоскопии. — «Заводская лаборатория», 1969, № 3.
69. Ермолов И. Н., Краковяк М. Ф. Устройство для измерения амплитуд сигналов импульсного ультразвукового дефектоскопа. Авт. свид. № 159326. — «Бюллетень изобретений», 1963, № 24.
70. Ермолов И. Н., Краковяк М. Ф. Имитатор дефектов и его применение в ультразвуковой дефектоскопии. — В сб.: «Труды ЦНИИТмаш». Вып. № 42, М., ЦНИИТмаш, 1964.
71. Ермолов И. Н., Краковяк М. Ф., Вятсков И. А. Искатель ультразвукового дефектоскопа. Авт. свид. № 167664. — «Бюллетень изобретений», 1965, № 20.
72. Ермолов И. Н., Краковяк М. Ф., Вятсков И. А. О возможности ультразвукового контроля контактных сварных соединений труб котлоагрегатов. — «Сварочное производство», 1967, № 7.
73. Ермолов И. Н. и др. Расчет экономической эффективности дефектоскопического контроля. — «Дефектоскопия», 1968, № 1.

74. Ермолов И. Н., Райхман А. З. Обнаружение трещин при ультразвуковом контроле сварных швов. — «Ультразвуковая техника», 1964, № 4.
75. Ермолов И. Н., Химченко Н. В., Цечаль В. А. Ультразвуковой контроль электрошлаковых швов. — «Сварочное производство», 1968, № 12.
76. Ермолов И. Н., Щербинский В. Г. Измерение величины дефектов при ультразвуковой дефектоскопии. — «Дефектоскопия», 1967, № 1.
77. Ермолов И. Н., Щербинский В. Г., Карлов Д. Ф. Исследование фронтальной разрешающей способности эхо-дефектоскопа. — «Дефектоскопия», 1971, № 5.
78. Инструкция по ультразвуковому контролю качества сварных соединений трубопроводов, коллекторов и барабанов котлов тепловых электростанций. М., Информэнерго, 1967.
79. Инструкция по ультразвуковой дефектоскопии сварных стыков рельсов. — В сб.: «Инструктивные материалы по сварочно-наплавочным работам в путевом хозяйстве». М., «Транспорт», 1969.
80. Инструкция по ультразвуковому контролю качества сварных соединений труб поверхностей нагрева котлов тепловых электростанций. М., Информэнерго, 1969.
81. Иоффе В. К., Ямпольский А. А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М., Госэнергоиздат, 1954.
82. Ицхоки Я. С. Импульсные устройства. М., «Советское радио», 1959.
83. Колесников А. Е. Ультразвуковые измерения. М., Изд-во стандартов, 1970.
84. Компенсация температуры при прохождении ультразвука в жидкости. — «Дефектоскопия», 1965, № 4.
85. Кондрацкий В. Я., Аранцев В. А. Ультразвуковая установка «Днепр-1» для автоматического контроля сварного шва электродуговой сварки труб большого диаметра. Материалы краткосрочного семинара. Ч. 2. Л., ЛДНТП, 1969.
86. Контроль рельсов ультразвуковыми дефектоскопами ДУК-13ИМ и УЗД-НИИМ-6М. Серия «Путь и путевое хозяйство». Вып. 51, М., ЦНИИТЭИ МПС, 1969.
87. Королев М. В., Пронякин В. Т., Дубинин Г. В. Ультразвуковой дефектоскоп для контроля тонких сварных швов. — «Дефектоскопия», 1969, № 3.
88. Костюков Б. В. Экспериментальное исследование диаграмм направленности пьезокерамических пластин. — «Дефектоскопия», 1966, № 5.
89. Круг Г. А. Ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 181861. — «Бюллетень изобретений», 1966, № 10.
90. Круг Г. А. К вопросу о количественной оценке информации при ультразвуковом контроле. — «Дефектоскопия», 1967, № 5.
91. Круг Г. А. Автоматический ультразвуковой контроль профильного проката. — В сб.: «Неразрушающий контроль качества в машиностроении». Л., ЛДНТП, 1967.
92. Круг Г. А. Использование метода сравнения для повышения точности измерения координат дефектов при контроле наклонным искателем. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.
93. Круг Г. А. и др. Автоматический ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 197240. — «Бюллетень изобретений», 1967, № 12.

94. Круг Г. А., Десятник М. Ш. Раздельно-совмещенный наклонный искатель для ультразвуковой дефектоскопии. Материалы краткосрочного семинара. Ч. 2. Л., ЛДНТП, 1968.

95. Круг Г. А., Десятник М. Ш. Исследование направленности наклонных искателей с кольцевыми пьезопреобразователями. — «Дефектоскопия», 1969, № 3.

96. Кузьмина Л. И. Ультразвуковая дефектоскопия стыков контактной сварки рельсов. М., «Машиностроение», 1970.

97. Кузьмина Л. И., Гурвич А. К. Применение перфорированных карт для накопления и обработки результатов различных методов контроля. — «Дефектоскопия», 1966, № 2.

98. Кузьмина Л. И., Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия соединений, выполненных контактной сваркой. — «Автоматическая сварка», 1966, № 9.

99. Кукли А. С. Особенности ультразвукового контроля тавровых и нахлесточных соединений. — В сб.: «Неразрушающий контроль качества в машиностроении». Л., ЛДНТП, 1967.

100. Кукли А. С., Гурвич А. К. Акустический тракт ультразвукового дефектоскопа при контроле листов сдвиговыми волнами. — «Дефектоскопия», 1972, № 5.

101. Лончак В. А., Иванов И. В. Устройство для временно-го срабатывания автоматического регистратора. Авт. свид. № 184001. — «Бюллетень изобретений», 1966, № 14.

102. Лончак В. А., Бобров В. Т., Перлатов В. Г. Ультразвуковой эхо-импульсный дефектоскоп для автоматического контроля структурно неоднородных материалов и сварных швов. Авт. свид. № 190050. — «Бюллетень изобретений», 1967, № 1.

103. Лончак В. А., Бобров В. Т., Перлатов В. Г. Повышение устойчивости ультразвукового дефектоскопа к нерегулярным помехам. — «Дефектоскопия», 1968, № 3.

104. Ланге Ф. Корреляционная электроника. Л., Судпромгиз, 1963.

105. Малинка А. В. Комбинированный эхо-теневой метод ультразвуковой дефектоскопии. — «Дефектоскопия», 1966, № 3.

106. Меркулов Л. Г. Исследование рассеяния ультразвука в металлах. — ЖТФ, 1956, № 26.

107. Меркулов Л. Г., Вережкин В. М. Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопараллельной пластины в жидкости. — «Дефектоскопия», 1965, № 5.

108. Меркулов Л. Г., Яблоник Л. М. Теория акустически согласованного многослойного преобразователя. — «Дефектоскопия», 1966, № 5.

109. Меркулова В. М. Расчет характеристики направленности поршневого излучателя в импульсном режиме. — «Дефектоскопия», 1967, № 1.

110. Михайлов И. Г., Калугин Б. А. Новый ультразвуковой метод измерения упругих свойств твердых тел при высоких температурах. Труды конференции «Промышленное применение ультразвука». Куйбышев, Авиационный институт, 1961.

111. Моисеева Н. П., Шукин В. А. Универсальные координатные шкалы для ультразвукового контроля сварных соединений с цилиндрической поверхностью. Л., ЛДНТП, 1970.

112. Мякишев В. М., Щербинский В. Г. Статистическое распределение дефектов сварки по азимуту. — «Дефектоскопия», 1970, № 4.

113. Мэзон У. П. Физическая акустика. Том. I, часть А., М., «Мир», 1966.

114. Назаров С. Т. Методы контроля качества сварных соединений. М., Машгиз, 1961.

115. Петров Б. А. Искатель к ультразвуковому дефектоскопу. Авт. свид. № 303584. — «Бюллетень изобретений», 1971, № 16.

116. Правила контроля качества сварных соединений при изготовлении пролетных строений железнодорожных мостов. М., Трансжелдориздат, 1957.

117. Райхман А. З. Контроль термообработки сварных стыков паропроводов ультразвуковым методом. — «Заводская лаборатория», 1962, № 8.

118. Райхман А. З., Ермолов И. Н. Определение оптимальной чувствительности ультразвукового дефектоскопа и норм оценки качества сварных соединений. — «Дефектоскопия», 1965, № 4.

119. Райхман А. З., Святский Б. С. О чувствительности ультразвукового дефектоскопа при поиске дефектов. — «Дефектоскопия», 1966, № 3.

120. Райхман А. З. и др. Ультразвуковой контроль тонких сварных соединений. — «Дефектоскопия», 1969, № 3.

121. Райхман А. З., Святский Б. С., Белов Г. Д. Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов с толщиной стенки 7—15 мм. М., СЦНТИОГРЭС, 1969.

122. Рекомендации по ультразвуковому контролю стыковых сварных швов сталей перлитного и ферритного класса (перевод статьи из «Welding Journal», 1965, № 12, № 8). Серия «Энергетика за рубежом». М., БТИ Министерства энергетики и электрофикации СССР, 1967.

123. Рыжов-Никонов В. И., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль толщины сварных швов клапанов двигателей с помощью поверхностных волн. М., ГОСИНТИ, 1968.

124. Сазонов Ю. И., Шкарлет Ю. М. Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний. — «Дефектоскопия», 1969, № 5.

125. Сайбель А. Г. Основы радиолокации. М., «Советское радио», 1961.

126. Сифоров В. И. и др. Радиоприемные устройства. М., «Советское радио», 1963.

127. Скучик Е. Основы акустики. Т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1958.

128. Смелянский Р. М. Некоторые вопросы контроля качества соединений, выполненных сваркой трением. — В сб.: «Новая техника, технология, организация производства». Вып. 15., Ростов, НИИТМ, 1970.

129. Смирнов А. Д. Импульсная ультразвуковая измерительная аппаратура. М., «Энергия», 1967.

130. Смирнова Л. И., Смирнова А. П. Определение высоты непровара в односторонних стыковых швах малой толщины зеркально-теневым методом. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.

131. Соколов С. Я. Ультразвуковые колебания и их применение. — «Заводская лаборатория», 1935, № 5.

132. Стандартные нормы и правила СН и П. Ч. III. М., Госстройиздат, 1963.

133. Таран Ю. М. Ультразвуковая установка для непрерывного контроля качества швов сварных конструкций. — «Автоматическая сварка», 1959, № 9.

134. Тарасов Н. М., Карташов В. К. Определение непроара при точечной сварке с помощью ультразвуковой локации. — «Авиационная промышленность», 1965, № 9.

135. Титц Г. Д. Оценка величины дефектов при эталонировании чувствительности по сферическому отражателю. — «Дефектоскопия», 1972, № 1.

136. Технические условия ТУ32 (ЦП-18-67. Рельсы старогонные, отремонтированные с применением контактной сварки). М., «Транспорт», 1968.

137. Тимошенко Я. А., Бедрицкий А. Г., Чернякова С. С. Промышленное применение ультразвукового контроля деталей. Минск, «Наука и техника», 1964.

138. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., «Советское радио», 1966.

139. Ультразвуковой контроль сварных соединений в электровагоностроении. Рига, ЛИИТБ, 1965.

140. Учебный план и программа подготовки операторов по ультразвуковому контролю сварных соединений. Л., ЛИИЖТ, 1967.

141. Феоктистов В. А. Ультразвуковой контроль качества сварки изделий с помощью нормальных волн. — «Заводская лаборатория», 1969, № 5.

142. Физические основы подводной акустики. М., «Советское радио», 1955.

143. Химченко Н. В. Влияние некоторых факторов на чувствительность ультразвукового контроля сварных швов, выполненных электрошлаковым способом. — В сб.: «Метод контроля сварных швов и конструкций». Кн. 50, Л., НТОМашпром, 1958.

144. Химченко Н. В. Относительный метод ультразвукового структурного анализа металлов. М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1964.

145. Химченко Н. В., Есилевский В. П. Ультразвуковой контроль сварных швов. — «Сварочное производство», 1956, № 7.

146. Химченко Н. В., Есилевский В. П., Це- чаль В. А. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов, выполненных электрошлаковым способом. — В сб.: «Новые методы контроля и дефектоскопии». Киев, Гостехиздат УССР, 1958.

147. Химченко Н. В., Приходько В. Н. Аппаратура для ультразвукового структурного анализа металлов и сварных соединений. — «Дефектоскопия», 1965, № 2.

148. Химченко Н. В., Бобров В. А. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений в химическом машиностроении. Труды Всесоюзной конференции по комплексной дефектоскопии сварных соединений. М., МДНТП, 1969.

149. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М., «Наука», 1965.

150. Це чаль В. А. Ультразвуковой контроль качества электрошлаковой сварки. — «Машиностроение», 1960, № 5.

151. Це чаль В. А. Ультразвуковой контроль сварных швов пылеуловителей. Информационное письмо 6/220. Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1961.

152. Це чаль В. А. Ультразвуковой контроль швов на стали 34ХМ, выполненных электрошлаковой сваркой. — «Автоматическая сварка», 1962, № 8.

153. Це чаль В. А. Ультразвуковая дефектоскопия сварных

соединений, выполненных электрошлаковой сваркой. — В сб.: «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений». М., ГОСИНТИ, 1963.

154. Це чаль В. А., Макара А. М., Жовницкий И. П. Определение характера развития холодных трещин в сварных соединениях с применением ультразвуковой дефектоскопии. — «Автоматическая сварка», 1961, № 5.

155. Це чаль В. А., Ю щак П. Т. Комплексный автоматизированный контроль качества сварных швов труб большого диаметра. М., МДНТП, 1969.

156. Це чаль В. А. и др. Оценка сегментных отражателей в тест-образцах для эталонирования чувствительности при ультразвуковом контроле. — «Дефектоскопия», 1970, № 6.

157. Чегоринская О. Н., Пашенко Г. Ф., Гарин Э. М. Искатель к ультразвуковому дефектоскопу. Авт. свид. № 258690. — «Бюллетень изобретений», 1967, № 12.

158. Чепелюк А. В. Организация ультразвукового контроля качества сварных соединений на Рижском вагоностроительном заводе. — В сб.: «Неразрушающий контроль качества в машиностроении». Л., ЛДНТП, 1967.

159. Шведова К. Т., Савойщенко В. Г., Ганжа В. И. Применение координатной линейки и экранной глубиномерной шкалы при контроле сварных швов. — «Дефектоскопия», 1969, № 4.

160. Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М., «Металлургия», 1965.

161. Щербинский В. Г. Исследование надежности ультразвукового контроля в зависимости от качества акустического контакта. — «Дефектоскопия», 1971, № 2.

162. Щербинский В. Г. Исследование надежности обнаружения различно ориентированных дефектов сварных швов. — «Дефектоскопия», 1971, № 4.

163. Яблоник Л. М. Оценка чувствительности контактного и иммерсионного методов ультразвукового контроля. — «Дефектоскопия», 1967, № 12.

164. Яблоник Л. М. К вопросу о выявляемости дефектов при ультразвуковой дефектоскопии теньевым методом. — «Заводская лаборатория», 1963, № 1.

165. Adams D. F., Taylor S. K. Detection of faults in friction welded studs by ultrasonics. — "Weld and metal Fabric", № 10, 1969.

166. Bastien P. Considerations sur les difficultes d'appréciation de l'improbabilité des défauts décelés par ultrasons. Soudage et techn. connexes, № 11—12, 1967.

167. Babbitt John E., Ultrasonic weld inspection at work, "Welding Journal", № 1, 1960.

168. Brioni Angelo, Progressi e nuovi metodi nel campo dei controlli di saldature con ultrasuoni. "Rivista italiana della saldatura". № 5, 1961.

169. Buken G., Krachter H. Zur Frage der Fehlergrößenbestimmung in Schweißnahten nach dem Ultraschall — Reflexionsverfahren — Materialprüfung, № 10, 1968.

170. Deutsch V. Automatische Prüfen von Schweißpunkten mit Ultraschall «Schweissen und Schneiden», № 1, 1967.

171. Deutsch V., Schinke H. J. Neue Hilfsmittel zur Schweißnahtprüfung mit Ultraschall. „Schweißen und Schneiden“, № 3, 1962.

172. Emploi des blocs d'étalonnage destinés au contrôle des appareils d'examen par les ultrasons. „Soudage et techniques connexes“, № 3 — 4, 1959.

173. Tauchen J., Solfronk V. Kontrola provaření kóřene jednostranných $\frac{1}{2}V$ + Kontových svaru ultrazvukovoi defektoskopu. „Zvaranie“, № 2, 1968.

174. Fank Bg., Parker F. Ultrasonic Weldment Inspections Currently in Use. „Nondestructive testing“, № 6, 1962.

175. Hinfuss K. Nachweis von linsenförmigen Schlackeneinschlüssen mit einer Zweikopfmethode. „ZIS — Mitt“, № 3, 1969.

176. Gericke O. R. Dual-Frequency ultrasonic Pulse-Echo Testing. — „The Journal of the acoustical society of America“, № 2, 1964.

177. Garson H. L. Considérations sur quelques facteurs influant sur la répartition de l'énergie dans le faisceau ultrasonore. Journal sur les ultrasons. Paris, 1968.

178. Carson H. L. Errors in calibration introduced by the geometry of the IIW block. „Ultrasonics“, Vol. 6, 1968.

179. Knopf H. D. Möglichkeiten der automatischen ultraschallprüfung geschweißter Kraftfahrzeuge — Hohlventile. „Materialprüfung“, № 9, 1969.

180. Gurwitsch und Fadejw. „Signal und Schiene“, № 2, 1963.

181. Krautkrämer I. u. H. Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin (Heidelberg) New York, 1966.

182. Krautkrämer I. Ultrasonic Weld Testing in Europe and the Attitude of Technical Control Authorities. „Nondestructive testing“, № 5, 1962.

183. Krautkrämer I. Fehlergrößenbestimmung und Empfindlichkeitsnormung bei der Ultraschall — Schweißnahtprüfung — Technik (Suisse). № 19, 1968.

184. Linke D. Einige Klassifizierungsprobleme bei der Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. — „Internat. Sympos. Ultraschallmaterialprüf.“, Dresden, Berlin, 1966.

185. Linke D. Zur Anwendung des AVG — Diagramms bei der Bestimmung der Ungänzengröße in der Ultraschall — Schweißnahtprüfung — „ZIS — Mitt“, № 8, 1969.

186. Le Penven G., Thouvenin I. L. Etude des faisceaux émis par les palpeurs émetteurs récepteurs d'ondes transversales en vue du contrôle des soudures. Journal sur les ultrasons. Paris, 1968.

187. Matting A., Wilknes G. Die Prüfung von Punktschweißungen durch Ultraschall. Fechbuchreihe Schweißtechnik, 1963.

188. Obrázl. Príspevek k posuzovani velikosti vad ultrazvukem. „Strojrenstvi“, № 9, 1963, t. 13.

189. Obrázl. Schallköpfe von Ultraschallgeräten und ihre Eigenschaften. Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt — Universität zu Berlin, Math. — Nat. Reihe, № 1, 1965, XIV.

190. Papke W. H. Schweißnahtprüfung mit Ultraschall, „Schweißen und Schneiden“, № 10, 1961.

191. Pawlowski Z., Deputat I. „Przegląd Spawalniczy“, № 6, 1967.

192. Skorupa A., Hyrnik E., Bukaty T. Porównawcze badania ultradźwiękowe spoin pachwinowych w złączach zakładkowych. „Przegl. Spawaln.“ № 9, 1969, 21.

193. Rechner W. Einfluß der Oberflächenrauigkeit und des Schweißgefüges bei der Ultraschallprüfung mit Winkelskopfen „ZIS — Mitt“, № 8, 1968, 10.

194. Recommendations for the determination of certain characteristics of ultrasonic flaw detection equipment by the IIW calibration block. IIW Doc. V. — 330 — 66/OE (ex. VC — 79 — 65/OF), Commission V, 1966.

195. Richter H.-U., Linke D. Zur Rückstrahlungsgeometrie-typischer Ungängen bei der Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. „Schweisstechnik“, № 5, 1967.

196. Richter H.-U., Linke D. Klassifizierungsprobleme bei der Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. „Schweisstechnik“, № 7, 1967.

197. Richter H. U. Vergleich und Tendenzen internationaler Richtlinien zur Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. — „Schweißtechnik“, 1971, № 21.

198. Скордев А. Единая система за проверка и настройка на ултразвуковые дефектоскопии — „Рационализация, стандартизация“, 1968, 18, № 11.

199. Skorupa A. Interpretacja wyników ultradźwiękowych badań spoin pachwinowych w połączeniach zakładkowych. — „Przegl. spawaln.“, № 9, 1967, 19.

200. Schwartz M. Effect of Signal Fluctuation on Pulse Signal Detection. „IRE Trans“, 1956, № 2.

201. Tiljander I. Försök att bestämma inträngningen i källsvetsar med ultraljud, „Svetsen“, № 3, 1959.

202. Trommler H. Sonovisor 2, „Feingerätetechnik“, № 4, 1961.

203. Ultradźwiękowe badanie spoin. Wytczne przeprowadzania badań spoin doczołowych w konstrukcjach stalowych. Polska norma PN-54 M-70055.

204. Willard G. W. Temperature Coefficient of ultrasonic velocity in Solutions. „Journal Acoustic Soc. of America“, № 20, 1948.

205. Wüstenberg H. Bestimmung der Richtcharakteristik von Winkelskopfen für die Ultraschallprüfung am Kontrollkörper nach DIN 54120. „Materialprüfung“, № 9, 1969.

206. Wüstenberg H., Mundry E. The properties of Cylindrical Boreholes as Reference Defects in ultrasonic inspection. IIW, Doc. VC-199-70/OE.

207. Zerstörungsfreie werkstoffprüfung ultraschallprüfung AVG — Diagramm zur Bestimmung der Größe eines Vergleichsreflektors beim Ultraschall — Impuls — Echo — verfahren. DDR. TGL 15003. Blatt 5. Gruppe 300.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
Глава I. Общие сведения об ультразвуковых волнах и методах дефектоскопии	5
1. Интенсивность ультразвука и затухание его в металлах	9
2. Распространение ультразвука	13
3. Методы ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений	28
Глава II. Излучатели и приемники ультразвука	34
1. Электро-акустический тракт ультразвукового дефектоскопа	37
2. Конструкция нормальных искателей	44
3. Конструкция наклонных искателей	47
Глава III. Аппаратура для ультразвукового контроля качества сварных соединений	56
1. Технические требования к ультразвуковым дефектоскопам для контроля качества сварки	56
2. Функциональная схема современного ультразвукового дефектоскопа	66
3. Основные узлы ультразвуковых дефектоскопов	69
4. Ультразвуковые дефектоскопы	84
5. Ультразвуковые структурные анализаторы	114
6. Тест-образцы, эталоны и координатные линейки	115
7. Вспомогательные приспособления	122
Глава IV. Акустический тракт эхо-дефектоскопа	123
1. Поле излучения — приема нормального искателя	124
2. Поле излучения — приема наклонного искателя	130
3. Отражение от дефектов при контроле нормальным искателем	134
4. Отражение от дефектов при контроле наклонным искателем	147
5. Изменение амплитуды сигнала при перемещении нормального искателя по поверхности изделия	154
6. Структурные помехи и выбор параметров акустического тракта	156
Глава V. Акустический тракт при контроле зеркально-теневым методом	162
1. Способы зеркально-теневого метода	162
2. Анализ акустического тракта	163
3. Виды помех и помехоустойчивость	170
4. Изменение амплитуды донного импульса при перемещении искателя по поверхности изделия	175

Глава VI. Основные параметры ультразвукового контроля сварных соединений	176
1. Определение основных параметров	176
2. Длина волны и частота	182
3. Чувствительность	183
4. Направленность поля искателя	192
5. Угол ввода луча	208
6. Точность измерения координат отражающих поверхностей	214
7. Мертвая зона и разрешающая способность	224
8. Стандартизация и эталонирование основных параметров	226
9. Определение оптимальных величин основных параметров контроля	245
Глава VII. Общие положения ультразвукового контроля сварных соединений	248
1. Прозвучивание металла шва	248
2. Определение координат дефектов	262
3. Измерение эквивалентных размеров дефектов	266
4. Определение конфигурации и ориентации дефектов	271
5. Критерии оценки качества сварных соединений по данным ультразвукового контроля	300
6. Сочетание метода ультразвуковой дефектоскопии с другими методами контроля	304
7. Организация ультразвукового контроля	310
Глава VIII. Ультразвуковая дефектоскопия стыковых сварных соединений	313
1. Особенности контроля стыковых соединений большой толщины	321
2. Особенности контроля стыковых швов малой толщины	323
3. Контроль стыковых сварных швов в конструкциях железнодорожного транспорта	326
4. Контроль стыковых соединений в паропроводах и котлах	331
5. Контроль стыковых сварных соединений из алюминиевых и медных сплавов	333
Глава IX. Ультразвуковая дефектоскопия угловых сварных швов	336
1. Контроль угловых швов соединений со сквозным проплавлением	340
2. Контроль угловых швов соединений с технологическим непроваром	342
3. Контроль швов соединений внахлестку	347
Глава X. Ультразвуковая дефектоскопия швов контактной сварки	349
1. Контроль сварных стыков рельсов	350
2. Контроль сварных стыков инструмента и штоков	357
3. Контроль сварных точек	358
4. Контроль сварных заклепок	360
Глава XI. Принципы автоматического ультразвукового контроля сварных соединений	363
1. Системы ввода ультразвуковых колебаний и контроля за акустическим контактом при механизированном сканировании	369
2. Система регистрации результатов контроля швов	375

3. Особенности временной селекции эхо-сигналов и измерения координат дефектов при автоматическом контроле
4. Скорость сканирования при автоматическом ультразвуковом контроле
5. Оценка качества сварного соединения при автоматическом контроле

Глава XII. Системы автоматического контроля сварных соединений

1. Системы автоматического контроля методом продольного и поперечного перемещения искателя
 2. Системы автоматического контроля методом продольно-поперечного перемещения искателя
 3. Системы автоматического контроля методом бегающего луча
 4. Системы автоматического контроля методом качающегося луча
- Л и т е р а т у р а

Анатолий Константинович Гурвич, канд. техн. наук,
Игорь Николаевич Ермолов, докт. техн. наук

Ультразвуковой контроль сварных швов

Редактор инж. М. Г. Ведмеденко
Редакторы издательства инж. П. Ф. Боброва,
В. С. Козаченко
Переплет художника Е. В. Попова
Художественные редакторы О. Ф. Кузьменко,
В. И. Глазунов
Технический редактор Н. И. Старченкова
Корректор Л. Д. Шупик

Сдано в набор 17. IX. 1971 г. Подписано к печати 21. VIII. 1972 г. Формат бумаги $84 \times 108^{1/32}$. Бумага типографская № 1.
Объем: 14,375 физ. л.; 24,15 усл. л.; 24,87 уч.-изд. л.
Тираж 6700. БФ 02755.

Зак. № 1-324.
Цена 1 руб. 36 коп.

Издательство «Техніка», 252601, Киев, 4ГСП, Пушкинская, 28

Книжная ф-ка им М. В. Фрунзе Комитета по печати при Совете Министров УССР, Харьков, Донец-Захаржевская, 6/8