

А. К. Турвич



УЛЬТРА  
ЗВУКОВАЯ  
ДЕФЕКТОСКОПИЯ  
СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ



Государственное издательство  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ УССР  
Киев - 1963



В книге даны необходимые сведения об основах ультразвуковой дефектоскопии, рассмотрены методика контроля различных сварных швов, а также вопросы эксплуатации и конструирования специализированной аппаратуры. Приведены методические указания, которые могут быть использованы в производственной практике.

Особое внимание уделено стандартизации метода ультразвуковой дефектоскопии и сочетанию его с другими методами контроля, а также проблеме автоматизации процесса ультразвукового контроля и регистрации изображений выявленных дефектов.

Книга предназначена для работников промышленности, применяющих или осваивающих метод ультразвукового контроля качества сварки, а также для инженеров и техников, занимающихся разработкой методик и аппаратуры для ручного и автоматического ультразвукового контроля.

Рецензент *В. А. Цечаль*, инженер

Редакция литературы по вопросам машиностроения  
и транспорта

Зав. редакцией инж. *М. А. Василенко*

## Предисловие

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

Претворение в жизнь программы построения коммунизма в СССР, принятой XXII съездом КПСС, требует дальнейшего значительного развития сварочной техники.

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 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 соединений требует создания специальной аппаратуры и разработки методик контроля. Решение указанных задач усложняется тем, что как в СССР, так и за рубежом отсутствуют литературные пособия, систематизирующие основные вопросы применения и дальнейшего развития ультразвуковой дефектоскопии 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 упомянутые методы допол-



няют 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 рассмотрены некоторые предложения по стандартизации метода ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений, повышающие достоверность контроля.

Объективность, высокая надежность и производительность ультразвукового контроля могут быть достигнуты механизацией и автоматизацией процесса дефектоскопии с регистрацией результатов в документе контроля. Этой весьма актуальной и мало освещенной проблеме автор уделил особое внимание. При этом даны описания некоторых новых методов, не нашедших еще широкого применения в практике. Это позволит читателям более ясно представить себе намечаемые пути развития ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений и натолкнет их на новые пути развития этого метода.

В книге широко использованы материалы исследований, выполненных автором или под его руководством в лаборатории неразрушающих методов контроля сварных соединений на железнодорожном транспорте (НИИМостов ЛИИЖТ), 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. Большинство этих вопросов освещено в литературе, приведенной в конце книги.

Автор благодарит товарищей по работе, выполнивших ряд исследований и оказавших помощь в подготовке книги.

Все замечания, касающиеся содержания книги, просим направлять по адресу: Киев, 4, Пушкинская, 28, Гостехиздат УССР.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ

### 1. ТИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН И СКОРОСТЬ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

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.

При дефектоскопии сварных соединений в основном используют поперечные и продольные ультразвуковые волны. Каждому типу волны свойственно определенное движение частиц среды, в которой она распространяется. В продольной волне (волне сжатия и расширения) частицы колеблются вдоль направления распространения волны, а в поперечной волне (волне сдвига) — перпендикулярно.

В твердых телах могут распространяться волны любого типа, а в жидких и газообразных — только продольные волны. Скорость распространения определяется физическими свойствами среды и типом волны\*. Так, например, скорость распространения поперечных волн  $C_{\text{п}}$  в металлах составляет приблизительно половину скорости распространения продольных волн  $C_{\text{пр}}$ . Помимо продольных и поперечных волн существуют пластиночные волны (волны

\* Скорость распространения продольных и поперечных волн в твердых телах, размеры которых значительно больше длины волны не зависит от частоты, т. е. дисперсия отсутствует.



Лэмба) и поверхностные волны, где смещение частиц происходит как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Пластиночные волны в последнее время пытаются использовать для контроля стыковых соединений небольшой толщины. Скорость распространения этих волн  $C_{л}$  в отличие от скорости распространения продольных и поперечных волн зависит от частоты колебаний и толщины металла. Зависимость скорости распространения пластиночной волны различной моды в стали от произведения частоты колебаний на толщину листа представлена на рис. 1.

Поверхностные волны (волны Рэлея), распространяющиеся в поверхностном слое толщиной примерно равной длине волны, для контроля сварных соединений практического применения не нашли.

Таблица 1

Скорость распространения и длина ультразвуковых волн в различных средах и акустическое сопротивление этих сред

Вещество	Скорость ультразвука $C$ , м/сек		Длина волны $\lambda$ , мм, при частоте 2,5 Мгц		Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное акустическое сопротивление $\rho C \times 10^4$ , г/см <sup>2</sup> ·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 . . . . .	12500	7200	5,0	2,88	1,85	2,3	1,33
Вольфрам . . . . .	5460	2620	2,17	1,04	19,1	10,4	5,00
Вода . . . . .	1500	—	0,56	—	1,0	0,15	—
Воздух . . . . .	330	—	0,13	—	0,0012	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 . . . . .	4600	2200	1,84	0,88	1,7	0,78	0,38
Масло трансформаторное	1425	—	0,57	—	0,895	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 . . . . .	5900	3260	2,36	1,3	7,8	4,6	2,52
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	—



Рис. 1. Графики, характеризующие условия возбуждения пластиночных волн в листах стали:  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  — симметричная мода;  $s_0, s_1, s_2, s_3, s_4$  — асимметричная мода;  $\beta$  — угол падения продольной волны.



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  $\lambda$  связана со скоростью распространения и частотой колебаний соотношением

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

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

В табл. 1 приведены данные о скорости и длине волны в некоторых веществах, использующихся или встречающихся при дефектоскопии сварных соединений.

## 2. ИНТЕНСИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА И ЗАТУХАНИЕ ЕГО В МЕТАЛЛАХ

Ультразвуковая волна, распространяющаяся в среде, обладает определенной энергией. Количество энергии, переносимой волной за 1 сек через 1 см<sup>2</sup> площади, перпендикулярной к направлению распространения, называется интенсивностью ультразвука. Зная интенсивность ультразвука и поперечное сечение пучка, легко определить мощность ультразвуковой волны.

Известно, что энергия упругих колебаний пропорциональна квадрату амплитуды упругого смещения и квадрату частоты. Поэтому, при прочих равных условиях, интенсивность волны растет с увеличением частоты колебаний. При постоянной частоте амплитуда колебаний частиц будет тем значительнее, чем больше интенсивность ультразвука.

Колебательное движение частиц вызывает появление давления, называемого акустическим (звуковым). Акустическое давление в синусоидальной плоской волне определяется выражением:

$$P = \sqrt{2I\rho C}, \quad (2)$$

где  $P$  — амплитуда переменного акустического давления, бар;

$I$  — интенсивность, эрг/сек·см<sup>2</sup>;

$\rho$  — плотность среды, г/см<sup>3</sup>;

$C$  — скорость распространения волны, см/сек.

Произведение скорости  $C$  ультразвука на плотность  $\rho$  среды, в которой он распространяется, называется удельным акустическим сопротивлением. Значения удельных сопротивлений, во многом характеризующие акустические свойства вещества, приведены в табл. 1.

По мере распространения ультразвуковой волны интенсивность ее падает. Ослабление интенсивности связано с расхождением волны, отражением от неоднородностей среды (рассеянием) и поглощением, при котором механическая энергия колебаний частиц переходит в тепловую. Затухание ультразвуковых колебаний, применяемых при дефектоскопии сварных соединений, определяется в основном рассеянием ультразвука на границах зерен. Рассеяние в данном металле зависит от соотношения длины волны ультразвука и среднего диаметра зерна.

Снижение интенсивности ультразвука вследствие его затухания происходит по экспоненциальному закону:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-2\alpha x}, \quad (3)$$

где  $I_x$  — интенсивность ультразвука на расстоянии  $x$  от места, где интенсивность равна  $I_0$ ;

$\alpha$  — коэффициент затухания, размерность которого 1/см.

Чем больше коэффициент затухания, тем значительнее ослабление ультразвука, а следовательно, тем меньше глубина проникновения его. Затухание быстро растет с повышением частоты.

Затухание ультразвука в контролируемом металле во многом определяет максимальную частоту колебаний, используемых при дефектоскопии. Значения коэффициента затухания обычно определяют экспериментальным путем. Для оценки затухания ультразвука в различных зонах сварного соединения может быть использована методика, предложенная А. З. Райхманом [48].

Приближенные значения коэффициентов затухания продольных колебаний в различных зонах сварных соединений приведены в табл. 2.

Коэффициенты затухания могут изменяться в зависимости от технологии сварки и режимов термообработки. Из табл. 2 видно, что коэффициент затухания максимален в переходной зоне (зоне термического влияния) и возрас-



Таблица 2

Коэффициенты затухания продольных ультразвуковых колебаний в различных зонах сварных соединений

Вид сварки, марка металла, термообработка	Зона сварного соединения	Коэффициент затухания $\gamma$ при частоте колебаний, Мгц		
		2,5	1,8	0,8
Электрошлаковая сварка. Сталь 22К (до термообработки)	Основной металл	0,046	0,039	0,023
	Переходная зона	0,085	0,064	0,0254
	Наплавленный металл	0,054	0,0476	0,0247
Электрошлаковая сварка. Сталь 22К (после термообработки)	Основной металл	0,04	0,03	0,0215
	Переходная зона	0,075	0,06	0,0223
	Наплавленный металл	0,054	0,04	0,0215
Многослойная сварка из перлитной стали 30ХМ (после стабилизации)	Основной металл	0,0207	0,0113	—
	Переходная зона	0,048	0,0334	—
	Наплавленный металл	0,021	0,0145	—
Многослойная сварка из аустенитной стали ЭИ405 (после стабилизации)	Основной металл	—	—	0,0148
	Переходная зона	—	—	0,0247
	Наплавленный металл	—	—	0,055
Аустенитная сталь со средним диаметром зерна 2—3 мм	Наплавленный металл	0,5	0,48	0,35
Сталь со средним диаметром зерна 0,25 мм	Основной металл	0,03	0,02	0,02

тает с увеличением частоты колебаний. При некоторых частотах затухание может стать настолько большим, что ультразвуковые колебания полностью рассеются в основном металле и переходной зоне, не достигнув металла шва.

### 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

В однородных металлах ультразвуковые колебания могут распространяться в виде направленного пучка. Направленность тем выше, чем больше размеры излучателя по отношению к длине волны (рис. 2). Вблизи от излучателя, на участке, называемом ближней зоной или зоной Френеля, ультразвуковой пучок оказывается нерасходящимся (прожекторная зона). Протяженность ближней зоны  $L$  может быть вычислена по формуле

$$L = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (4)$$

где  $L$  — протяженность ближней зоны;

$D$  — диаметр излучателя;

$\lambda$  — длина волны.

На расстоянии от излучателя, равном примерно  $L$ , начинается постепенное расхождение лучей и волна переходит в сферическую. Поле приобретает форму усеченного конуса, половина угла раствора которого

$$\varphi \approx \arcsin 1,2 \frac{\lambda}{D}. \quad (5)$$



Рис. 3. Диаграмма направленности излучателя:

1 — излучатель; 2 — боковой лепесток; 3 — основной лепесток.

При частоте продольных колебаний 2,5 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 плексиглазе равна приблизительно 35 мм, а величина угла расхождения — 6°.

Следует отметить, что в ближней зоне ультразвукового поля энергия как вдоль пучка, так и по его сечению распределена неравномерно. В дальней зоне плотность энергии падает обратно пропорционально квадрату расстояния от излучателя. Угловую зависимость интенсивности

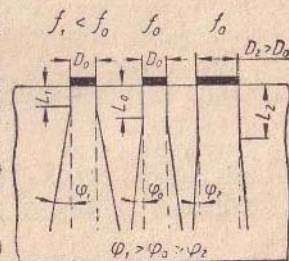


Рис. 2. Схема распространения ультразвукового пучка.



излучения в дальней зоне удобно представлять в виде графика в полярных координатах. Такой график называется диаграммой направленности (рис. 3).

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

$$R = \left( \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2, \quad (6)$$

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

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. 3.

Приведенные значения коэффициентов отражения справедливы лишь при условии, что размеры несплошностей

Таблица 3

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	0,23	28	>15	—	—

(дефектов) много больше длины волны. Если же размеры несплошности значительно меньше длины волны, то волны огибают ее без существенного отражения. Для получения заметного отражения достаточно, чтобы размеры несплошности в направлении, перпендикулярном ультразвуковому лучу, были соизмеримы с длиной волны.

При малой толщине несплошности доля отраженной от нее энергии определяется также величиной раскрытия в направлении распространения волны. Так, если в среде с акустическим сопротивлением  $\rho_1 C_1$  имеется тонкий слой включения из материала с акустическим сопротивлением  $\rho_2 C_2$ , то коэффициент отражения при нормальном падении звуковой волны\*

$$R_n = \frac{\left( \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1} \right)^2}{4 \operatorname{ctg}^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda_2} + \left( \frac{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \right)^2}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — толщина слоя включения;  
 $\lambda_2$  — длина волны в слое.

Из уравнения следует, что отражение от тонкого слоя зависит от отношения длины волны к толщине слоя и тем эффективней, чем больше различие акустических сопротивлений слоя и окружающей среды. На рис. 4 приведены графики зависимости коэффициента отражения  $R_n$  от отношения толщины несплошности к длине волны в ней, рассчитанные по уравнениям (1) и (7). Из них следует, что трещина в стали, заполненная воздухом и имеющая раскрытие всего лишь в 1 мк, должна отражать 90% энергии падающих 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.

Переход ультразвуковых колебаний из одной среды в

\* Поперечные размеры несплошности значительно больше длины волны.

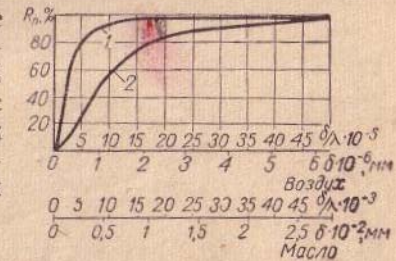


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения  $R_n$  ультразвука от тонкого слоя  $\delta$  воздуха и масла в стали при различных соотношениях толщины слоя и длины волны в нем ( $f = 2,5$  Мгц):  
 1 — воздух; 2 — масло.



другую при падении их под углом к границе раздела со-  
провождается как отражением и преломлением, так и транс-  
формацией (расщеплением) волны. При этом распределе-  
ние энергии между отраженными и преломленными волнами  
определяется соотношением акустических сопротивлений  
сред и в сильной степени зависит от угла падения.

Так если из одной твердой среды на границу с другой  
твердой средой падает под углом  $\beta$  продольная волна  $C_{пр}$   
(рис. 5, а), то в общем случае возникают еще четыре волны:

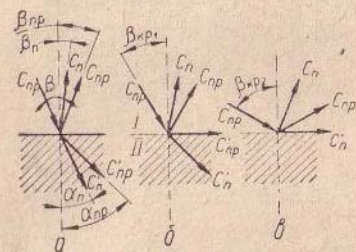


Рис. 5. Отражение и преломле-  
ние продольной волны на гра-  
нице раздела двух твердых  
сред.

две преломленные (продоль-  
ная  $C'_{пр}$  и поперечная  $C'_n$ )  
и две отраженные (продоль-  
ная  $C_{пр}$  и поперечная  $C_n$ ).

Углы преломления и отра-  
жения волн связаны с углом  
падения выражениями

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \alpha_{пр}}{C_{пр}} &= \frac{\sin \alpha_n}{C_n} = \frac{\sin \beta}{C_{пр}}; \\ \frac{\sin \beta_{пр}}{C_n} &= \frac{\sin \beta}{C_{пр}}; \beta_{пр} = \beta, \end{aligned} \right\} (8)$$

- где  $C_{пр}, C_n$  — скорости распространения продольной и по-  
перечной волны в первой среде;  
 $C'_{пр}, C'_n$  — скорости распространения продольной и по-  
перечной волны во второй среде;  
 $\alpha_{пр}, \alpha_n$  — углы преломления продольной и поперечной  
волны;  
 $\beta_{пр}, \beta_n$  — углы отражения продольной и поперечной  
волны.

По мере увеличения угла падения  $\beta$ , начиная с некото-  
рого его значения  $\beta_{кр1}$  (рис. 5, б), называемого пер-  
вым критическим углом, преломленная продольная  
волна не будет проникать во вторую среду ( $\alpha_{пр} = 90^\circ$ )\*.

При дальнейшем увеличении угла наступает момент  
(рис. 5, в), когда поперечная волна начинает скользить  
вдоль поверхности раздела; соответствующий угол  $\beta_{кр2}$   
падения называется вторым критическим  
углом.

\* Предполагается, что скорость распространения колебаний в  
первой среде больше скорости распространения во второй среде.

Значения критических углов удовлетворяют равенствам

$$\sin \beta_{кр1} = \frac{C_{пр}}{C_n}; \sin \beta_{кр2} = \frac{C_{пр}}{C'_n}. \quad (9)$$

При углах падения, меньших, чем второй критический  
угол, и больших, чем первый, во второй среде возникает  
лишь поперечная волна. Так, например, при падении про-  
дольной волны из оргстекла (плексигла-  
са) на сталь под углами, лежащими в

пределах между  $\beta_{кр1} \approx 29^\circ$  и  $\beta_{кр2} \approx 61^\circ$ ,  
в стали возбуждается только поперечная  
волна. Интенсивность этой волны зави-  
сит от величины угла падения  $\beta$ . На  
рис. 6 представлены кривые, характери-  
зующие зависимость интенсивности пре-  
ломленной поперечной волны в стали  
и дюралюминии от угла падения про-  
дольной волны. Кривые получены экс-  
периментально на установке, схема ко-  
торой приведена на рис. 7. Результаты  
эксперимента хорошо согласуются с тео-  
ретическими расчетами, выполненными  
Д. Б. Диановым [27].

Следует отметить, что при падении  
продольной волны под углом к поверх-  
ности листа в последнем может возник-  
нуть пластинчатая волна. Для того чтобы возбудить в  
листе данной толщины  $\delta$  пластинчатую волну определенной  
моды при частоте колеба-  
ний  $f$ , достаточно направ-  
ить на лист продольную  
волну под углом

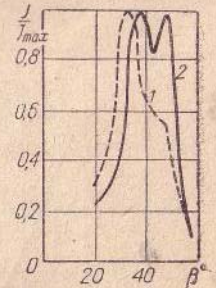


Рис. 6. Зависимость  
интенсивности по-  
перечной волны в  
стали (1) и дюр-  
алюминии (2) от  
угла падения про-  
дольной волны в  
плексигласте.

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

где  $C_{пр}$  — скорость распро-  
странения продольной волны в материале, гранича-  
щем с листом;

$C_n$  — скорость распространения пластинчатой волны  
заданной моды, определяемая по графикам рис. 1  
в зависимости от величины  $\delta \cdot f$ .

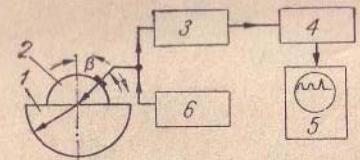
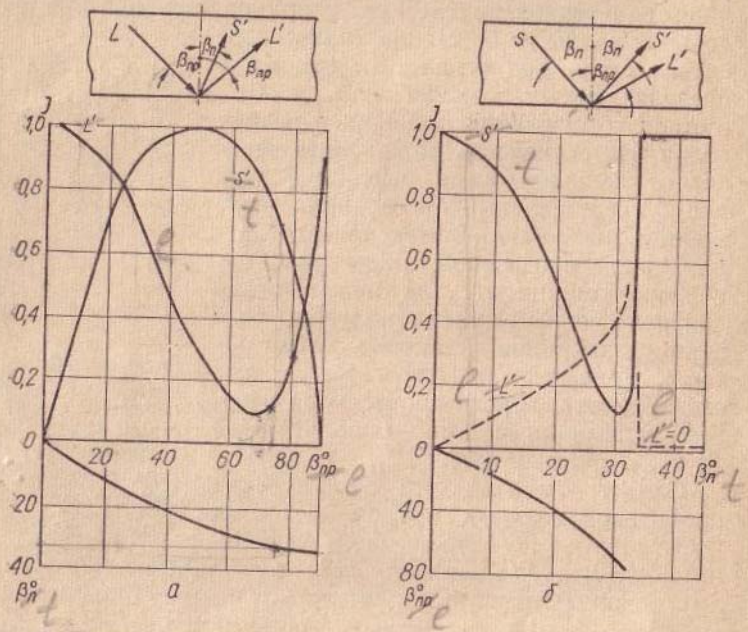


Рис. 7. Схема экспериментальной  
установки:  
1 — сталь или дюралюминий; 2 —  
плексиглас; 3 — усилитель; 4 — детек-  
тор; 5 — осциллоскоп; 6 — генератор.



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

Трансформация упругой волны, наблюдаемая при отражении ее от границы металл — воздух, в частности от внут-



Фиг. 8. Графики амплитуды  $J$  продольной  $L'$  и поперечной  $S'$  волн, отраженных в стали от поверхности, граничащей с воздухом:

$a$  — при изменении угла падения продольной волны  $L$ ;  $b$  — при изменении угла падения поперечной волны  $S$ .

ренных дефектов или от поверхности изделия, иллюстрируется рис. 8, 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  $30^\circ$ , около 90% энергии отражается в виде продольной волны и лишь 10% — в виде поперечной волны.

Естественно, что изложенные выше соотношения справедливы для гладких (зеркальных) поверхностей. К зер-

кальным поверхностям можно отнести поверхности, у которых высота неровностей во 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 амплитуда эхо-сигнала от неровной поверхности, чем эхо-сигнала от зеркальной при падении ультразвуковой волны перпендикулярно к границе раздела.

В то же время при падении ультразвукового луча под некоторым углом к границе раздела энергия волны, отраженной в направлении к излучателю, будет тем больше, чем значительнее неровности отражающей поверхности.

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

#### 4. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛАХ

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний при дефектоскопии металлов 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, оказывается возможным с помощью пьезоэлектрической пластины преобразовывать электрические колебания в ультразвуковые и, наоборот, ультразвуковые в электрические. Наибольший эффект преобразования удается получить в том случае, когда собственная частота пластины соответствует частоте прикладываемого переменного напряжения или же частоте воздействующих ультразвуковых колебаний. При колебаниях пластины на собственной частоте по толщине ее укладывается одна полу-волна, т. е.

$$\delta = \frac{\lambda}{2} = \frac{C_{\text{пр}}}{2f_0}, \quad (10)$$

где  $\delta$  — толщина пластины;

$C_{\text{пр}}$  — скорость распространения продольной волны в материале пластины;

$f_0$  — собственная частота пластины.

Из соотношения (10) может быть определена собственная частота пластины

$$f_0 = \frac{C_{\text{пр}}}{2\delta} = \frac{K}{\delta}, \quad (11)$$

где  $K$  — коэффициент колебаний, численно равный собственной частоте пластины толщиной 1 мм.

Коэффициент колебаний зависит от материала пластины, ее формы и размеров. Поэтому его величину обычно определяют опытным путем. Так, коэффициент колебаний кварца приблизительно равен  $2,87 \text{ Мгц} \cdot \text{мм}$ , а титаната бария —  $2,2\text{—}2,65 \text{ Мгц} \cdot \text{мм}$ . Зная коэффициент колебаний, можно рассчитать необходимую толщину пьезоэлектрической пластины для излучения или приема ультразвуковых колебаний заданной частоты.

Размеры пластины в ее плоскости выбирают из условий обеспечения необходимой диаграммы направленности.

Пьезоэлектрические свойства кварцевых пластин весьма стабильны и практически не зависят от температуры. Только при температурах порядка  $+300^\circ\text{C}$  пьезоэлектрический эффект начинает убывать. Однако при понижении температуры кварц восстанавливает свои свойства.

Значительно меньшая стабильность пьезоэлектрических и диэлектрических свойств наблюдается у титаната бария. Так, например, при измерении параметров 150 пластин из одной партии оказалось, что их емкость колеблется в

пределах от 1040 до 1350 пф, а собственная частота от 2,3 до 2,7 Мгц. Параметры пластины существенно изменяются с температурой. Измерения показали, что при увеличении температуры от  $-15$  до  $+50^\circ\text{C}$  емкость пластины титаната бария толщиной 1 мм и диаметром 20 мм изменяется в пределах 30%, а ее собственная частота — приблизительно на 5%. При нагревании пластины до  $100\text{—}120^\circ\text{C}$  титанат бария теряет пьезоэлектрические свойства. Эти свойства могут быть восстановлены лишь повторной поляризацией.

Пьезоэлектрические пластины для предупреждения от механических повреждений и износа размещают в специальных устройствах, называемые искательными головками и или щупами. Щупы, предназначенные для ввода волны в направлении, перпендикулярном к поверхности контролируемого объекта, принято называть прямыми, а для ввода под некоторым углом — наклонными или призматическими.

Ультразвуковые колебания не могут быть введены в контролируемое изделие, если между ним и искательной головкой имеется прослойка воздуха, т. е. отсутствует акустический контакт. Обычно акустический контакт обеспечивается заполнением контактирующей жидкостью пространства между излучающей плоскостью искательной головки и поверхностью металла. При этом щуп может соприкоснуться с изделием (контактный метод) или находиться на некотором расстоянии от него (иммерсионный метод). Метод иммерсионного ввода ультразвука используют в основном при механизированном или автоматизированном контроле.



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 1. 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. 3 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 контролируемом шве могут быть применены как «теневой» метод, так и метод «отражений». Оба метода ультразвукового контроля имеют свои разновидности в зависимости от характера излучения (непрерывное, импульсное) и схемы включения искательных головок (щупов).

В зависимости от количества щупов и способа их включения в схему ультразвуковые дефектоскопы подразделяются на однощуповые, двухщуповые и одно-двухщуповые.

В однощуповом дефектоскопе один и тот же щуп служит как для передачи, так и для приема ультразвуковых импульсов.

В двухщуповом дефектоскопе функции передачи и приема упругих колебаний разделены между двумя щупами: передающим и приемным.

В одно-двухщуповом дефектоскопе два щупа включены параллельно, благодаря чему каждый щуп в отдельности выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема их отражений, а также отражений зондирующих импульсов, излучаемых вторым щупом.

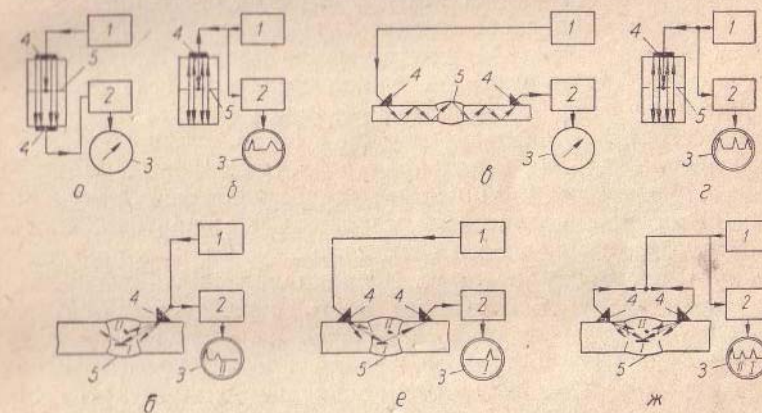


Рис. 9. Принципиальные схемы методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений:

*а* — двухщуповым дефектоскопом с прямыми щупами, работающим по «теневому» методу с непрерывным или импульсным излучением (дефект обнаруживается по уменьшению интенсивности прошедших колебаний); *б* — однощуповым дефектоскопом с прямым щупом, работающим по «теневому» методу с импульсным излучением (дефект обнаруживается по уменьшению интенсивности отражения от противоположной поверхности («донного» отражения)); *в* — двухщуповым дефектоскопом с призматическими щупами, работающим по «теневому» методу с непрерывным или импульсным излучением (дефект обнаруживается по уменьшению интенсивности прошедших колебаний); *г* — однощуповым дефектоскопом с прямым щупом, работающим по методу «отражений» (признаком дефекта является возникновение на экране электронно-лучевой трубки отраженного от него импульса); *д* — однощуповым дефектоскопом с призматическим щупом, работающим по методу «отражений»; *е* — двухщуповым дефектоскопом с призматическими щупами, работающим по методу «отражений»; *ж* — одно-двухщуповым дефектоскопом с призматическими щупами, работающим по методу «отражений»; 1 — генератор, 2 — усилитель, 3 — индикатор, 4 — щуп, 5 — шов.

Однощуповая и одно-двухщуповая схемы применяются лишь при импульсном излучении ультразвука.

Классификация используемых в настоящее время методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений в зависимости от характера излучения и схемы включения щупов рассмотрена автором в работе [6]. Принципиальные схемы этих методов приведены на рис. 9.



«Теневой» метод ультразвуковой дефектоскопии, как показывают исследования, слишком сложен для использования его в производственных условиях при контроле качества сварки. Показания и чувствительность этого метода зависят от ряда факторов, в том числе от:

- а) качества акустического контакта щупов с контролируемым объектом;
- б) взаимного расположения щупов;
- в) формы поверхности прозвучиваемой части шва.

Более совершенным является метод «отражений», основанный на прозвучивании металла шва импульсами ультразвуковых колебаний и регистрации отражений этих импульсов от дефектов. Большинство сварных соединений удобнее всего прозвучивать с помощью щупа, служащего как для излучения, так и для приема ультразвуковых импульсов. При применении призматического искателя, включенного по однощуповой схеме, отраженные от противоположной плоской поверхности металла колебания, как правило, уходят в сторону от щупа. Однако при наличии грубых неровностей на поверхности часть отраженных от них колебаний может вернуться обратно к щупу, вызвав возникновение эхо-импульсов, аналогичных эхо-импульсам от дефектов. Очевидно, что появление эхо-импульсов 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.

Длительные экспериментальные исследования показали, что наиболее удобным и надежным для контроля швов является метод импульсной 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 многих видов сварных соединений. Для определения координат отражающей поверхности в дефектоскопах предусматриваются специальные глубиномеры.

## 2. ИСКАТЕЛЬНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Надежность контроля, чувствительность и разрешающая способность дефектоскопа во многом зависят от конструкции и качества сборки искательных головок. При контроле большинства сварных соединений применяют призматические искательные головки (щупы).

Прямые щупы используют весьма редко. Пьезоэлектрическая пластина в прямых щупах обычно защищена от механических повреждений доньшком из металла или пластмассы (рис. 10). Акустический контакт между пьезоэлектрической пластиной и доньшком создается за счет заполнения пространства между ними тонким слоем минерального масла или путем приклеивания (припаивания) пластины к доньшку.

Обратная сторона пластины контактирует с демпфером, основное назначение которого заключается в увеличении затухания собственных колебаний пластины после воздействия на нее возбуждающего сигнала. Акустические свойства доньшка и демпфера, а также промежуточных слоев минерального масла существенно влияют на резонансные свойства щупа и коэффициент передачи упругих колебаний пьезопреобразователя в контролируемую среду.

Пьезоэлектрические пластины титаната бария обычно защищают доньшком из нержавеющей стали. Естественно, что в доньшке возникают многократные отражения ультразвуковых колебаний, которые влияют на частотные характеристики искательных головок, ухудшая работу прибора. Для снижения влияния переходных слоев применяют доньшки весьма малой толщины (0,1—0,25 мм). При этом частотные характеристики щупа существенно зависят от толщины и акустических параметров доньшка и слоев контактирующей жидкости.

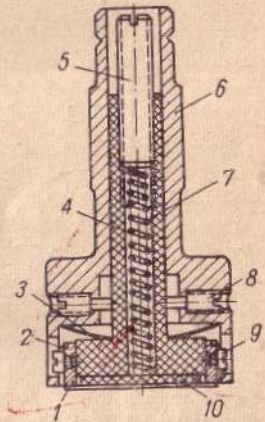


Рис. 10. Прямой щуп:  
1 — кольцо с дном; 2, 7 — пружины контактные; 3 — пружина плоская; 4 — втулка изоляционная; 5 — винт контактный; 6 — корпус; 8 — винты; 9 — винты ограничители движения кольца; 10 — пьезоэлемент.



На рис. 11 приведены частотные характеристики интенсивности излучения титанато-бариевого преобразователя, рассчитанные Д. Б. Диановым для случая излучения продольной волны в сталь через слоистую систему: трансформаторное масло — стальное доньшко — трансформаторное масло. Из рис. 11 видно, что наличие переходных слоев

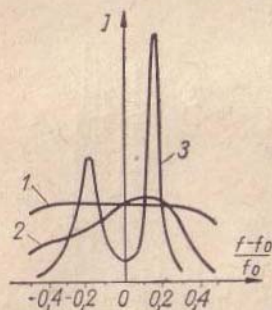


Рис. 11. Частотные характеристики интенсивности излучения титанато-бариевого пьезопреобразователя в сталь через три переходных слоя (собственная частота преобразователя  $f_0 = 2,5$  МГц): 1 — излучение непосредственно в сталь при отсутствии переходных слоев; 2 — излучение через 3 слоя (трансформаторное масло толщиной  $10^{-2}$  мм, стальное доньшко толщиной 0,25 мм, трансформаторное масло толщиной  $10^{-2}$  мм); 3 — излучение через те же слои (толщина слоев масла  $16 \cdot 10^{-2}$  мм).

Для демпфирования пьезопреобразователей как прямых, так и призматических щупов используют материалы, сильно поглощающие ультразвуковые колебания и обладающие вместе с тем высоким удельным акустическим сопротивлением. Эффект демпфирования тем значительнее, чем выше затухание ультразвука в демпфере и чем больше его акустическое сопротивление.

Следует отметить, что наличие демпфера приводит также к уменьшению чувствительности щупа. Интенсивность

приводит к резкому изменению вида частотной характеристики и к повышению интенсивности излучения на частотах, более высоких, чем собственная частота пластины.

Сдвиг резонансной частоты щупа может достигать значительной величины и во многом определяется толщиной контактирующего слоя, а следовательно, и чистотой обработки поверхности контролируемого изделия. Поэтому прямые щупы удовлетворительно работают лишь при дефектоскопии изделий, поверхность которых обработана до чистоты  $\nabla 5$  и выше.

Применение пластмассовых доньшек (из органического стекла, стиролфлекса, эбонита и т. п.) взамен стальных несколько снижает чувствительность при работе по поверхностям, обработанным по классу  $\nabla 6$  и выше, но зато обеспечивает более устойчивую работу дефектоскопа по грубообработанным и необработанным поверхностям.

излучения ультразвука в сталь при применении демпфера с высоким акустическим сопротивлением может составлять 50% и менее от интенсивности ультразвука, излучаемого без демпфера. Поэтому при подборе материала для демпфирования следует стремиться обеспечить максимально возможное для контроля данного сварного соединения время свободных колебаний пьезопреобразователя. Весьма перспективным может оказаться при этом применение для демпфирования резины, содержащей порошок вольфрама. Как известно, резина весьма сильно поглощает ультразвуковые колебания, а вольфрам обладает самым высоким удельным акустическим сопротивлением. Регулируя соотношение резины и вольфрама, очевидно, можно будет получить материал с оптимальными для демпфирования свойствами.

Естественно, что прямые щупы, весьма чувствительные к качеству обработки поверхности, не могут быть использованы при дефектоскопии сварных швов, обычно имеющих грубую и неплоскую поверхность. Этими щупами невозможно даже при снятии валика «усиления» обнаружить большинство опасных дефектов, имеющих, как правило, вертикальную по отношению к плоскости шва ориентацию. Поэтому такие швы прозвучивают с помощью наклонных (призматических) щупов, излучающих поперечные волны. При этом щуп располагают на поверхности основного металла, имеющей в большинстве случаев удовлетворительное качество.

Для ввода поперечных волн в шов обычно используют эффект расщепления продольной волны при переходе ее из призмы в металл. Угол падения продольной волны лежит в пределах между первым и вторым критическими углами, что обеспечивает распространение в металле колебаний одного типа.

При переходе ультразвуковых колебаний в соединение часть энергии отражается в призму и после многократных отражений в ней может вызвать появление ложных сигналов, мешающих контролю. Для уменьшения помех в щупах предусматривают «ловушки», удлиняющие путь отраженной волны и увеличивающие тем самым ее поглощение. Чем меньше коэффициент затухания ультразвука в материале ловушки и чем ниже частота колебаний, тем больше должны быть размеры ловушки, а следовательно, и щупа.



В зависимости от конструкции наклонных искательных головок ввод ультразвуковых колебаний в металл осуществляется:

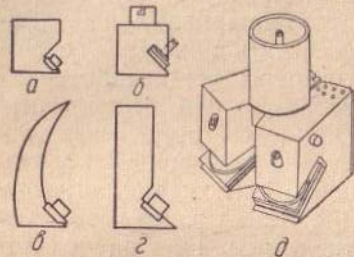


Рис. 12. Наклонные щупы с фиксированным углом ввода луча:

а — конструкции ЦНИИТМАШ; б — конструкции ЛЭТИ на частоту 2,5 Мгц; в — английской фирмы «Ультрасоноскоп»; г — фирмы «Брансон Инструмент»; д — конструкции ЛЭТИ на частоту 0,8 Мгц.

Призмы искательных головок с фиксированным углом ввода колебаний обычно изготовляют из пластмассы. В настоящее время широко применяют призмы из органического стекла (плексигласа). Форма (рис. 12) и размеры (табл. 4) их весьма различны. Из табл. 4 видно, что оптимальные габариты головки значительно возрастают с уменьшением частоты колебаний. Попытки создать компакт-

1) только под одним определенным углом к поверхности;

2) под различными, вручную регулируемые (в определенных пределах) углами;

3) под автоматически и непрерывно меняющимся углом.

Призмы искательных головок с фиксированным углом ввода колебаний обычно изготовляют из пластмассы. В настоящее время широко применяют призмы из органического стекла (плексигласа). Форма (рис. 12) и размеры

Таблица 4

Параметры призматических щупов системы ЦНИИТМАШ

Угол падения волны (угол призмы) β°	Угол распространения поперечной волны (по данным эксперимента) α°		Размеры, мм							
			1,8 мгц				2,5 мгц			
			Дюралюминий	Сталь	D	d	b	c	D	d
30	40	39	18	22	55	38	12	13	35	27
40	48	50	18	24	55	40	12	15	35	27
50	62	65	18	30	55	45	12	20	35	33

ную, удобную для работы конструкцию призматического щупа с одной приемно-излучающей пьезоэлектрической пластиной на частоту 1 Мгц и менее до настоящего времени не увенчались успехом. Для контроля сварных соединений на частотах порядка 1 Мгц может быть использован призматический щуп с двумя акустически разделенными пьезоэлектрическими пластинами (передающей и приемной), расположенными в общей плексигласовой призме под определенными углами (рис. 12, д).

Следует отметить, что существенным недостатком щупов с призмами из плексигласа является их недолговечность, обусловленная малой механической прочностью призм. Поэтому в последнее время ищут пути замены плексигласа другими более износостойкими материалами. Удачным по данным ЦНИИТМАШ оказался поликапронлоктан В, обладающий идентичными с плексигласом акустическими свойствами и превосходящий его по механической прочности более, чем в шесть раз. Если поверхность имеет постоянную кривизну или плоская, то для уменьшения износа целесообразно применять стальные салазки, охватывающие призму; призма в процессе работы притирается до салазок и потом скользит на них.

Выпускаемые в настоящее время дефектоскопы комплектуют набором призматических щупов с различными углами падения волны (углами призмы).

Необходимость прозвучивания одного и того же сварного соединения под различными углами требует применения нескольких щупов с фиксированным углом ввода луча, что усложняет процесс контроля. Избежать смены щупов в процессе контроля возможно при применении наклонной искательной головки с регулируемым углом ввода луча.

На рис. 13 приведены схемы некоторых щупов с переменным углом.

В щупе на частоту 1,2 Мгц конструкции В. С. Соколова и Е. Г. Кардаша (рис. 13, а) передача ультразвука осуществляется через касторовое масло 1 и резиновую мембрану 2. Щуп на частоту 2,5 Мгц конструкции Л. Г. Кузнецова (рис. 13, б) представляет собой плексигласовую 2 коробку, наполненную глицерином 1, обладающим значительным коэффициентом затухания [37]. Он обеспечивает возможность ввода ультразвуковых колебаний в сталь под углом 50—80°; игла-указатель на щупе облегчает процесс прозвучивания стыковых швов. В щупах, изображен-



ных на рис. 13, в, г (соответственно на частоту 1 и 2, 5 МГц), передача ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрической пластины в металл происходит в твердой среде через трехслойную призму из плексигласа 2 и латуни 1 (рис. 13, в) и двухслойную из плексигласа 2 с прослойкой масла 1 (рис. 13, г).

Некоторое неудобство применения перечисленных щупов для контроля сварных швов обусловлено резкой зави-

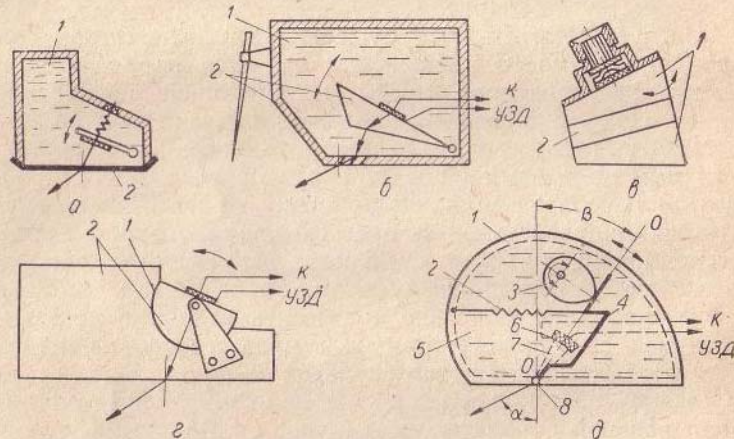


Рис. 13. Схемы наклонных щупов с переменным углом ввода луча.

симостью чувствительности, а также времени пробега импульса в щупе и расстояния точка ввода луча — передняя грань щупа от угла ввода колебаний.

Эти недостатки устранены в щупе конструкции А. К. Гурвича и А. С. Кукли [14], схема которого приведена на рис. 13, д. Излучатель укреплен на планке, ось вращения которой совмещена с дном корпуса щупа таким образом, чтобы ось ультразвукового луча при любом угле падения проходила через ось вращения планки. Щуп состоит из корпуса 1, выполненного из органического стекла (плексигласа) и заполненного проводящей ультразвук жидкостью 5. Внутри корпуса щупа расположен пьезоэлектрический излучатель 6, укрепленный на поворотной планке 7.

Изменение угла  $\beta$  падения ультразвукового луча производится посредством поворота планки 7 с излучателем относительно оси 8, которая совмещена с дном щупа (центром излучения).

С внешней стороны щупа расположена стрелка 4, укрепленная на оси 8 и поворачивающаяся вместе с планкой 7, а также кулачок 3, вращаемый электродвигателем или заводной пружиной. Витая пружина 2 обеспечивает постоянный прижим стрелки 4 к кулачку 3.

Кулачок в процессе своего вращения изменяет величину угла наклона стрелки 4 (угла  $\beta$  падения ультразвукового луча), что приводит к автоматическому непрерывному изменению величины угла  $\alpha$  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  $\beta$  падения ультразвукового луча, при котором скорость изменения угла  $\alpha$  ввода луча в контролируемый материал при данной заполняющей щуп жидкостной среде остается постоянной, т. е. выполняется условие

$$\text{где } \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d}{dt} \arcsin \left( \frac{C_m}{C_{ж}} \cdot \sin \beta \right) = \text{const}, \quad (12)$$

$t$  — время;

$C_m$  — скорость распространения ультразвука в контролируемом материале;

$C_{ж}$  — скорость распространения ультразвука в заполняющей щуп среде.

В целях обеспечения постоянства характеристики направления ультразвукового луча в контролируемом материале и чувствительности щупа при изменении угла ввода луча целесообразно применять систему фокусировки.

Система фокусировки может быть выполнена в виде двояковогнутой пьезоэлектрической пластины, плоской пластины с линзой, рефлектора или «зональной» пластины. Применение фокусирующих систем в наклонных щупах с фиксированным углом ввода луча в некоторых случаях могло бы значительно улучшить разрешающую способность щупов.

Известно, что фокусирующая система концентрирует большую часть ультразвуковой энергии в фокальном пятне, радиус которого

$$r \approx 0,61 \frac{\lambda F}{R}, \quad (13)$$

где  $F$  — фокусное расстояние;

$R$  — радиус зрачка фокусирующей системы.



Из приведенного соотношения видно, что с увеличением фокусного расстояния растет радиус фокального пятна. Фокусное расстояние системы, обеспечивающей получение нерасходящегося на длине  $F$  пучка ( $r \approx R$ ),

$$F \approx \frac{1}{0,61} \cdot \frac{R^2}{\lambda}.$$

Легко подсчитать, что для фокусирования ультразвуковой волны с частотой колебаний 1,5—3 Мгц необходимо применять излучатели большого диаметра (20—50 мм). Однако с увеличением диаметра излучателя возрастает

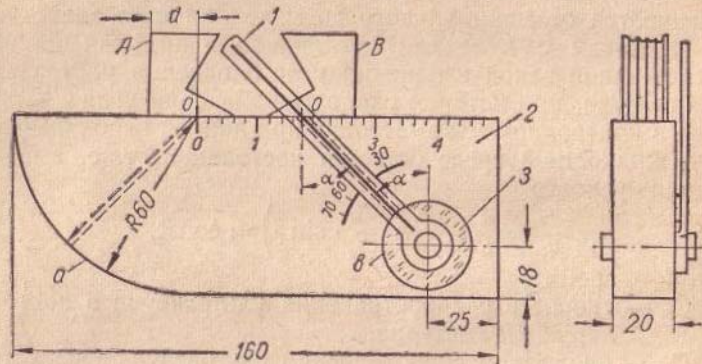


Рис. 14. Эталон для определения центра излучения щупа и угла ввода ультразвукового луча:  
1 — визирная планка из прозрачного органического стекла; 2 — сталь; 3 — плексиглас.

расстояние  $d$  (см. эскиз к табл. 4) центра излучения щупа от его передней грани. Как будет показано в гл. IV и V, для контроля некоторых соединений целесообразно применять щупы с возможно меньшим расстоянием центра излучения от его передней грани. Очевидно, что в таких щупах фокусировка ультразвукового луча невозможна.

Расположение центра излучения щупа может быть определено с помощью дефектоскопа и эталона (рис. 14). Если щуп установить в положение  $A$ , при котором величина эхосигнала от поверхности  $a$  будет максимальна, то центр излучения щупа будет расположен напротив метки  $O$ . С помощью этого же эталона удобно определять и другой весьма важный параметр щупа — угол ввода ультразвукового луча. Для этого щуп устанавливают в положение  $B$ , при

котором амплитуда импульса, отраженного от поверхности  $a$ , будет максимальна. Затем планку  $1$  располагают так, чтобы визирная линия проходила через центр излучения  $O$ , и по шкале против визирной линии отсчитывают значение измеряемого угла.

Опыт показывает, что с помощью такого эталона обеспечивается практически достаточная точность измерения расстояния  $d$  и угла  $\alpha$ .

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (ДЕФЕКТА) ПРИ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Точность измерения координат отражающей поверхности во многом определяет достоверность ультразвукового контроля.

Очевидно, что при контроле изделий прямым щупом подлжет измерению лишь глубина расположения отражающей поверхности. При этом глубина  $H$  отражающей поверхности определяется соотношением (рис. 15, а)

$$H = \frac{C_{\text{пр}} t}{2}, \quad (14)$$

где  $C_{\text{пр}}$  — скорость распространения продольной волны в контролируемом материале;

$t$  — время прохождения ультразвукового импульса от поверхности, на которой установлен щуп, до дефекта и обратно.

Определение координат залегания отражающей поверхности (глубины  $H$  и расстояния  $L$  от передней грани щупа) при прозвучивании призматическим щупом основывается на измерении длины пути  $l$ , проходимого импульсом в металле, и последующем пересчете этой величины в координаты  $H$  и  $L$  по известному углу ввода луча  $\alpha$  (рис. 15, б).

Координаты залегания отражающей поверхности определяются уравнениями

$$H = l \cos \alpha = \frac{C_n t}{2} \cos \alpha = \frac{C_n (T - t_m)}{2} \cos \alpha; \quad (15)$$

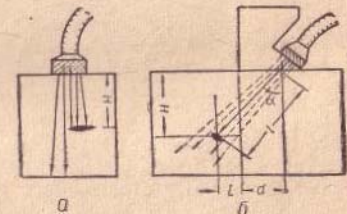


Рис. 15. Определение координат залегания дефекта при прозвучивании прямым (а) и призматическим (б) щупами.



$$L = l \sin \alpha - d = \frac{C_n t}{2} \sin \alpha - d = \frac{C_n (T - t_{\text{ц}})}{2} \sin \alpha - d, \quad (16)$$

где  $C_n$  — скорость распространения поперечных ультразвуковых волн в исследуемом металле;

$d$  — расстояние центра излучения щупа от его передней грани;

$\alpha$  — угол ввода луча в металл (угол преломления);

$T$  — интервал времени между моментом излучения зондирующего и моментом приема отраженного импульса.

Время  $T$  складывается из времени  $t_{\text{ц}}$  прохождения импульса в призме щупа и времени  $t$  прохождения импульса в металле, которое равно  $T - t_{\text{ц}}$ . Из приведенных соотношений видно, что при известных величинах  $C_n$ ,  $t_{\text{ц}}$ ,  $d$  и  $\alpha$  определение координат залегания дефекта при работе призматическими щупами так же, как и при применении прямых щупов, сводится к измерению интервала времени  $T$  между моментом излучения зондирующего и моментом приема отраженного импульсов.

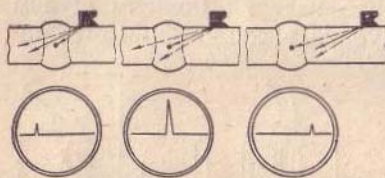


Рис. 16. Положение щупа, соответствующее максимальной величине импульса, отраженного от дефекта.

Для измерения интервала времени  $T$  в современных дефектоскопах предусмотрены специальные глубиномеры.

Очевидно, что на шкале глубиномера могут быть нанесены и значения координат дефекта  $H$  и  $L$  для щупов с различными углами ввода луча. В этом случае отсчет координат  $H$  и  $L$  по шкалам глубиномера должен производиться в положении щупа, при котором отражающая поверхность (дефект) располагается на оси луча; это положение щупа соответствует максимальной величине отраженного импульса (рис. 16).

Дефектоскопы НИИмостов (УЗД-НИИМ-2, УЗД-НИИМ-3 и УЗД-НИИМ-5) снабжены электронным глубиномером, позволяющим непосредственно определять координаты  $H$  и  $L$  дефекта в стали и дюралюминии при контроле прямыми и призматическими щупами с углами падения 30, 40 и 50°.

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

В дефектоскопе УДМ-1М предусмотрена возможность перестройки глубиномера при переходе с одного типа щупа на другой.

Отечественный дефектоскоп УЗД-7Н, а также большинство 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 щупами для определения координат отражающей поверхности удобно пользоваться координатной линейкой.

Координатная линейка по своей конструкции напоминает логарифмическую. На дюралюминиевую планку толщиной 3—5 мм наклеивается шкала глубиномера дефектоскопа (рис. 17, а). На движке линейки (рис. 17, б) наносится визирная линия и указатель шкал. После определения по шкале «мксек» глубиномера дефектоскопа времени  $T$  прохождения ультразвукового импульса от пластины щупа до дефекта и обратно движок устанавливается в положение, при котором против визирной линии на шкале «мксек» ли-

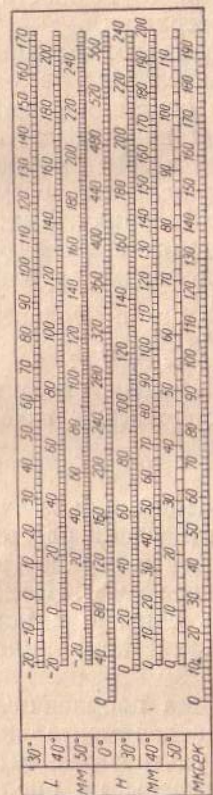
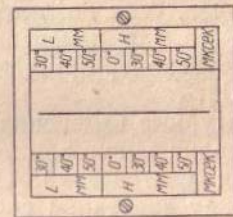
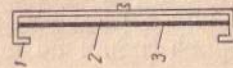


Рис. 17. Шкала глубиномера, проградуированная для щупов конструкции ЦНИИТМАШ (частота 1,8 МГц) и движок координатной линейки:

1 — корпус; 2 — плексиглас; 3 — бумага.



нейки будет цифра со значением  $T$ . При этом координаты залегания отражающей поверхности отсчитывают против визирной линии по шкалам, соответствующим применяемому типу щупа.

В случае, если дефектоскоп вообще не оснащен глубиномером, то для измерения координат может быть применен глубиномер-приставка, подключаемый к дефектоскопу [21].

Структурные изменения металла, а также форма и размеры изделия могут влиять на величину скорости распространения ультразвука. Очевидно, что чем больше разница между значением скорости распространения ультразвука и значением скорости, принятым при расчете шкал, тем больше погрешность в измерении координат отражающей поверхности.

Как правило, величина погрешности в измерении координат, обусловленная структурными отклонениями, при контроле однотипных материалов весьма мала и практически может не учитываться. В то же время погрешность, вызванная «геометрической» дисперсией скорости в изделиях определенных размеров и формы может составлять заметную величину. Так, при измерении координат дефектов в деталях стержневой формы малого диаметра (менее 20 мм) показание глубиномера  $H_{г.л.}$  оказывается завышенным в  $\frac{1}{K_c}$  раз по сравнению с истинной величиной  $H_{ист.}$ ,

$$т. е. H_{ист.} = K_c H_{г.л.}$$

Возникающая относительная ошибка  $\Delta$  при измерениях в стержневых изделиях без учета их размера  $\Delta = \frac{1}{K_c} - 1$  и при диаметре 5 мм может достигать 20%.

Завышенными оказываются показания глубиномера также при измерении расстояния от передней грани щупа до отражающей поверхности (дефекта) в изделиях малой толщины (менее 5 мм). Истинное значение расстояния  $L_{ист.}$  может быть связано с показанием глубиномера  $L_{г.л.}$  через поправочный коэффициент  $K'_c$  соотношением  $L_{ист.} = K'_c L_{г.л.}$

Значения поправочных коэффициентов  $K_c$  и  $K'_c$  определяют экспериментально. Для случая контроля стальных изделий ультразвуковыми колебаниями частотой 2,5 МГц они приведены на рис. 18. Измерение коэффициентов  $K_c$  и  $K'_c$  производилось с помощью дефектоскопа УЗД-НИИМ-5

соответственно на стержнях диаметром от 5 до 30 мм и пластинах толщиной от 2 до 40 мм, изготовленных из одного и того же стального листа.

Погрешность измерения координат дефектов при работе призматическими щупами может возникать также, во-первых, вследствие неточной установки щупа и, во-вторых, вследствие изменения угла падения волны из-за истирания призмы. В обоих случаях отражающая поверхность выявляется с помощью ультразвукового луча, вводимого

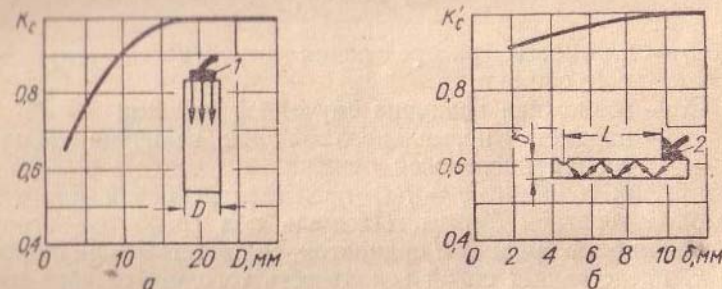


Рис. 18. Зависимость величины поправочного коэффициента  $K_c$  (а) и  $K'_c$  (б) от размеров контролируемого изделия: 1 — прямой щуп; 2 — призматический щуп.

в металл под углом, отличающимся от номинального, принятого при построении шкал.

Если истинный угол ввода луча меньше расчетного (см. рис. 16), то показание глубиномера будет заниженным и, наоборот, если истинный угол превышает расчетный, то показание глубиномера оказывается завышенным.

Неточность установки щупа приводит к тому, что даже при ряде последовательных измерений координат расположения дефекта одним и тем же щупом имеет место разброс показаний. Величина возникающей при этом ошибки зависит от ряда случайных факторов, в том числе от квалификации оператора и его сосредоточенности при измерении, от состояния поверхности, по которой перемещается щуп, и др. Естественно, что влияние перечисленных факторов на точность измерения в каждом отдельном случае будет различным и не может быть учтено заранее. Поэтому погрешности, обусловленные неточностью установки щупа, следует отнести к классу случайных ошибок. Для



характеристики любой случайной величины достаточно знать совокупность возможных значений ее, а также вероятности, с которыми эти значения могут появляться. Эти данные связаны с законом распределения случайной величины. Достаточно простым и точным для рассматриваемой величины является нормальный закон распределения случайных ошибок:

$$q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2v^2}, \quad (17)$$

где  $q$  — плотность распределения вероятности случайной ошибки;

$x$  — возможная величина случайной ошибки;

$v$  — параметр нормального закона; величина  $v^2$  является дисперсией ошибки.

График функции  $q = f(x)$  представляет собой кривую колоколообразной формы. Площадь под графиком, ограниченная осью ординат и ординатой, соответствующей ошибке  $x$ , представляет собой вероятность того, что ошибка измерения не будет превышать величины  $x$ .

Из нормального закона распределения следует, что возможные ошибки, вероятность появления которых составляет  $\frac{1}{2}$  (50%), будут всегда меньше

$$\eta = 0,6745v. \quad (18)$$

Величина  $\eta$  называется вероятной ошибкой.

Дисперсия и вероятная ошибка при измерении какой-либо величины могут быть определены опытным путем.

Для определения дисперсии нормального закона распределения ошибок при измерении глубины расположения дефекта, связанных с неточностью установки щупа, были выполнены измерения координат залегания искусственных дефектов в образце (рис. 19, а). Измерения проводились с помощью ультразвуковых дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5. К участию в измерениях было привлечено пятнадцать сотрудников, имеющих различную квалификацию и различный опыт работы (от нескольких дней до 9 лет) в области ультразвуковой дефектоскопии.

Графики нормального закона распределения ошибок, рассчитанные по данным, полученным при измерениях,

приведены на рис. 19, б. Как и следовало ожидать, возможная погрешность в измерении зависит от навыка оператора. Так, например, вероятная ошибка измерения координат дефекта, проводимого оператором с 7—9-летним опытом работы, составила около 0,3 мм (щуп с углом  $\beta = 50^\circ$ ); в то же время вероятная ошибка определения координат того же дефекта оператором с недельным опытом работы достигала приблизительно 1 мм.

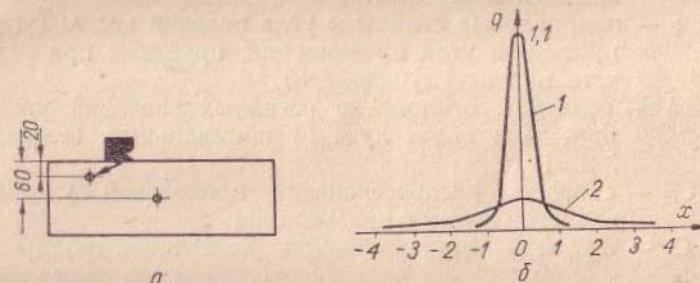


Рис. 19. Определение случайной погрешности измерения координат дефектов, обусловленной неточностью установки призматического щупа:

а — образец, на котором проводились измерения; б — график нормального закона распределения погрешности при измерении координат одного и того же дефекта оператором с семилетним 1 и недельным 2 опытом работы.

Относительная случайная погрешность, как показали испытания, зависит от места расположения отражающей поверхности и практически составляет 1—10% от измеряемой глубины.

В отличие от случайной погрешности, связанной с неточностью в расположении щупа, погрешность, обусловленная несоответствием величины угла призмы номинальному значению, принятому при расчете шкал, является систематической и может быть учтена при измерении координат.

Можно показать, что относительная погрешность, обусловленная отклонением угла ввода луча (угла призмы) от номинального, пропорциональна отклонению угла. Величина относительной погрешности  $\frac{\Delta H}{H}$  при измерении глубины расположения отражающей поверхности может быть определена из соотношений



$$A = \frac{\Delta H}{H} \approx \pm \Delta\alpha \frac{\operatorname{tg} \alpha}{57};$$

$$A = \frac{\Delta H}{H} \approx \pm \Delta\beta \frac{\sin 2\beta}{114 \left[ \left( \frac{C_{\text{щ}}}{C_{\text{п}}} \right)^2 - \sin^2 \beta \right]}, \quad *$$

где  $A$  — относительная ошибка измерения;  
 $\Delta H$  — абсолютная ошибка измерения;  
 $H$  — истинное значение глубины расположения отражающей поверхности;  
 $\beta$  и  $\alpha$  — номинальные величины угла падения волны (угла призмы) и угла преломления, принятые при расчете шкалы глубиномера;  
 $\Delta\beta$  и  $\Delta\alpha$  — величины отклонения истинных значений углов призмы и ввода луча от номинальных величин  $\beta$  и  $\alpha$ ;  
 $C_{\text{щ}}$  — скорость распространения продольной ультразвуковой волны в призме щупа;  
 $C_{\text{п}}$  — скорость распространения поперечной волны в контролируемом металле;

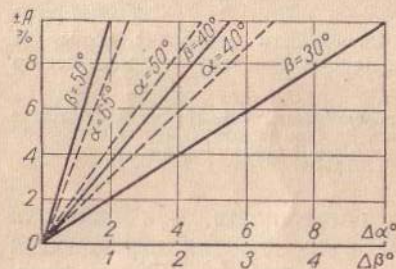


Рис. 20. Зависимость относительной ошибки  $A$  измерения глубины расположения дефекта в стали от величины отклонения угла плексигласовой призмы  $\Delta\beta$  и угла ввода луча  $\Delta\alpha$  от номинальных значений  $\beta$  и  $\alpha$ , принятых при расчете шкал глубиномера.

чение  $H$  измеряемой глубины:

$$H \approx \frac{H_{\text{гл}}}{1 + A}. \quad (20)$$

\* Вывод формул не приводится. При выводе с допустимой погрешностью (менее 1%) принято, что  $\sin \Delta\alpha = \Delta\alpha$ ,  $\sin \Delta\beta = \Delta\beta$ ,  $\cos \Delta\alpha = \cos \Delta\beta = 1$ .

По формуле (19) оказывается возможным рассчитать допуски на угол призмы, обеспечивающие заданную точность измерения координат дефектов. Так, например, для измерения глубины расположения дефектов с точностью до 5% углы призмы щупов должны лежать в пределах  $50^\circ \pm 30'$ ,  $40^\circ \pm 90'$  и  $30^\circ \pm 2^\circ$ .

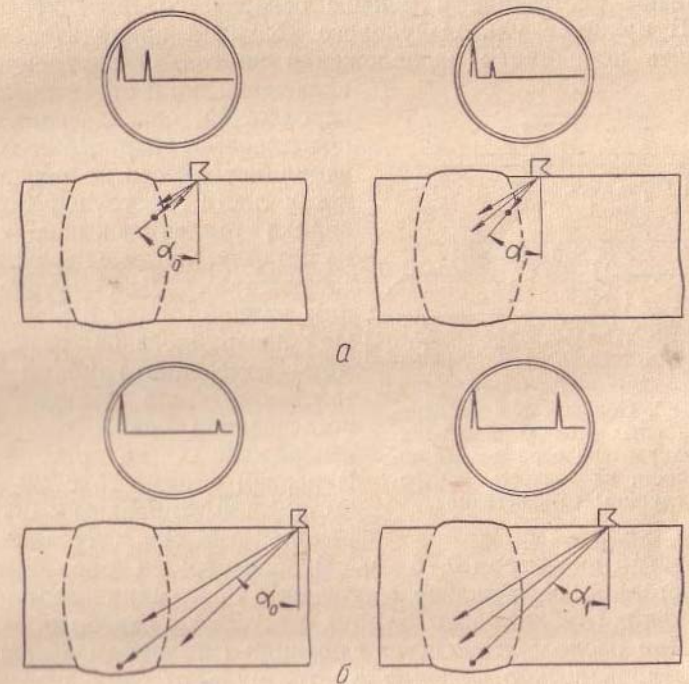


Рис. 21. Выявление дефектов при контроле сварных соединений большой толщины.

Необходимо отметить, что при контроле сварных швов большой толщины (более 150 мм) величина угла ввода ультразвукового луча зависит от глубины залегания дефекта. Объясняется это расхождением ультразвукового пучка, излучаемого искателем, а также ослаблением интенсивности эхо-сигнала от дефекта с увеличением глубины его залегания.\* При расположении дефекта вблизи искателя ам-

\* Впервые изменение угла ввода луча с изменением глубины контроля установлено и объяснено к. т. н. И. Н. Ермоловым [30].



плитуда эхо-сигнала будет максимальна, когда дефект озвучивается под углом  $\alpha_0$  центральной частью пучка, имеющей наибольшую интенсивность (рис. 21, а). Если дефект залегает на большой глубине, то амплитуда эхо-сигнала от дефекта будет максимальна, когда он озвучивается под меньшим углом  $\alpha_1$ , так как при этом луч проходит существенно меньшее расстояние и меньше ослабляется (рис. 21, б).

В процессе ультразвукового контроля приходится измерять координаты расположения не только внутренних

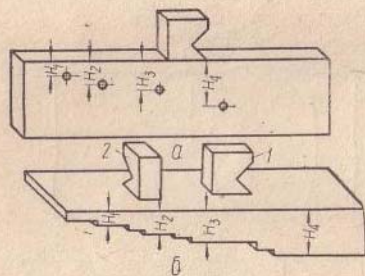


Рис. 22. Образцы для экспериментальных исследований влияния характера отражающей поверхности на точность измерения глубины ее залегания.

включений, но и отражающих неровностей, совпадающих с поверхностью сварного соединения (неровности на поверхности листа, место перехода валика «усиления» к основному металлу, угловые переходы соединения). Для уточнения влияния вида отражающей поверхности на результаты измерения глубины ее залегания были выполнены исследования на образцах, изображенных на рис. 22. В первом образце (рис. 22, а) были имитированы внутренние дефекты сверлением

отверстий диаметром 0,75 мм. Вторым образцом (рис. 22, б) представлял собой набор «ступенек», по толщине соответствующих глубине расположения отверстий в первом образце. При расположении щупа в позиции 1 на втором образце имитировалось отражение ультразвука от валика «усиления» шва, а при расположении в позиции 2—отражение от угла листа сварного соединения. Результаты измерений сведены в табл. 5.

Анализ результатов измерений показывает, что с практически приемлемой точностью при измерении координат отражающей поверхности в пределах до 50 мм можно не учитывать характера расположения этой поверхности. Следует отметить, что при контроле изделий цилиндрической формы с перемещением щупа в направлении, перпендикулярном образующей, контактирующая поверхность призмы притирается к цилиндрической поверхности и приобретает вогнутую форму. В результате этого прелом-

Таблица 5

Влияние характера отражающей поверхности на результаты измерения глубины ее расположения (щуп с углом  $\beta = 50^\circ$ )

Измеряемая глубина, мм	Результаты измерений (среднее арифметическое десяти измерений) глубины расположения, мм		
	внутреннего дефекта	валика «усиления» шва	угла листа
5	7	7	6
7	8,5	9	8
10	13	14	13,5
15	16	17	17,5
20	22	22,5	23
25	27	27	28
30	32	32	31,5
40	42	42	43

ленный пучок значительно расширяется и угол преломления луча увеличивается.

В подобных случаях, а также при контроле швов большой толщины для измерения координат  $H$  и  $L$  следует пользоваться графиками, экспериментально построенными для определенного сварного соединения и данной частоты ультразвуковых колебаний.

#### 4. СПОСОБЫ ПРОЗВУЧИВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При прозвучивании сварных соединений призматическими щупами ультразвуковые колебания вводятся в шов через основной металл. При этом применяют способы прозвучивания прямым, однажды, дважды и многократно отраженным лучом (рис. 23, а).

Расстояние  $L$  от щупа до дефекта при прозвучивании однажды и многократно отраженным лучом отсчитывается непосредственно по шкале глубиномера. Глубина расположения дефекта от поверхности, на которой установлен щуп, определяется непосредственно по показаниям глубиномера лишь при прозвучивании прямым лучом. Если прозвучивание ведется отраженным лучом, то значение глубины рассчитывается по формулам

$$\begin{aligned} H &= (1 + n) \delta - H_{\text{гл}} \quad (\text{при нечетном } n); \\ H &= H_{\text{гл}} - n\delta \quad (\text{при четном } n), \end{aligned} \quad (21)$$

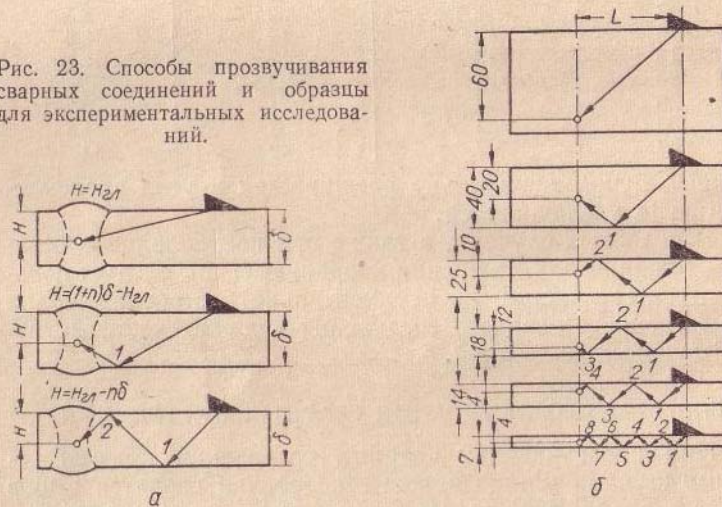
где  $H$  — глубина расположения дефекта от поверхности прозвучивания;



$H_{гл}$  — показания глубиномера;  
 $\delta$  — толщина металла;  
 $n$  — число отражений.

Естественно ожидать, что при каждом отражении от поверхности металла будет происходить потеря в интенсивности ультразвукового луча, 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. Коэф-

Рис. 23. Способы прозвучивания сварных соединений и образцы для экспериментальных исследований.



фициент  $K_0$  будем называть коэффициентом потери чувствительности при одном отражении от поверхности металла.

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 при прозвучивании однажды отраженным лучом при прочих равных условиях будет в  $K_0$  раз меньше амплитуды  $U_0$ , т. е.  $U_1 = K_0 U_0$ . Очевидно, что амплитуда  $U_2$  эхо-сигнала в случае прозвучивания дважды отраженным лучом при прочих равных условиях 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 прочих равных условиях будет в  $K_0^n$  раз меньше амплитуды  $U_0$  эхо-сигнала от того же дефекта при обнаружении его прямым лучом, т. е.

$$U_n = K_0^n U_0, \quad (22)$$

где  $U_n$  — амплитуда эхо-сигнала при контроле отраженным лучом;

$U_0$  — амплитуда эхо-сигнала при контроле прямым лучом;

$n$  — число отражений;

$K_0$  — коэффициент потери чувствительности при одном отражении от поверхности металла.

Для уточнения влияния способа прозвучивания на чувствительность ультразвукового контроля автором выполнены исследования по измерению коэффициента  $K_0$ . Исследования проводились на образцах из стали и дюралюминия с обработанной и необработанной после прокатки поверхностью. Поверхность образцов в одних случаях была сухой, в других — покрыта слоем воды или масла. Толщина металла образцов (рис. 23, б) и расположение в них «дефекта» в виде отверстия рассчитаны на одинаковую длину пути ультразвукового импульса от щупа до дефекта. Падение чувствительности определялось по уменьшению величины эхо-импульса на входе приемника.

Исследования показали, что величина коэффициента потерь  $K_0$  в основном определяется акустическими свойствами контролируемого металла и окружающей его среды и существенно не зависит от чистоты поверхности металла.

При сухих поверхностях металла, между которыми происходит распространение ультразвука,  $K_0 \approx 1$ ; при нанесении на отражающую поверхность слоя минерального масла  $K_0 \approx 0,85$  для стали и  $K_0 \approx 0,6$  для дюралюминия; при погружении поверхности в воду  $K_0 \approx 0,88$  для стали и  $K_0 \approx 0,8$  для дюралюминия.

На рис. 24 приведена зависимость амплитуды эхо-импульсов, определяющей собой в данном случае чувствительность, от количества отражений при смачивании поверхности металла слоем масла или при погружении её в воду.

Приведенные данные показывают, что при наличии слоя масла на поверхности изделия или же при контакте поверх-



ности с водой (при контроле наполненных жидкостью труб и резервуаров) чувствительность метода ультразвуковой дефектоскопии падает с увеличением числа отражений ультразвука. Поэтому для получения возможно большей чувствительности при прозвучивании изделий многократно отраженным лучом необходимо удалять слой контактирующей среды с поверхности, по которой при данном способе прозвучивания щуп не перемещается, а также освобождать

от жидкости на время контроля наполненные резервуары и трубы.

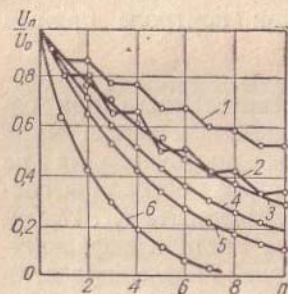


Рис. 24. Изменение амплитуды эхо-сигнала от дефекта в зависимости от количества  $n$  отражений:

1 — сталь (в воде одна поверхность); 2 — дюралюминий (в воде одна поверхность); 3 — сталь (в воде обе поверхности); 4 — сталь (обе поверхности покрыты слоем масла); 5 — дюралюминий (в воде обе поверхности); 6 — дюралюминий (обе поверхности покрыты слоем масла).

площадь ожидаемых дефектов максимальна.

Обычно угол ввода ультразвукового луча у наклонных щупов с призмой из плексигласа не превышает  $70^\circ$ , так как дальнейшее увеличение угла ввода приводит к резкому уменьшению интенсивности поперечной волны, вводимой в металл, притуплению характеристики направленности луча и к возникновению поверхностных волн, вызывающих появление эхо-сигналов от валика «усиления» шва, которые мешают контролю.

Пределы и траекторию перемещения щупа устанавливают такими, чтобы шов прозвучивался при наименьшей вероятности появления отражений от неровностей поверхности шва и основного металла. Перемещение щупа без

## 5. ПРОЗВУЧИВАНИЕ МЕТАЛЛА ШВА

При контроле качества сварных соединений необходимо обеспечить тщательное прозвучивание металла шва. Тип щупа, способ прозвучивания и метод перемещения щупа определяются типом и размерами сварного соединения, а также характером встречаемых в нем дефектов. Угол ввода колебаний выбирается таким, чтобы расстояние от щупа до шва было как можно меньшим, а направление луча — возможно близким к нормали к такому сечению, в котором

учета геометрии распространения ультразвукового луча приводит к появлению большого количества отражений от поверхности шва, делающих контроль практически невозможным. Для обеспечения перемещения щупов в заданных пределах целесообразно применять специальные держатели щупов с ограничителями.

Надежность прозвучивания во многом определяется качеством акустического контакта между изделием и щупом. С целью обеспечения акустического контакта производят соответствующую подготовку поверхности металла и смачивание ее слоем контактирующей среды. В случае применения призматических щупов подготовка поверхности сводится лишь к удалению выпуклостей и брызг металла, отслаивающейся ржавчины и грязи; при этом чувствительность контроля хотя и снижается вследствие плохой чистоты поверхности, но все же остается вполне достаточной для выявления недопустимых дефектов. Измерения показывают, что чувствительность при работе по поверхности проката составляет 50—80% чувствительности при работе по поверхности, предварительно обработанной по  $\nabla 6$ . В то же время грубая механическая обработка прокатанной поверхности, например вручную с помощью наждачного круга, может значительно ухудшить акустический контакт.

Потери чувствительности вследствие низкой чистоты поверхности тем значительнее, чем выше частота применяемых ультразвуковых колебаний и чем меньше удельное акустическое сопротивление контактирующей жидкости. Затуханием ультразвука в контактирующей жидкости можно пренебречь, т. к. толщина слоя жидкости при непосредственном контакте щупа с металлом весьма мала.

В качестве контактирующей среды применяют минеральные масла, технический глицерин, воду и другие жидкости. Несмотря на то, что наибольшим акустическим сопротивлением обладает глицерин, в качестве контактирующей жидкости обычно используется машинное или трансформаторное масло. Эти масла имеют удовлетворительную консистенцию, медленно испаряются, весьма распространены и хорошо смачивают поверхности металла и щупа.

Смачивание водой загрязненных поверхностей металла может быть улучшено добавлением в нее «Универсола», применяемого при стирке.

Перемещение щупа по необработанной поверхности приводит к износу рабочей плоскости, а следовательно, и к из-



менению угла призмы. Очевидно, что величина износа угла призмы при прочих идентичных условиях контроля в значительной степени определяется давлением на щуп, оказываемым рукой оператора. Поэтому в процессе прозвучивания нажим на щуп должен быть минимальным, лишь обеспечивающим плотное прилегание призмы к поверхности металла. При этом ни в коем случае не следует допускать подъема (перекоса) призмы. Подъем призмы так же, как и износ ее, изменяет угол ввода луча в металл, что отрица-

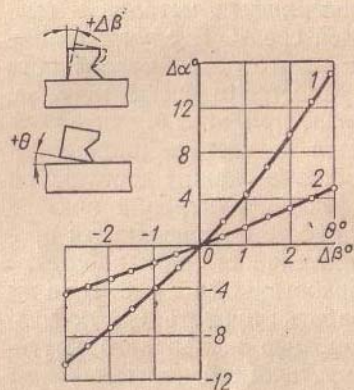


Рис. 25. Зависимость приращения  $\Delta\alpha$  угла преломления ультразвукового луча в стали: 1 — от угла  $\theta$  подъема щупа; 2 — от угла  $\Delta\beta$  износа призмы.

тельно сказывается на чувствительности контроля и точности работы глубиномера.

Следует иметь в виду, что приращение угла ввода луча  $\Delta\alpha$ , вызываемое подъемом призмы на  $1^\circ$ , значительно превосходит приращение того же угла при износе призмы также на  $1^\circ$ .

На рис. 25 приведена в качестве примера графическая зависимость приращения угла ввода луча в сталь от угла подъема щупа и от угла износа призмы. Графики рассчитаны по формулам, вывод которых рассмотрен в гл. VII.

Изложенное выше подчеркивает необходимость повышения износостойкости призм щупов.

Эффективным средством является применение пластмассовых прокладок, через которые вводятся ультразвуковые колебания в металл. Подходящим материалом для прокладок является пленка ПК-4, обладающая достаточной прочностью и эластичностью. Такая прокладка, как показывают исследования, практически не ухудшает, а в ряде случаев даже улучшает акустический контакт между щупом и металлом.

Качество акустического контакта зависит также от формы рабочей поверхности щупа и конфигурации изделия. При продольном прозвучивании сварных соединений металла цилиндрической формы применяют щупы с плоской поверхностью. Если прозвучивание производят в направлении, перпендикулярном к образующей, то для улучшения

акустического контакта контактирующую поверхность щупа притирают к цилиндрической поверхности изделия.

## 6. ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ РАЗМЕРОВ И ХАРАКТЕРА

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик любого метода дефектоскопии является его чувствительность, которая характеризует возможность выявления этим методом различных несплошностей в контролируемых изделиях.

Естественно, что чувствительность приборов, работающих по одному и тому же принципу, но имеющих различные параметры, будет различной при обнаружении аналогичных несплошностей. В то же время она зависит от характера, размеров и глубины залегания дефектов, а также от конфигурации изделия и физических свойств металла. В связи с этим чувствительность любого дефектоскопа количественно измеряется величиной минимального, еще надежно обнаруживаемого определенного включения, расположенного на заданной глубине.

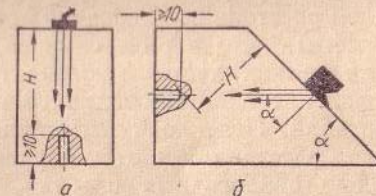


Рис. 26. Эталоны для определения чувствительности ультразвукового дефектоскопа при работе с прямыми (а) и призматическими (б) щупами.

Сравнивать чувствительность дефектоскопов можно только по выявляемости идентичных включений, отличающихся друг от друга лишь каким-либо одним параметром.

Чувствительность ультразвуковых дефектоскопов принято условно оценивать площадью включения в виде диска, заполненного воздухом и ориентированного своей плоскостью перпендикулярно к оси ультразвукового луча. Такие эталонные включения обычно имитируют сверлением отверстий в образцах, изготовляемых из одного и того же металла и имеющих одинаковую чистоту обработки (рис. 26). Безусловно, чувствительность дефектоскопа к реальным инородным включениям будет меньше чувствительности, измеренной по эталону.

Выявляемость включений при одной и той же чувствительности импульсного ультразвукового дефектоскопа зависит от расстояния между включением и приемно-излу-



чающей пластиной, а также от способности включения отражать падающую ультразвуковую волну обратно к щупу.

Зависимость чувствительности от глубины расположения дефекта обусловлена расхождением ультразвуковой волны, а также ее затуханием.

Расхождение ультразвуковой волны, наблюдаемое в дальней зоне ее распространения, приводит к резкому уменьшению амплитуды эхо-сигнала от включения, а следовательно, к уменьшению чувствительности контроля с увеличением расстояния включения от искательной головки. Следует отметить, что в ряде случаев, например при прозвучивании тонких листов многократно отраженным лучом, расхождение волн ограничивается боковыми поверхностями металла. Падение чувствительности, связанное с увеличением расстояния, в этом случае будет меньше, чем при контроле аналогичных изделий, не ограничивающих расхождение ультразвукового пучка. С уменьшением глубины расположения включений величина возвратившегося на щуп эхо-сигнала плавно возрастает, достигая максимальной величины при расположении дефекта приблизительно на границе дальней зоны с ближней. При дальнейшем уменьшении глубины амплитуда эхо-сигнала от дефекта малой величины меняется немонотонно, в общем снижаясь.

Способность отражения включением ультразвуковых колебаний в направлении излучателя зависит от размеров, формы и упругих свойств его, а также от длины волны.

Интенсивность ультразвуковой волны, отраженной к излучателю от плоских включений, расположенных перпендикулярно к направлению ультразвукового луча, пропорциональна их площади и обратно пропорциональна квадрату длины волны, а от расположенных под углом к направлению луча, резко зависит от величины этого угла; в первом случае она будет больше при отражении от дефектов с идеально гладкой поверхностью, а во втором — от дефектов с шероховатой поверхностью.

При включениях сферической формы, если диаметр сферы  $D \gg \lambda$ , интенсивность отраженной волны прямо пропорциональна квадрату диаметра и не зависит от частоты колебаний, а если  $D \ll \lambda$  — то интенсивность зависит от отношения диаметра сферы к длине волны и резко возрастает с увеличением этого отношения, т. е. с повышением частоты.

Интенсивность волны, отраженной к излучателю от групп мелких сферических включений при диаметре

сфер  $D \ll \lambda$  и расположении их друг от друга на расстояниях, значительно меньших длины волны, пропорциональна квадрату частоты ультразвуковых колебаний.

Таким образом, мы приходим к выводу, что с увеличением частоты повышается отражающая способность включений, а следовательно, увеличивается вероятность их обнаружения. В то же время повышение частоты ведет к падению интенсивности колебаний, достигающих включения, вследствие увеличения потерь, связанных с ухудшением акустического контакта щупа с металлом и возрастанием затухания ультразвуковых волн, что снижает чувствительность. Поэтому амплитуда эхо-сигнала от включения, характеризующая собой чувствительность, связана с частотой ультразвуковых колебаний зависимостью, имеющей максимум.

Оптимальное значение частоты, при котором амплитуда эхо-сигнала от включения максимальна, определяется в основном структурой металла, чистотой поверхности и глубиной залегания включений. Чем меньше затухание ультразвука в металле и глубина расположения дефектов, а также чем выше класс чистоты обработки поверхности, тем больше оптимальное значение частоты ультразвуковых колебаний, а следовательно, тем выше чувствительность метода ультразвуковой дефектоскопии.

В табл. 6 приведены значения частот колебаний, используемых при ультразвуковой дефектоскопии различных сварных соединений. Методика определения величины оптимальной частоты колебаний для контроля сварных соединений большой толщины предложена И. Н. Ермоловым [29].

Целью ультразвукового контроля, как и любого другого, является не только обнаружение внутренних внутренних включений, но и оценка их влияния на прочность сварного соединения. Для суждения о том, является ли выявленная несплошность допустимым или недопустимым дефектом, в большинстве случаев необходимо знать характер и размеры этого включения.

В основу определения размеров озвучиваемой области включения может быть положено измерение амплитуды эхо-сигнала или «условной» протяженности включения, т. е. протяженности зоны перемещения щупа, внутри которой наблюдается эхо-сигнал от включения.\*

\* Метод определения размера дефекта путем измерения координат его границ по существу также сводится к измерению условной протяженности дефекта.



Таблица 6

Частота колебаний, используемых при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений

Вид сварки, термообработка и качество поверхности	Частота ультразвука, МГц
Сварка листового проката из низкоуглеродистых и низколегированных сталей без термообработки и зачистки поверхности проката . . . . .	2,5
Газопрессовая сварка низкоуглеродистых сталей . . . . .	3,5—2,5
Электроконтактная сварка рельсов и режущего инструмента без термообработки и зачистки поверхности проката . . . . .	2,5
Электрошлаковая сварка проката без термообработки и зачистки поверхности:	
толщиной до 100 мм из стали 22К и 35 . . . . .	2,5
»  »  100—400  »  »  22К . . . . .	1,8
»  »  300  мм  »  »  34ХМ, 25ХЗНМ . . . . .	1,8
Многослойная сварка перлитных сталей (30ХМ, 22К):	
толщиной до 100 мм . . . . .	2,5
толщиной более 100 мм . . . . .	1,8
Многослойная сварка проката:	
толщиной до 15 мм из аустенитных сталей (ЭИ257, ЭИ405, ЭИ572, 1Х18Н12Т) без последующей термообработки и зачистки поверхности . . . . .	2,5
толщиной до 100 мм из аустенитных сталей после аустенизации . . . . .	1,8
толщиной до 45 мм аустенитных сталей без термообработки и зачистки поверхности проката . . . . .	0,8
Сварка алюминиевых сплавов . . . . .	1,8—3,0
Точечная и роликовая сварка листового проката . . . . .	2,5
Сварка литых сталей (20ХМФЛ) . . . . .	0,8

Амплитуда эхо-сигнала казалось бы более правильно может характеризовать величину включений небольших размеров (меньше диаметра излучателя), чем «условная» протяженность. Однако оценка величины включений по амплитуде эхо-сигнала осложняется тем, что последняя зависит не только от размеров включения, но и от ряда других факторов (чувствительности дефектоскопа, глубины расположения дефекта, чистоты поверхности, структуры металла, взаимного расположения щупа и дефекта и т. д.).

Учесть влияние различных факторов на величину эхо-сигнала при применении существующих дефектоскопов с призматическими щупами практически не удастся. Поэтому метод оценки размеров дефекта по амплитуде эхо-сигнала пока не нашел практического применения при кон-

троле качества сварных соединений в производственных условиях.

Более надежным и удобным для оценки размера включения, величина которого равна или больше диаметра пьезоэлектрического излучателя, является метод измерения «условной» протяженности (рис. 27, а).

«Условная» протяженность дефекта может быть больше или меньше истинной протяженности в зависимости от ха-

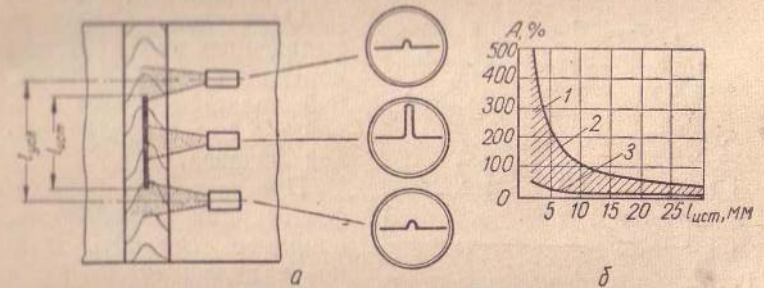


Рис. 27. Схема измерения «условной» протяженности включения (а) и экспериментальная зависимость относительной ошибки измерения от истинной протяженности включения и режима работы дефектоскопа (б):

1 — область разброса величины  $\frac{\Delta l}{l_{ист}}$ , измеренной при различных чувствительности и расстоянии от щупа до дефекта; 2 — расстояние и чувствительность велики; 3 — расстояние и чувствительность малы.

рактера дефекта, расстояния его от щупа, чувствительности дефектоскопа и качества акустического контакта.

Относительная ошибка  $A$  определения истинной протяженности  $l_{ист}$  дефекта путем измерения условной протяженности  $l_{усл}$  равна:

$$A = \frac{l_{усл} - l_{ист}}{l_{ист}}$$

и резко уменьшается с увеличением размеров дефекта (рис. 27, б).

Высота дефекта  $y$  при контроле сварных швов ориентировочно может быть определена как разность глубин, измеренных при таких положениях щупа, когда амплитуда импульса равна половине максимальной величины (рис. 28), т. е.

$$y = H_2 - H_1. \quad (23)$$



Естественно, что ошибка в определении протяженности и высоты обнаруженного включения вследствие расхождения ультразвукового луча возрастает с увеличением расстояния от щупа до включения и зависит от режима работы дефектоскопа. Однако для некоторых сварных соединений оказывается возможным опытным путем подобрать определенный режим настройки дефектоскопа и методику отсчета, при которых измерение протяженности и высоты включений даст результаты, близкие к действительности.

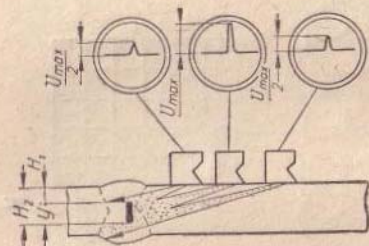


Рис. 28. Схема определения высоты дефекта.

При ультразвуковой дефектоскопии невозможно, например, отличить шлаковое включение от пор и весьма сложно — трещину от непровара. Однако путем озвучивания выявленного дефекта под разными углами можно установить, является ли данный дефект объемным (одиночные или сгруппированные поры и шлаковые включения) или относительно плоским (трещина, непровар).

При непроварах и трещинах амплитуда эхо-сигнала максимальна при установке щупа под прямым углом к дефекту. Дефекты в виде пор и шлаковых включений дают обычно достаточно устойчивую амплитуду эхо-сигнала при озвучивании их под разными углами. При этом группы пор и шлаковых включений характеризуются появлением на экране «частотокола» импульсов или одного импульса, но несколько большей чем обычно длительности.

Методика более детального определения характера дефектов должна разрабатываться применительно к отдельным конкретным сварным соединениям и основываться на связи характера дефектов с особенностями их выявления (амплитудой импульсов, местом залегания и протяженностью дефекта, позицией расположения и типом щупов)\*. Она требует глубокого изучения характера и особен-

\* Опыт показал, что методика определения характера дефекта по форме импульса на экране не дает однозначных результатов и часто приводит к ошибкам.

ностей расположения дефектов в сварном соединении, а также проведения весьма большого количества экспериментальных работ по ультразвуковому контролю швов с последующим макроструктурным анализом.

## 7. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Оценка качества сварного соединения при ультразвуковом контроле производится в соответствии с техническими условиями.

Большинство технических условий составлено из расчета контроля сварных соединений рентгенографированием (гаммаграфированием) или осмотром изломов и макрошлифов контрольных образцов. При контроле сварных швов упомянутыми методами оказывается возможным судить о характере выявленных пороков, их форме и размерах. Поэтому в технических условиях допустимость и недопустимость выявленных включений обычно обуславливается их характером, величиной, минимальным расстоянием между отдельными включениями и количеством на определенную длину шва. Так, например, в соответствии с техническими условиями ТУПИМ-св-55 в стыковых сварных швах I категории пролетных строений железнодорожных мостов не допускаются пороки в виде трещин, непроваров, несплавленных по кромкам, пор и шлаковых включений величиной более  $0,04 \delta$  мм, где  $\delta$  — толщина листов, а также пор и шлаковых включений любого размера при расстоянии между ними менее 45 мм или количестве более четырех на 1 м шва.

Несмотря на то, что при ультразвуковом контроле невозможно определять с необходимой точностью характер и размеры выявленных включений, в большинстве случаев все же удается оценивать качество сварного соединения по результатам прозвучивания. При этом основным критерием оценки допустимости обнаруженных включений является их протяженность, расстояние друг от друга и количество на определенной длине сварного шва.

Используя перечисленные критерии для оценки качества швов I категории пролетных строений, легко прийти к выводу, что по результатам прозвучивания «пригодными для эксплуатации» могут быть признаны лишь те соединения, в которых не обнаружено никаких включений. В то же время швы, в которых обнаружены



дефектные участки протяженностью более  $(0,04 \delta + 5)^* \text{ мм}$  или два любых дефекта при расстоянии между ними менее 45 мм или, наконец, любые дефекты в количестве более четырех на 1 м шва, должны быть отнесены к «непригодным для эксплуатации» и подлежат ремонту.

Безусловно, может оказаться иногда невозможным по результатам прозвучивания отнести шов к «пригодному» или «непригодному» для эксплуатации. Таким, например, является шов пролетного строения, в котором при ультразвуковом контроле обнаружено три дефекта на 1 м шва, отстоящих друг от друга на расстоянии более 45 мм и имеющих протяженность менее  $(0,04 \delta + 5) \text{ мм}$ . Для окончательной оценки качества сомнительные по данным ультразвукового контроля участки в ряде случаев целесообразно подвергнуть рентгенографированию. Следует отметить, что если несплошность не будет выявлена рентгенографированием, то наиболее вероятно, что это трещина или тонкий непровар.

Очевидно, что наиболее вероятной причиной невозможности окончательной оценки качества швов по результатам ультразвукового контроля может являться обнаружение весьма мелких одиночных допустимых включений. Избегать обнаружения подобных мелких включений можно только правильным подбором чувствительности дефектоскопа.

Длительные наблюдения за применением ультразвуковой дефектоскопии показывают, что при контроле сварных швов определенного типа можно достичь весьма хороших результатов в оценке качества швов по результатам прозвучивания.

Так, на одном из заводов при ультразвуковом контроле 984 стыковых швов оказались сомнительными лишь 11 участков, потребовавших применения рентгенографирования для окончательной оценки их качества.

Следует отметить, что вероятность обнаружения при ультразвуковом контроле сомнительных по качеству участков швов тем меньше, чем жестче допуск на дефекты сварки. Если в сварном соединении не допускается никаких дефектов, то его качество всегда может быть оценено по результатам ультразвукового контроля.

\* 5 мм — максимальная ошибка измерения протяженности дефекта.

## 8. СОЧЕТАНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ С МЕТОДАМИ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В сварных соединениях методом ультразвуковой дефектоскопии уверенно 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 щупа 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 швов фиксируются на объективном 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 рентгенографированием и гаммаграфированием.

Ультразвуковая дефектоскопия является единственным методом выявления внутренних пороков в некоторых сварных соединениях, в частности в стыках электроконтактной сварки и в стыковых швах листов большой толщины. Однако она в отличие от рентгенографирования не может быть использована для выявления небольших дефектов в стыковых швах малой толщины с неровным валиком «усиления». Из сравнения возможностей метода ультразвуковой дефектоскопии и методов просвечивания рентгеновскими и гамма-лучами видно, что в ряде случаев они могут прекрасно дополнять друг друга. Разумное их сочетание может способствовать повышению надежности и производительности контроля.

Формы применения метода ультразвуковой дефектоскопии и сочетания его с методами просвечивания обуславливаются типом контролируемого сварного соединения и техническими требованиями, предъявляемыми к его качеству, а также условиями производства.



При контроле сварки ограничиваются методом ультразвуковой дефектоскопии в тех случаях, когда его разрешающая способность обеспечивает необходимую достоверность в оценке качества шва или же когда этот метод является единственно возможным.

Ультразвуковой контроль применяется в сочетании с методами просвечивания при необходимости:

1) уточнить размеры и характер выявленных ультразвуком несплошностей;

2) повысить надежность и объективность контроля путем выборочного просвечивания швов, в которых по данным ультразвуковой дефектоскопии отсутствуют недопустимые пороки;

3) проверить качество работы оператора при ультразвуковом контроле.

Так, например, при контроле качества стыковых швов I категории железнодорожных мостов каждый шов подвергают ультразвуковой дефектоскопии и после устранения обнаруженных недопустимых дефектов просвечивают с целью выявления одиночных включений, возможно пропущенных при ультразвуковой дефектоскопии.

При контроле швов паровозных котлов просвечивание применяют для уточнения характера выявленных ультразвуком несплошностей лишь в тех случаях, когда по данным ультразвуковой дефектоскопии нет достаточных данных для оценки качества шва; однако на большинстве паровозоремонтных заводов просвечивание даже отдельных участков шва настолько усложняет процесс производства, что оказалось более целесообразным отказаться от него и подвергать ремонту все дефектные участки шва, имеющие по данным ультразвукового контроля «условную» протяженность более 5 мм. При этом методы просвечивания используют лишь для периодической проверки работы оператора путем сопоставления показаний ультразвуковой дефектоскопии с результатами просвечивания контрольных образцов сварных швов.

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. Подтверждением этого является опыт применения в 1956 г. комплексного контроля стыковых соединений пролетных

строений моста через р. Тобол (г. Кустанай). Контроль производился путем 100%-ной ультразвуковой дефектоскопии швов и последующего гаммаграфирования только тех участков, которые по данным ультразвуковой дефектоскопии имели дефекты. При этом на контроль 168 стыковых соединений было затрачено всего 4 рабочих дня, в то время как на контроль этих же швов одним гаммаграфированием ушло бы 10—12 рабочих дней.

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.

### 9. ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОРГАНИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Метод ультразвуковой дефектоскопии может быть официально введен для контроля и оценки качества сварных соединений только при условии обеспечения необходимой достоверности контроля.

Достоверность ультразвуковой дефектоскопии оценивается путем сопоставления результатов прозвучивания с данными макро- и микроструктурного анализа. В некоторых случаях данные ультразвукового контроля могут быть проверены посредством рентгенографирования. Если проверка показывает, что еще не достигнута достаточная надежность выявления всех недопустимых пороков, то метод ультразвуковой дефектоскопии может быть применен лишь в сочетании с методами рентгено- или гаммаграфирования. При этом каждое сварное соединение предварительно подвергается ультразвуковому контролю с целью отбраковки швов с крупными пороками. Эти швы подлежат исправлению и повторному ультразвуковому контролю. Рентгенографирование (гаммаграфирование) соединения производится лишь тогда, когда по результатам ультразвуковой дефектоскопии в нем отсутствуют недопустимые пороки. Использование ультразвуковой дефектоскопии для заблаговременной отбраковки швов сокращает объем рентгенографирования, что весьма часто способствует снижению трудоемкости и времени контроля.

Если же сопоставление результатов ультразвуковой дефектоскопии швов с данными других методов контроля



дает хорошее совпадение, то ультразвуковой контроль может быть применен в производственных условиях самостоятельно или в сочетании с методами просвечивания.

Очевидно, что результаты ультразвуковой дефектоскопии во многом зависят от квалификации оператора, его сосредоточенности в процессе прозвучивания, а также от соответствия основных параметров дефектоскопа параметрам, предусмотренным методикой. В связи с этим при организации и проведении ультразвукового контроля весьма большое внимание уделяется вопросам подготовки операторов, создания условий, способствующих максимальной сосредоточенности оператора в процессе работы, а также стандартизации основных параметров контроля.

К ультразвуковому контролю сварных соединений могут быть допущены специалисты, обладающие надлежащей теоретической подготовкой и опытом практической работы. Так, например, в Германской Демократической Республике, согласно «Директивным указаниям по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений» квалификация оператора считается достаточной, если он окончил специальные курсы, проработал дефектоскопистом на производстве по крайней мере полгода, прошел обучение в Центральном институте сварки ГДР в целях приобретения недостающих знаний и, наконец, успешно сдал экзамены.

Сосредоточенность оператора в процессе работы обусловливается многими факторами. Отрицательно сказываются неблагоприятные метеорологические условия и отсутствие удобного доступа к сварному соединению. Поэтому в инструкциях по ультразвуковому контролю, разработанных НИИ мостов, разрешается производить контроль лишь при отсутствии осадков и температуре воздуха не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Влияние сосредоточенности на результаты прозвучивания может быть снижено применением дополнительных индикаторов в дефектоскопе, специальных приспособлений для перемещения щупа и обеспечением качественного акустического контакта.

Стандартизация параметров контроля предусматривает применение специальных мер, позволяющих поддерживать режим работы дефектоскопа в соответствии с инструкцией и систематически в процессе работы проверять его. Более подробно вопросы стандартизации ультразвуковой аппаратуры рассмотрены в разделе 6 гл. III.

Повышению достоверности ультразвукового контроля

способствует проведение ревизии аппаратуры и проверочных испытаний дефектоскописта.

При ревизии аппаратуры проверяются чувствительность, точность работы глубиномера и другие параметры дефектоскопа. Измерение параметров производится с помощью специальных эталонов и электрорадиоизмерительных приборов.

Проверочные испытания дефектоскописта 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.

Длительные сравнительные исследования выявляемости дефектов методами ультразвуковой дефектоскопии, рентгенографирования и макроструктурного анализа показывают, что при правильной организации может быть достигнута достаточно высокая достоверность и надежность ультразвукового контроля.



### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Большинство ультразвуковых дефектоскопов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, весьма универсальны и предназначаются для контроля различных заготовок и изделий.

В качестве индикатора в них применяется в основном электронно-лучевая трубка. Для измерения координат отражающей поверхности при работе с призматическими щупами приходится пользоваться специальными номограммами, эталонами и в ряде случаев перестраивать отсчетные устройства (глубиномеры).

В этих приборах не предусмотрены меры, облегчающие селекцию эхо-сигналов во времени. Весьма большие габариты и вес дефектоскопов, возможность питания только от сети переменного тока не позволяют использовать их в полевых условиях и труднодоступных местах.

Применение подобных дефектоскопов для контроля качества сварных соединений оказывается весьма неудобным. Действительно, оператору, прозвучивающему сварное соединение, весьма трудно пользоваться экраном электронно-лучевой трубки, так как ему необходимо постоянно наблюдать за перемещаемым щупом. При контроле сварных швов возможно возникновение эхо-сигналов от неровностей на поверхности металла. Отсутствие специальных систем селекции и удобного глубиномера осложняет процесс определения координат отражающих поверхностей и увеличивает вероятность регистрации «ложных» дефектов. Все это отрицательно сказывается на производительности и надежности ультразвукового контроля.

Очевидно, что специфика ультразвукового контроля сварных соединений требует разработки более совершенных дефектоскопов.

Практический опыт эксплуатации различных дефектоскопов позволил определить основные требования к аппаратуре для ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений.

#### 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТΟΣКОПОВ 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.

При прочих равных условиях чувствительность дефектоскопа определяется частотой ультразвуковых колебаний, амплитудой электрического высокочастотного импульса, возбуждающего пьезоэлектрическую пластину, и коэффициентом усиления приемного тракта. Практика показывает, что обычно для производственного контроля качества однотипных сварных соединений достаточно иметь дефектоскоп с одной рабочей частотой ультразвуковых колебаний, а регулировку чувствительности производить путем изменения коэффициента усиления приемного тракта или амплитуды посылочного импульса.

**Система индикации дефектов.** Под индикатором понимают устройство, преобразующее электрические эхо-импульсы в видимые или слышимые сигналы и позволяющее оценивать 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. Наи-



большее распространение получили осциллографические индикаторы (электронно-лучевые трубки).

Однако при контроле сварных соединений кроме электронно-лучевой трубки необходимо иметь дополнительные звуковой или оптический (световой) индикаторы, освобождающие оператора от необходимости одновременного наблюдения за перемещаемым щупом и за экраном трубки. 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.

**Система селекции эхо-сигналов.** При контроле сварных соединений весьма вероятно возвращение на щуп ультразвуковых сигналов, отраженных от неровностей поверхности металла и шва, а также от уступов и краев соединения. Таким образом, при работе по однощуповой или одно-двухщуповой схеме на вход приемного тракта могут поступать зондирующий импульс, импульсы, отраженные от дефектов, и импульсы, отраженные от поверхности (рис. 29).

Если в дефектоскопе не предусмотрено никаких специальных селектирующих устройств, то на экране электронно-лучевой трубки мы будем наблюдать кроме импульсов, обусловленных наличием дефектов, зондирующий импульс и импульсы, отраженные от поверхностей соединения (рис. 29, 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 дефектов, будет составлять незначительную часть от общей длины развертки.

Из рис. 29 б, в видно, что при прозвучивании стыкового сварного шва однажды отраженным лучом величина рабочего участка развертки меньше половины ее длины, а при прозвучивании дважды 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.

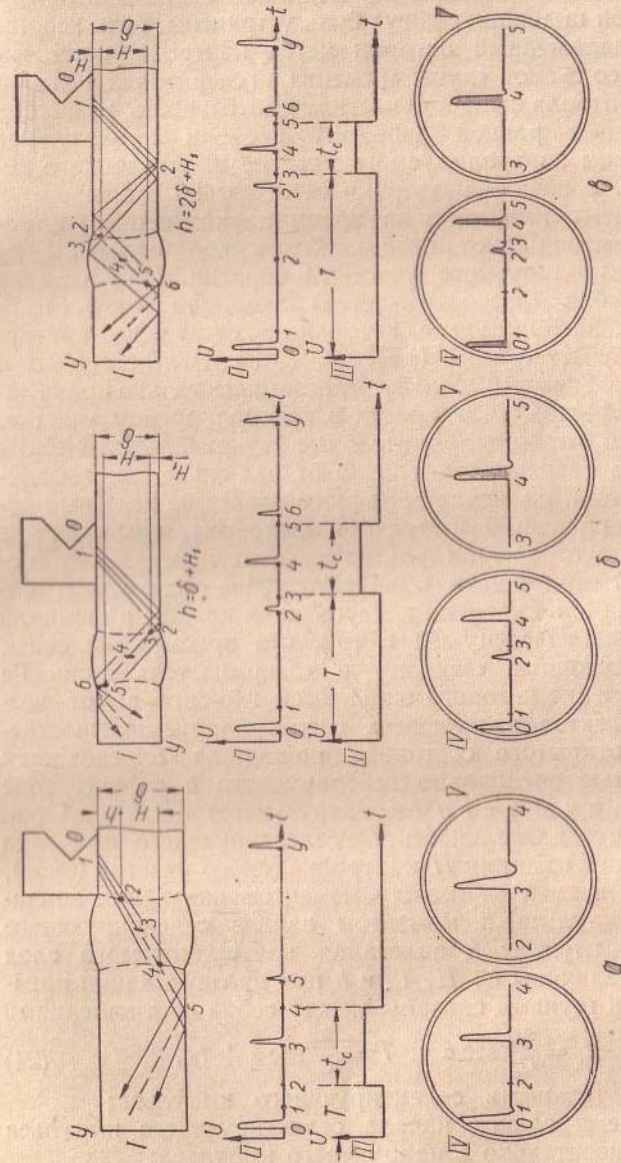


Рис. 29. Временная селекция эхо-сигналов при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений:

а — прозвучивание прямым лучом; б — прозвучивание отраженным лучом; в — прозвучивание дважды отраженным лучом; 1 — схема прозвучивания; 2 — временная диаграмма приемного тракта; 3 — временная диаграмма селектирующего импульса; 4 — экран осциллографического индикатора дефектоскопа без системы «глубина времени» (электронной лупы); 5 — экран осциллографического индикатора дефектоскопа с «глубиной времени».



Эти недостатки обычно применяемой системы осциллографической индикации могут быть устранены, если использовать предложенный автором метод контроля швов «по участкам» со схемой «лупы времени» в генераторах развертки. Для контроля швов по участкам 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. 29, I, V). Вследствие этого импульсы на экране трубки будут возникать только при обнаружении дефектов, залегающих в контролируемом участке.

Для того 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 «закрыт» 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  $t_c$  селектирующего импульса обуславливает толщину  $H$  контролируемого участка (слоя), а интервал времени  $T$  между моментом излучения зондирующего импульса и моментом начала селектирующего импульса — глубину  $h$  залегания контролируемого слоя (рис. 29). Величины  $t_c$ ,  $H$ ,  $T$ , и  $h$  при прозвучивании призматическими щупами связаны между собой соотношениями

$$t_c = \frac{2H}{C_{\Pi}} \sec \alpha \text{ и } T = \frac{2h}{C_{\Pi}} \sec \alpha + t_{\text{щ}}, \quad (24)$$

где  $t_c$  — длительность селектирующего импульса;  
 $T$  — время сдвига начала селектирующего импульса относительно зондирующего импульса;  
 $H$  — толщина контролируемого участка;

$h$  — глубина залегания начала контролируемого участка;  
 $C_{\Pi}$  — скорость распространения поперечной волны в контролируемом металле;  
 $\alpha$  — угол ввода луча;  
 $t_{\text{щ}}$  — время прохождения ультразвукового импульса в призме щупа.

Итак, в ультразвуковых дефектоскопах для контроля сварных соединений целесообразно применять метод контроля по участкам (слоям), систему временной селекции эхо-сигналов и лупу времени.

**Глубиномер** со шкалами для непосредственного отсчета координат (глубины и расстояния от щупа) дефектов при работе призматическими щупами с различными углами падения ультразвуковой волны является неотъемлемой частью дефектоскопа, предназначенного для проверки качества сварных швов. Схема и конструкция глубиномера должны быть таковы, чтобы процесс измерения был непосредственным, простым и быстрым, а также не вносил 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 и в некоторых случаях от конструкции искательной головки.

Действительно, для отдельного восприятия эхо-сигнала дефекта от зондирующего импульса необходимо, чтобы время  $T$  от момента излучения зондирующего импульса и до момента возвращения эхо-сигнала было больше длительности  $\tau$  ультразвукового импульса.

Время  $T$  связано с глубиной расположения дефекта соотношением

$$T = \frac{2H}{C_{\Pi}}$$

для прямого щупа и

$$T = \frac{2H \sec \alpha}{C_{\Pi}} + t_{\text{щ}}$$

для призматического,

где  $H$  — глубина расположения дефекта;  
 $C_{\Pi}$  и  $C_{\Pi}$  — скорости распространения продольной и поперечной ультразвуковых волн;  
 $\alpha$  — угол ввода ультразвуковых колебаний;  
 $t_{\text{щ}}$  — время прохождения импульса в призме.



Приравнивая время  $T$  к длительности ультразвукового импульса  $\tau$ , получаем минимальную величину «мертвой» зоны

$$H_{\min} = \frac{\tau C_{\text{нр}}}{2}$$

при работе прямым щупом и

$$H_{\min} = \frac{(\tau - t_{\text{щ}}) C_{\text{п}}}{2} \cos \alpha$$

при работе призматическим щупом.

При  $t_{\text{щ}} > \tau$ , что имеет место в практике, «мертвая» зона при работе призматическими щупами могла бы отсутствовать, если бы ультразвуковые колебания после многократных отражений в призме полностью поглощались и не возвращались на пьезоэлектрическую пластину. Эхо-сигналы, появляющиеся после многократных отражений зондирующего импульса в призме щупа, делают невозможной регистрацию эхо-сигналов от дефектов, расположенных близко от поверхности, создавая тем самым «мертвую» зону величиной 5—15 мм.

При контроле сварных соединений и особенно наплавленных деталей «мертвая» зона не должна превышать 1—4 мм. Величина «мертвой» зоны, обусловленной многократными отражениями ультразвука в призме щупа, может быть значительно снижена введением в приемный тракт системы коррекции во времени коэффициента усиления, ограничения по минимуму и селекции по времени поступающих на вход сигналов (рис. 30).

Указанные меры весьма эффективны и позволяют при необходимости полностью ликвидировать «мертвую» зону.

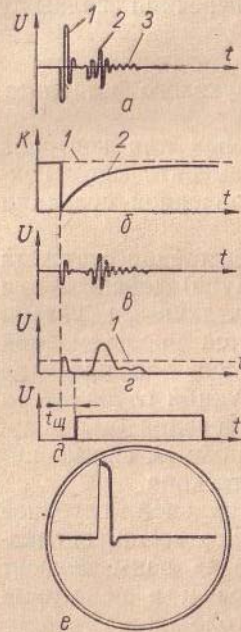


Рис. 30. Уменьшение «мертвой» зоны дефектоскопа, обусловленной многократными отражениями ультразвука в призме щупа:

*a* — напряжение на входе приемника; 1 — зондирующий импульс; 2 — импульс от дефекта; 3 — эхо-импульс от призмы; *b* — изменение коэффициента усиления во времени; 1 — коэффициент усиления без коррекции; 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.

Разрешающая способность дефектоскопа, т. е. минимальное расстояние  $\Delta$  между отдельно обнаруживаемыми дефектами, расположенными друг за другом в направлении прозвучивания, определяется всецело длительностью ультразвукового импульса  $\tau$  и может быть вычислена по формулам

$$\Delta \approx \frac{\tau C_{\text{нр}}}{2}$$

для прямого щупа и

$$\Delta \approx \frac{\tau C_{\text{п}}}{2} \quad (25)$$

для призматического щупа.

Поскольку скорость распространения поперечных волн приблизительно в два раза меньше скорости распространения продольных волн, то при одной и той же длительности ультразвукового импульса разрешающая способность при работе призматическими щупами будет приблизительно в два раза меньше разрешающей способности при работе прямыми щупами.

При контроле сварных соединений разрешающая способность в 2—3 мм является достаточной, чтобы в большинстве случаев отличать одиночные дефекты от их скопления и отделять (селектировать) эхо-сигналы, обусловленные дефектами, от эхо-сигналов, отраженных от неровностей поверхности шва.

Максимальная глубина контроля (пробивная сила, дальность действия) обычно характеризуется максимальным расстоянием, на котором посредством всех индикаторов может быть зарегистрирован «донный» эхо-сигнал.

При контроле сварных соединений обычно применяют призматические щупы с углами падения волны от 30 до 55°. Прозвучивание швов большой толщины производят щупами с меньшим углом падения волны. Поэтому дальность действия дефектоскопов, предназначенных для контроля сварных соединений, целесообразнее определять как максимальную глубину, на которой при работе щупом с углом  $\beta = 30^\circ$  всеми индикаторами надежно обнаруживается эхо-сигнал от углового отражателя (угла листа из ст. 3, 4 или 5). На современном уровне развития сварочной техники вполне достаточно, чтобы дальность действия дефектоскопа со щупом  $30^\circ$  была бы около 0,5 м.



**Портативность и система питания.** Труднодоступное расположение сварных соединений, необходимость перемещения с прибором по решетчатым конструкциям и на большой высоте ограничивают габариты и вес дефектоскопа. Дефектоскоп, предназначенный для проверки качества сварки, должен отличаться особой портативностью и мобильностью. В связи с этим в ряде случаев весьма целе-

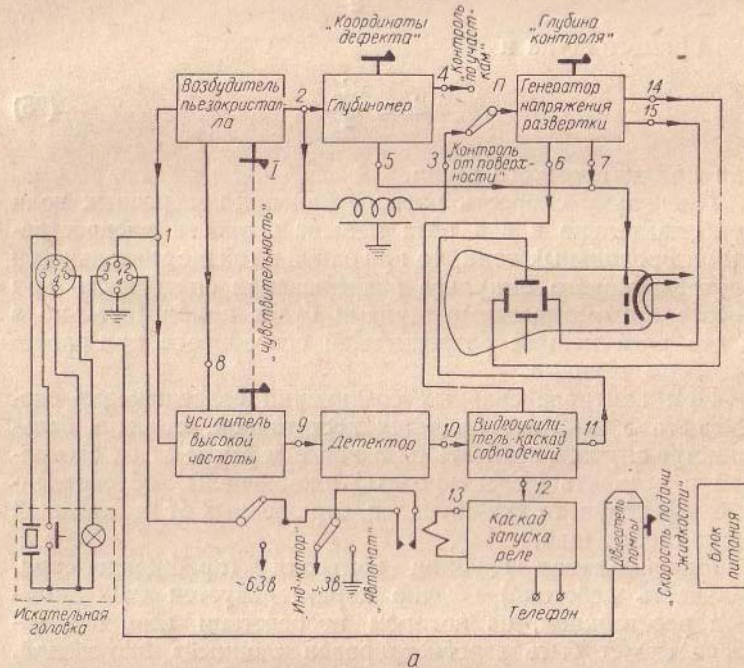


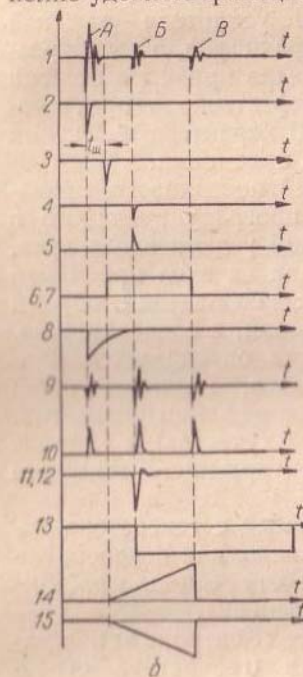
Рис. 31. Функциональная схема ультразвукового дефектоскопа для ний (а) и формы импульсов на выходе различных каскадов (б): А — зондирующий импульс; Б — импульс от дефекта; В — импульс от неров-

сообразно применять двухблочные или одно-двухблочные конструкции, в которых блок питания с силовым трансформатором может быть отделен от самого дефектоскопа. Блок питания соединяется с дефектоскопом многожильным кабелем длиной 10—20 м. Это позволяет, имея в руках легкий прибор, вести контроль швов в радиусе 10—20 м от блока питания.

Для применения ультразвукового контроля на заводах при изготовлении конструкций в полевых условиях и при их монтаже 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 НИИмостов в 1953 г. На основе опыта эксплуатации этих приборов позднее были созданы специализированные дефектоскопы УЗД-НИИМ-3 и УЗД-НИИМ-5 (УЗД-59, УЗД-60), нашедшие широкое применение при контроле сварных соединений.

## 2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ



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. 31.

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 участкам»), расположенный практически на любой глубине от поверхности. Индикация дефектов осуществляется по



загоранию лампочки, появлению звука в наушниках и импульса на экране.

Индикаторная лампочка может переключаться в режим непрерывного горения для освещения при работе в затемненных местах. 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 щупа, а также разброс коэффициента затухания материала призмы и степени демпфирования пьезоэлемента, в дефектоскопе предусмотрена плавная регулировка (ручка I) характера изменения во времени коэффициента усиления приемника.

Измерение координат отражающей поверхности производится с помощью глубиномера, проградуированного в миллиметрах для щупов 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 развертки (генератора стробимпульса) производится синхронизирующими импульсами, снимаемыми с анода тиратрона и прошедшими устройство задержки. Вследствие этого импульс подсвета и стробимпульс оказываются сдвинутыми во времени по отношению к посылочному импульсу на время задержки. Очевидно, что время задержки должно быть не меньше длительности посылочного импульса и не больше времени  $t_{\text{щ}}$  прохождения ультразвукового импульса в призме щупа. При контроле изделий по участкам толщины запуск генератора развертки производится с задержкой на необходимое время  $T$ , определяемое глубиной залегания контролируемого участка. Запуск генератора в этом случае производится

импульсом, поступающим из глубиномера (тумблер II в положении «Контроль по участкам»). При этом по шкале глубиномера отсчитываются координаты расположения начала контролируемого слоя (величина  $h$  на рис. 29).

Устройство постоянной задержки позволяет с помощью того же глубиномера устанавливать величину контролируемого участка и обойтись 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 вести автоматический контроль с регистрацией результатов, что повышает объективность контроля.

В дефектоскопе предусматривается автоматическая подача контактирующей среды к щупу и работа его на переменном и постоянном токе.

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 видеоусилителя используется одновременно для селекции эхо-сигналов. С помощью глубиномера производятся измерение координат дефектов, определение величины контролируемого слоя, а также расположение его на необходимой глубине при контроле по участкам.

Рассмотренная схема с некоторыми упрощениями впервые была осуществлена в 1953 г. в дефектоскопе УЗД-НИИМ-2 и положена в основу ультразвуковых дефектоскопов УЗД-НИИМ-5. Эффективность данной схемы подтверждается тем, что дефектоскоп УЗД-НИИМ-5, обладающий большими возможностями при контроле сварных соединений и смонтированный из типовых радиоэлементов, имеет меньшие габариты, вес и число радиоламп, чем другие подобные приборы.



### 3. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Ультразвуковой дефектоскоп, функциональная схема которого приведена на рис. 31, состоит из пяти основных узлов: возбuditеля пьезокристалла, приемного тракта, глубиномера, системы селекции, системы индикации и блока питания.

В настоящем разделе рассматриваются некоторые из упомянутых узлов, приводятся практические схемы и рекомендации по выбору их параметров.

#### Возбудитель пьезокристалла

Как уже упоминалось, получение ультразвуковых колебаний при дефектоскопии основано на преобразовании электрических импульсов в ультразвуковые с помощью пьезоэлектрических преобразователей.

В качестве пьезоэлектрических преобразователей широкое применение находят пластины из титаната бария,

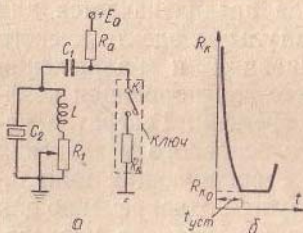


Рис. 32. Принципиальная схема генератора ультразвуковых импульсов (а) и график изменения внутреннего сопротивления ключа (б).

обладающие значительной емкостью (500—2000 пф) и представляющие весьма малое сопротивление для переменного тока частотой, равной собственной частоте пластины. В связи с этим для возбуждения ультразвуковых колебаний в пластинах титаната бария целесообразно использовать генераторы с ударным возбуждением контура, в котором в качестве емкости используется пьезоэлектрическая пластина.

Принцип работы такого генератора (рис. 32) 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\_a \cdot C\_1\$)\* и временем, прошедшим от включения до замыкания ключа \$K\$. При замыкании ключа \$K\$ конденсатор \$C\_1\$ разряжается на контур через внутреннее сопротив-

\* Влиянием индуктивности \$L\$ на заряд емкости \$C\_1\$ пренебрегаем, так как постоянная времени заряда достаточно велика.

ление ключа \$R\_k\$ в течение некоторого времени \$t\_{зам}\$, по прошествии которого ключ вновь размыкается. Постоянная времени разряда \$\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\_{к0}\$ (рис. 32, б). Среднее значение сопротивления ключа тем меньше, чем меньше время установления \$t\_{уст}\$ и конечная величина сопротивления \$R\_{к0}\$.

При разряде в контуре возникают затухающие электрические колебания частотой \$f \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC\_2}}\$. Вследствие этого в пьезоэлектрической пластине возбуждается импульс ультразвуковых колебаний.

Скорость затухания колебаний определяется 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».

Очевидно, что при малых значениях емкости \$C\_1\$ в ней будет запасено, а следовательно, и передано в контур незначительное количество энергии. По мере увеличения емкости \$C\_1\$ растет как количество энергии, накопленное в ней, так и постоянная времени разряда, а следовательно, и время, необходимое для передачи этой энергии в контур. Если предположить время замкнутого состояния ключа \$t\_{зам}\$ неизменяемым, то следует, что существует какое-то значение емкости \$C\_1\$, при котором в контур за время \$t\_{зам}\$ передается максимальное количество энергии. Заметим, что увеличивать в неограниченных пределах время замкнутого состояния ключа пропорционально накопительной емкости нецелесообразно. Действительно, при очень больших значениях накопительной емкости необходимое время замкнутого состояния ключа оказалось бы на много больше периода собственных колебаний контура, что привело бы к шунтированию контура емкостью \$C\_1\$ и внутренним сопротивлением ключа.

Таким образом, мы приходим к выводу, что в генераторах ультразвуковых колебаний для получения наибольшей мощности импульса следует подбирать оптимальные величины накопительной емкости \$C\_{1,опт}\$ и времени замыка-



ния ключа  $t_{\text{зам.опт}}$ . Оптимальные значения этих величин зависят от частоты возбуждаемых колебаний, емкости пьезоэлектрической пластины, типа ключа и могут быть определены опытным путем. Расчет их весьма сложен и не дает необходимой точности.

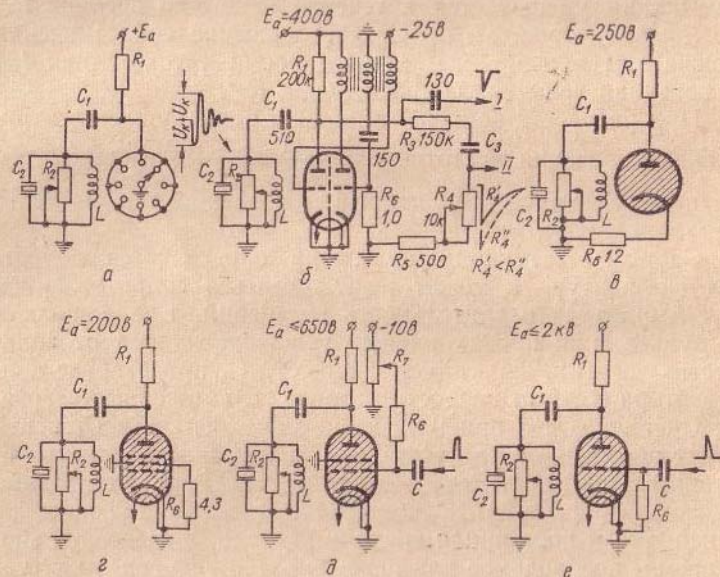


Рис. 33. Схемы генераторов ультразвуковых импульсов: а — на механическом прерывателе; б — на триоде 6N3ПИ с синхронизирующим блокинг-генератором, I — импульсы синхронизации, II — импульсы коррекции коэффициента усиления; в — на разряднике РБ-2; г — на пальчиковом тиратроне ТГЗ-0,1/1,3; д — на тиратроне ТГ1-0,1/1,3; е — на тиратроне ТГ1-35/3.

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

Экспериментальные исследования позволили оценить возможность и рентабельность использования различных систем ключей, а также установить оптимальные значения величин  $C_1$  и  $t_{\text{зам}}$ .

При применении механического прерывателя (рис. 33, а) или триода (рис. 33, б) время замкнутого состояния ключа  $t_{\text{зам}}$  определяется в первом случае скоростью враще-

ния контакта, а во втором случае — длительностью импульса, подаваемого на управляющую сетку, и не зависит от величины накопительной емкости.

Внутреннее сопротивление прерывателя и триода достаточно мало. Поэтому амплитуда генерируемого импульса с увеличением накопительной емкости вначале резко растет, а далее, начиная с некоторой величины  $C_{1\text{опт}}$  (рис. 34), остается практически неизменной. В то же время амплитуда возбуждаемых колебаний весьма сильно зависит от длительности замкнутого состояния прерывателя или триода. Оптимальное значение длительности замкнутого состояния  $t_{\text{зам.опт}}$  обуславливается частотой  $f_0$  генерируемых колебаний.

Работа генератора на тиратроне несколько отличается от работы генератора на триоде. Как известно, время открытого состояния тиратрона в отличие от триода невозможно регулировать изменением напряжения на его сетках, ибо после замыкания тиратрона сетки теряют свои управляющие свойства. Погасить, т. е. разомкнуть тиратрон, возможно 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  $t_{\text{зам}}$ , находится в прямой зависимости от величины накопительной емкости  $C_1$  (рис. 35, а). В связи с этим величина импульса, возбуждаемого генератором на тиратроне (или разряднике), зависит от величины накопительной емкости (рис. 35, б). Каждому типу тиратрона (разрядника) при определенной резонансной частоте контура соответствует свое оптимальное значение разрядной емкости, обеспечивающей генерирование ультразвуковых импульсов максимальной мощности.

При выборе типа ключа для генератора следует стремиться обеспечить максимальную амплитуду генерируемого

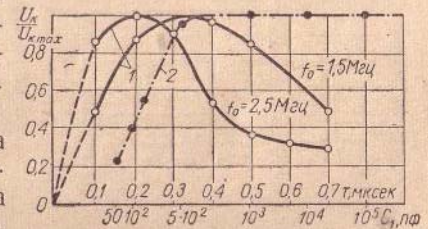


Рис. 34. Зависимость амплитуды генерируемых импульсов в ударном контуре, возбуждаемом триодом, от длительности синхронизирующих импульсов при накопительной емкости  $C_1 = 1000$  пф (1) и величины накопительной емкости (2).



напряжения, минимальное собственное потребление мощности и высокую надежность работы.

Целесообразным с точки зрения получения максимальной амплитуды колебаний при минимальном потреблении энергии является применение в генераторах малогабаритных разрядников типа РБ-2 (рис. 33, в).

Сопротивление  $R_6$  в этом генераторе несколько улучшает стабильность работы разрядника, хотя и не обеспечивает постоянства амплитуды генерируемых импульсов.

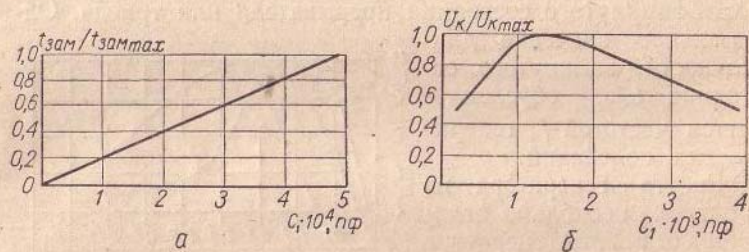


Рис. 35. Экспериментальные зависимости времени открытого состояния тиратрона (а) и амплитуды генерируемых импульсов (б) от величины накопительной емкости  $C_1$ .

Непостоянство амплитуды вызывает размытие верхушки импульса, наблюдаемое на экране трубки. При потреблении мощности около 1 мвт амплитуда генерируемых импульсов, благодаря малому внутреннему сопротивлению разрядника составляет около 80 в.

Генератор на триоде (рис. 33, б) 6НЗПИ (или 6Н1П) потребляет около 4 вт и возбуждает в контуре импульсы амплитудой около 50 в. В качестве импульсного трансформатора в блокинг-генераторе (правая по схеме половина лампы) может быть применен унифицированный строчной трансформатор, используемый в телевизорах.

В генераторах на тиратронах (рис. 33, г, д, е) удается возбуждать импульсы амплитудой до нескольких сотен вольт. При этом мощность, потребляемая генератором, составляет около 4 вт.

Применение пальчиковых тиратронов ТГЗ-0,1/1,3 взамен обычных ТГ1-0,1/1,3 позволяет при прочих равных условиях получать несколько большую амплитуду колебаний при меньших габаритах генератора.

В генераторах, схемы которых приведены на рис. 33, в, г, невозможно регулировать амплитуду генерируемых им-

пульсов. Эти генераторы работают только в режиме самовозбуждений. Использование генераторов с самовозбуждением весьма целесообразно, ибо при этом можно обойтись без генератора синхронизирующих импульсов, что упрощает конструкцию дефектоскопа.

Генератор с регулировкой величины амплитуды ультразвуковых импульсов может быть выполнен по схеме, приведенной на рис. 33, д. Амплитуда импульса регулируется потенциометром  $R_7$  путем изменения величины отрицательного напряжения на сетке, определяющей собой потенциал зажигания тиратрона  $E_{зж}$ . Пока  $E_{зж} < E_a$ , генератор работает в режиме самовозбуждения. При определенных величинах отрицательного напряжения на сетке  $E_{зж}$  может быть больше  $E_a$ . В этом случае для работы генератора требуется подавать синхронизирующие импульсы положительной полярности на сетку тиратрона через емкость  $C = 50 \div 300 \text{ нФ}$ . В качестве генератора синхронизирующих импульсов удобно использовать блокинг-генератор, схема которого приведена на рис. 33, б.

Источник отрицательного напряжения смещения должен быть стабилизирован. Необходимость стабилизации анодного напряжения исключается, если величина его на 30—50% больше потенциала зажигания используемого тиратрона.

Изменение напряжения накала тиратрона в пределах 5,5—7,5 в в генераторе с посторонним запуском не сказывается существенно на амплитуде возбуждаемых импульсов. При работе генератора в режиме самовозбуждения существует оптимальное значение напряжения накала, при котором мощность генерируемых импульсов максимальна (рис. 36).

Отрицательный импульс, возникающий на аноде триода, разрядника или тиратрона в момент их зажигания, удобно использовать для синхронизации работы остальных каскадов дефектоскопа, а также для получения импульса экспоненциальной формы, служащего для изменения во вре-

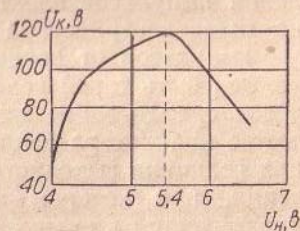


Рис. 36. Экспериментальная зависимость амплитуды  $U_k$  возбуждаемых колебаний в контуре генератора, работающего в режиме самовозбуждения, от напряжения накала  $U_n$  тиратрона ТГ1-0,1/1,3.



мени коэффициента усиления приемника. Импульс синхронизации снимается с анода через емкость малой величины.

Экспоненциальный импульс формируется цепочкой  $R_3$ ,  $C_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  (рис. 33, б). Амплитуда этого импульса плавно регулируется потенциометром  $R_4$ .

### Приемный тракт дефектоскопа

Приемный тракт дефектоскопа предназначается для усиления импульсов электрических колебаний, возникающих на пьезоэлектрической пластине щупа при возвращении эхо-импульсов от дефектов. Сигнал на выходе приемника должен быть такой величины, чтобы обеспечивалось устойчивое срабатывание индикаторов. При применении 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.

Для электронно-лучевых трубок с электростатическим отклонением типа 5ЛО38, 7ЛО55, 8ЛО29 и 13ЛО36, нашедших наиболее широкое применение в отечественных дефектоскопах, максимальная амплитуда выходного импульса  $U_{\text{вых max}}$  при подаче его на пластины с наибольшей чувствительностью должна составлять около 170 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 приемный тракт не должен усиливать сигналы шума, т. е. сигналы, имеющие малую амплитуду. Амплитудная характеристика, удовлетворяющая перечисленным требованиям, и наиболее распространенная скелетная схема приемного тракта приведены на рис. 37.

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

$$\tau_c = \tau + \frac{2l}{C}, \quad (26)$$

где  $\tau_c$  — длительность эхо-сигнала;  
 $\tau$  — длительность зондирующего импульса;  
 $l$  — разность расстояний от пьезоэлектрической пластины до дальней и ближней границ отражающей поверхности;  
 $C$  — скорость распространения ультразвуковых колебаний.

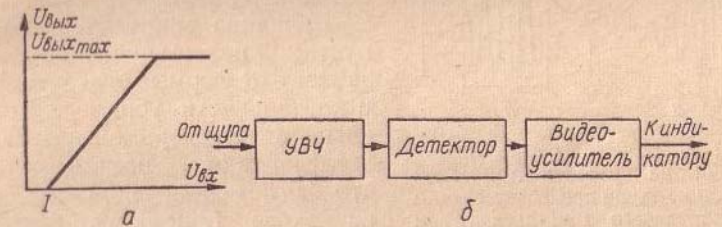


Рис. 37. Идеализированная амплитудная характеристика (а) и скелетная схема (б) приемника ультразвукового дефектоскопа для контроля сварных соединений:  $I$  — порог ограничения шумов.

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

Длительность зондирующих импульсов выбирается из условий обеспечения необходимой разрешающей способности. Так, для обеспечения разрешающей способности в 3 мм при прозвучивании стали поперечными волнами длительность импульсов согласно формуле (25) не должна превышать 2 мксек. Чем меньше длительность зондирующих импульсов, тем больше разрешающая способность. Однако следует помнить, что чрезмерное уменьшение длительности зондирующего импульса приводит к потере чувствительности приемного тракта дефектоскопа.

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

Под временем нарастания  $t_y$  сигнала понимают время, необходимое для увеличения напряжения от 0,1 до 0,9 установившегося выходного напряжения.



Время нарастания сигнала в усилителе обратно пропорционально полосе пропускания. С расширением полосы пропускания улучшаются показатели усилителя, связанные с искажениями сигнала. Однако при этом возрастает количество каскадов, необходимое для обеспечения заданного коэффициента усиления. Поэтому полоса пропускания обычно выбирается возможно меньшей, при которой искажения

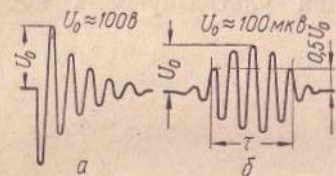


Рис. 38. Осциллограммы напряжений на пьезоэлектрической пластине щупа при возбуждении зондирующего импульса (а) и возвращении эхо-сигнала (б).

сигнала усилителем не выходят за пределы допустимых величин.

Величина минимально допустимой полосы пропускания зависит от формы огибающей и длительности усиливаемого сигнала. Экспериментальные исследования показывают, что огибающая эхо-сигнала на входе приемника имеет форму, близкую к колоколообразной (рис. 38). Полоса пропускания усилителя, обеспечивающая передачу колоколообразного импульса практически без искажений, определяется формулой

$$\Delta f = \frac{1}{\tau}, \quad (27)$$

где  $\Delta f$  — полоса пропускания приемного тракта на уровне 0,7;

$\tau$  — активная длительность импульса, т. е. длительность импульса на уровне 0,5.

Для обеспечения устойчивой работы дефектоскопа рассчитанная полоса пропускания должна быть расширена на величину ожидаемого ухода частоты.

Измерения показывают, что возможный уход частоты генератора ультразвуковых колебаний, обусловленный отклонением емкости пьезоэлектрической пластины от номинального значения, может быть сведен к незначительной величине. Необходимо лишь ввести регулировку индуктивности в контуре генератора. При этом можно ограничиться полосой пропускания приемного тракта, рассчитанного по формуле (27).

Принимая длительность зондирующего импульса  $\tau = 2$  мксек, находим значение полосы пропускания уси-

лителя высокой частоты:  $\Delta f = 0,5$  Мгц. Полоса пропускания видеоусилителя при этом должна составлять 0,25 Мгц.

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

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

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

$U_{\text{вх}}$  — величина сигнала на входе приемника.

При работе дефектоскопа по однощуповой схеме на вход приемника кроме эхо-сигналов малой величины поступают зондирующие импульсы, амплитуда которых измеряется иногда сотнями вольт. При воздействии на вход приемника сильных сигналов усиление его может временно снизиться. Поэтому должны быть приняты все необходимые меры для предотвращения перегрузки приемника и для 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 приемника из-за воздействия зондирующего импульса может быть значительно снижена, если между щупом и входом приемника поставить цепочку (рис. 39) из сопротивления 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 метод коррекции усиления УВЧ во времени путем изменения напряжения на управляющей сетке входной лампы.

Как упоминалось выше, для изменения коэффициента усиления во времени можно использовать отрицательный импульс, формируемый цепочкой  $R_3, C_3, R_4, R_5$  в генера-



торе ультразвуковых колебаний (см. рис. 33, б). В этом случае сопротивления  $R_4, R_5$  генератора включаются в цепь сетки входной лампы УВЧ в качестве сопротивлений утечки. В обычном состоянии напряжение на управляющей сетке относительно катода определяется током лампы, а также величиной сопротивления в цепи катода лампы и составляет 1—5 в.

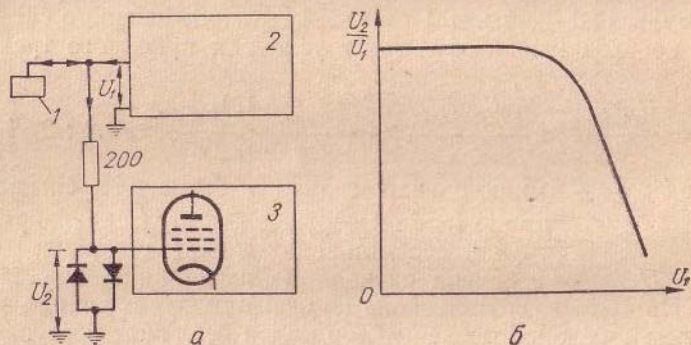


Рис. 39. Схема включения цепочки, предотвращающей проникновение зондирующего импульса на вход приемника (а) и ее амплитудная характеристика (б): 1 — щуп; 2 — генератор электрических импульсов; 3 — приемник.

При излучении зондирующего импульса отрицательный перепад напряжения, возникающий на сопротивлениях  $R_4, R_5$  генератора, запирает входную лампу и вызывает резкое снижение коэффициента усиления входного каскада, а следовательно, и всего приемника. По мере заряжения емкости  $C_3$  генератора напряжение на управляющей сетке относительно катода возвращается к своей обычной величине, что сопровождается увеличением коэффициента усиления приемника. Характер изменения напряжения на управляющей сетке, а следовательно, и характер изменения во времени коэффициента усиления приемника регулируются путем изменения величины переменного сопротивления  $R_4$  (см. рис. 33), ось которого может быть выведена на переднюю панель дефектоскопа.

Введение автоматической синхронизации усиления приемника во времени способствует также лучшему выявлению дефектов, залегающих на малой глубине.

Время восстановления усиления после перегрузки определяется при прочих равных условиях схемой и параметрами усилителя высокой частоты (УВЧ). Усилитель высокой частоты обычно выполняется по схеме широкополосного многокаскадного одноконтурного усилителя с настроенными в резонанс контурами (рис. 40). Резонансные одноконтурные усилители дают несколько меньшее усиление на каскад при заданной общей полосе пропускания, чем резонансные усилители с парами связанных контуров,

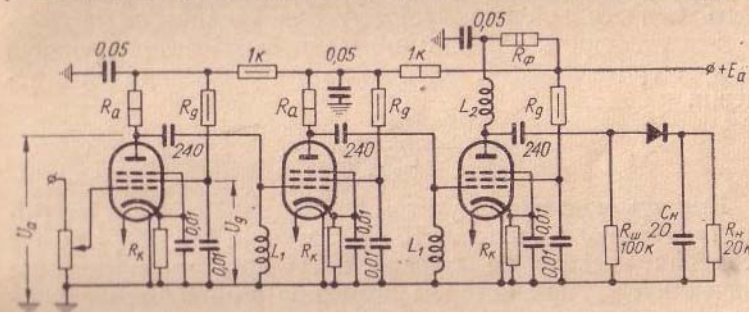


Рис. 40. Схема усилителя высокой частоты.

с парами расстроенных контуров и др. В то же время они обладают рядом преимуществ, к которым относятся простота монтажа и настройки, устойчивость резонансной характеристики, малое время восстановления усилителя после перегрузки и др. Коэффициент усиления  $K$  отдельного каскада УВЧ с одиночным колебательным контуром определяется выражением

$$K = \frac{S}{2\pi C_k \Delta f_1}, \quad (28)$$

где  $S$  — крутизна лампы;

$C_k$  — емкость контура;

$\Delta f_1$  — полоса пропускания каскада на уровне 0,7.

Полоса пропускания каскада связана с полосой пропускания всего УВЧ соотношением

$$\Delta f_1 = \frac{\Delta f}{\sqrt{n\sqrt{2}-1}}, \quad (29)$$

где  $\Delta f_1$  — полоса пропускания одного каскада;

$\Delta f$  — полоса пропускания всего усилителя;

$n$  — число каскадов в усилителе.



Из выражения (28) следует, что усиление каскада увеличивается с уменьшением емкости контура. Минимально возможная величина емкости контура  $C_k$  равна сумме емкости монтажа  $C_m$ , выходной емкости лампы  $C_{вых}$  и входной емкости следующей лампы  $C_{вх}$  т. е.:

$$C_k = C_m + C_{вых} + C_{вх}. \quad (30)$$

При применении контуров с минимальной емкостью входная и выходная емкости ламп составляют значительную часть емкости контура. Поэтому для увеличения коэффициента усиления каскада при заданной полосе пропускания следует брать лампы с возможно большей величиной отношения

$$\frac{S}{C_{вх} + C_{вых} + C_m}.$$

Емкость монтажа (с учетом собственной емкости катушки) трудно сделать меньше  $10 \text{ нф}$ . Заметим, что коэффициент усиления каскада не должен превышать максимального значения  $K_{max}$ , при котором возможно возникновение генерации усилителя из-за обратной связи через проходную емкость:

$$K_{max} \approx 0,42 \sqrt{\frac{S}{2\pi f_0 C_{с-а}}}, \quad (31)$$

где  $S$  — крутизна лампы;

$f_0$  — резонансная частота;

$C_{с-а}$  — проходная емкость лампы.

Необходимая полоса пропускания каскада обеспечивается подбором величины сопротивлений  $R_a$  и  $R_{ш}$ , которые, шунтируя контур, уменьшают его добротность и расширяют полосу пропускания. Величина сопротивлений  $R_a$  и  $R_{ш}$  в усилителе ультразвуковых дефектоскопов определяется выражениями

$$\frac{1}{R_{ш}} \approx 2\pi C_k (\Delta f_1 - \delta_k f_0) - \frac{1}{R_{вх.д}} \quad (32,а)$$

для окончного каскада и

$$\frac{1}{R_a} \approx 2\pi C_k (\Delta f_1 - \delta_k f_0) \quad (32,б)$$

для остальных каскадов УВЧ,

где  $C_k$  — емкость контура;

$\Delta f_1$  — полоса пропускания каскада;

$f_0$  — резонансная частота усилителя;

$\delta_k$  — затухание контура, равное  $0,01-0,05$ ;

$R_{вх.д}$  — входное сопротивление детектора.

В случае, если сопротивление  $R_a$  получается более  $10 \text{ ком}$ , то его следует устанавливать в сеточной цепи лампы следующего каскада или шунтировать дросселем во избежание значительного падения анодного напряжения.

Величина индуктивности контура определяется по формуле

$$L \approx \frac{25000}{f_0^2 C_k}, \quad (33)$$

где  $L$  — индуктивность контура,  $\text{мкгн}$ ;

$f_0$  — резонансная частота,  $\text{Мгц}$ ;

$C_k$  — емкость контура,  $\text{нф}$ .

В качестве видеодетектора в основном используют германиевые диоды, которые по сравнению с ламповыми имеют меньшее внутреннее сопротивление и переходную емкость, что обеспечивает большую передачу напряжений при меньших искажениях. Величина сопротивления нагрузки  $R_n$  выбирается из условия максимальной передачи напряжения при наименьших искажениях импульса.

Обычно усилитель высокой частоты дефектоскопа состоит из двух или трех каскадов. В табл. 7 приведены параметры усилителей высокой частоты (рис. 40) на лампах 6Ж1П, 6Ж5П и 6Ж9П.

Из табл. 7 видно, что УВЧ на лампах 6Ж9П и 6Ж5П обладают несколько большим усилением, чем на лампах 6Ж1П. Однако при этом потребляемая ими мощность значительно превосходит мощность, потребляемую УВЧ на лампах 6Ж1П. Поэтому в дефектоскопах, предназначенных для контроля сварных соединений в полевых условиях и работающих от аккумуляторов, целесообразнее применять УВЧ на лампах 6Ж1П.

Видеусилитель обычно выполняется на одной или двух лампах по реостатной схеме с корректирующей индуктивностью и предназначается для усиления протектированных импульсов. Лампа видеусилителя запирается по анодному току отрицательным напряжением на управляющей сетке, что способствует уменьшению потребляемой прибо-



Таблица 7  
 Параметры усилителя высокой частоты

Параметр	Единица измерения	Тип лампы		
		6Ж1П	6Ж5П	6Ж9П
Рекомендуемое постоянное напряжение на аноде $U_a$	в	120	300	150
Ток анода	ма	7,5	10	15
Рекомендуемое постоянное напряжение экранирующей сетки $U_g$	в	120	150	150
Ток экранирующей сетки	ма	2,5	2,5	2,5
Ток $J_f$ накала при напряжении 6,3 в	а	0,175	0,45	0,3
Входная емкость $C_{вх}$	пф	4,0	10	8,5
Выходная емкость $C_{вых}$	»	2,4	2,5	3,3
Прходная емкость $C_{с-л}$	»	0,02	0,03	0,03
Сопротивление $R_k$ в цепи катода для автоматического смещения	ом	200	160	80
Крутизна характеристики $S$	ма/в	5,0	9,0	17,5
Максимальное устойчивое усиление $K_{тах}$ на один каскад при частоте $f_0 = 3$ Мгц	—	49	53	74
Емкость контура выходного каскада $C_k = C_{вых} + C_d + C_m = C_{вых} + 11$	пф	13,4	13,5	14,3
Емкость контура каскадов, предшествующих выходному $C_k = C_{вых} + C_{вх} + C_m = C_{вых} + C_{вх} + 10$	пф	16,4	22,5	21,8
Добротность лампы $D = S/2\pi C_k 10^{-6}$	Мгц	49	64	128
Полоса пропускания каскада $\Delta f_1$	»	1,0	1,2	1,7
Коэффициент усиления каскада $K_1$	—	49	53	74
Коэффициент усиления двухкаскадного УВЧ	—	2400	2800	5450
Коэффициент усиления трехкаскадного УВЧ	—	120 000	150 000	404 000
Сопротивление $R_a$	ком	9,1	6,8	9,1
Напряжение $E_a$	в	200	370	300
Сопротивление $R_d$	ком	30	86	62
Сопротивление $R_\phi$	»	10	6,8	10
Индуктивность контуров при частоте 2,5 Мгц:				
$L_1$	мкгн	240	175	180
$L_2$	»	300	295	280
Индуктивность контуров при частоте 1,8 Мгц:				
$L_1$	»	470	340	355
$L_2$	»	575	570	540
Мощность, потребляемая одним каскадом УВЧ	вт	3	6,5	7

ром мощности и позволяет производить отсечку слабых сигналов, обусловленных многократными отражениями зондирующего импульса в призме щупа, отражениями от структуры металла и т. д. Опыт эксплуатации дефектоскопов показывает, что величина отсечки шумов может устанавливаться однажды при настройке и не регулироваться в дальнейшем.

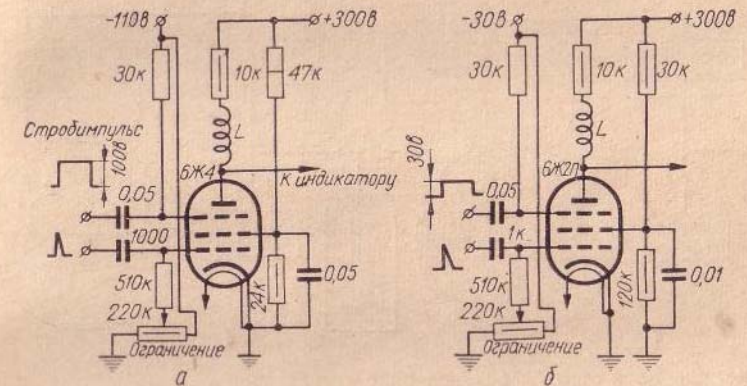


Рис. 41. Схема видеоусилителей-каскадов совпадений ультразвуковых дефектоскопов: а — УЗД-НИИМ-2; б — УЗД-НИИМ-5.

Весьма целесообразно использовать лампу видеоусилителя как лампу совпадений для селекции во времени поступающих на вход приемника сигналов. Для этого на управляющую и пентодную сетки лампы видеоусилителя должны быть поданы отрицательные напряжения, запирающие каждое в отдельности лампу по анодному току. Из поступающих на управляющую сетку лампы импульсов будут усилены и поданы на индикаторы лишь те, которые совпали во времени со специально поданным на пентодную сетку селектирующим импульсом. В каскадах совпадений могут быть применены радиолампы, имеющие вывод пентодной сетки, в частности 6Ж4, 6Ж4П, 6Ж2П и др. (рис. 41).

### Глубиномер

Основное назначение глубиномера — определение координат отражающей поверхности. В дефектоскопе, функциональная схема которого приведена на рис. 31, глубиномер используется также при регулировке величины контроли-



руемого участка и расположения контролируемого слоя на заданной глубине при контроле изделия по участкам. В основу работы глубиномера дефектоскопа положено измерение интервала времени между моментом излучения зондирующего и приемом отраженного импульса.

Интервал времени может быть грубо оценен по расположению отраженного импульса на экране трубки. Более

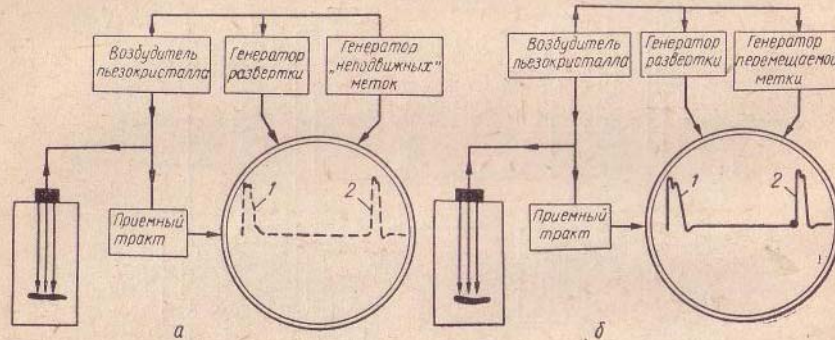


Рис. 42. Блок-схема дефектоскопа с генератором: а — «неподвижных» меток; б — перемещаемой метки; 1 — зондирующий импульс, 2 — импульс от дефекта.

точное измерение интервала времени производится 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.

В первом случае на линии развертки воспроизводится серия «неподвижных» меток, вырабатываемых специальным генератором (рис. 42, 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. 42, 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 приравнивается временному сдвигу эхо-импульса, чем и устанавливается значение определяемого интервала времени. Для непосредственного отсчета координат отражающей поверхности шкала генератора метки градуируется в миллиметрах глубины и расстояния отражающей поверхности от щупа.

Перемещаемая метка (рис. 43) 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 получать высокую точность совмещения ее с передним фронтом импульса.

В качестве генератора перемещаемой метки могут быть использованы устройства задержки:

- а) ультразвуковая линия;
- б) ждущий генератор импульса регулируемой длительности;
- в) линия из индуктивно-емкостных ячеек.

Глубиномеры с ультразвуковой линией задержки весьма сложны по конструкции и в эксплуатации, а также имеют значительные габариты и поэтому не могут быть рекомендованы для применения в современных дефектоскопах. Более целесообразным является использование в качестве устройства задержки генераторов импульсов, выполненных по фантастронной схеме. Электронный глубиномер на фантастроне, впервые примененный в дефектоскопе УЗД-НИИМ-2, позволяет получить необходимую точность отсчета, имеет равномерную шкалу, что упрощает процесс его изготовления и настройки, а также не требует стабилизации источника питания.

В дефектоскопах УЗД-НИИМ-3 импульс фантастрона подается непосредственно на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки (рис. 44), вызывая появление ступеньки на линии развертки. Длительность

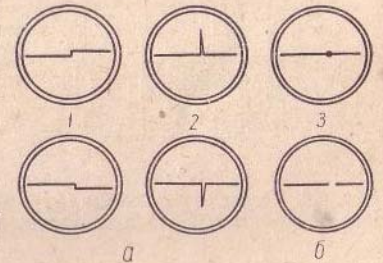


Рис. 43. Типы перемещаемых меток:

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







## Индикаторы

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

По типу применяемой развертки различают осциллографические индикаторы:

- а) с прямой разверткой по дальности (тип А);
- б) с разверткой «дальность — расстояние щупа от шва» (тип В);
- в) с разверткой «положение щупа по длине шва — расстояние щупа от шва» (тип С).

В индикаторах типа А (рис. 47, а) конец электронного луча 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

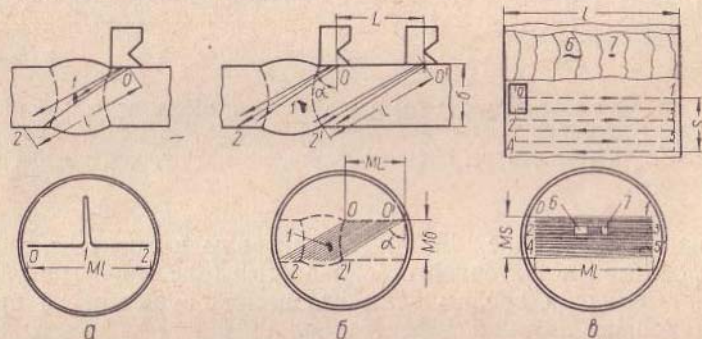


Рис. 47. Осциллографические индикаторы: а — типа А, б — типа В, в — типа С; М — масштаб изображения.

о расстоянии до отражающей поверхности. В качестве напряжения развертки времени удобно использовать предварительно усиленное пилообразное напряжение, генерируемое фантастроном на его аноде. Индикаторы типа А применяют в большинстве ультразвуковых дефектоскопов.

Следует отметить, что степень линейности развертки индикаторов типа А в дефектоскопах, имеющих глубиномер, не играет существенной роли.

В индикаторах типа В при отсутствии эхо-сигналов конец электронного луча прочерчивает на экране трубки светящийся растр. Перемещение конца луча совершается как под действием напряжения развертки времени, так и под действием напряжения датчика смещения щупа в направлении, перпендикулярном шву (рис. 47, б). Напряжение видеосигналов с выхода приемника, приложенное к управляющей сетке трубки, используется для изменения

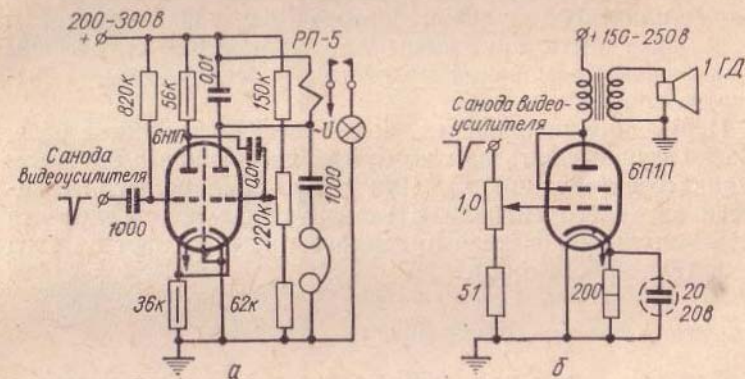


Рис. 48. Схемы электромеханического, оптического и звукового индикатора дефектоскопа УЗД-НИИМ-5 (а) и звукового индикатора большой мощности (б).

яркости луча, благодаря чему на экране появляются точки, резко отличающиеся по яркости, указывающие координаты отражающей поверхности.

Индикаторы типа В могут быть использованы при автоматизированном контроле для получения изображений поперечных сечений швов (см. гл. IX).

В индикаторах типа С также, как и в индикаторах типа В, осуществляется яркостная отметка отраженных сигналов. Конец электронного луча прочерчивает растр под воздействием напряжения датчиков: один датчик вырабатывает напряжение, пропорциональное смещению луча по длине шва, а другой — пропорциональное расстоянию от точки ввода луча до шва (рис. 47, в). По индикатору типа С можно судить о наличии дефектов и расположении их по длине шва. Индикаторы этого типа пока не нашли практического применения для контроля качества сварки.



Впервые они использованы в дефектоскопе НИИмостов для контроля швов методом «бегающего» луча [24].

В качестве электромеханического индикатора обычно применяют слаботочное электромагнитное реле, обмотка которого включена в анодную цепь нормально запертой лампы. Лампа управляется видеоимпульсами, поступающими с выхода приемного тракта. Для увеличения действующего значения тока, протекающего через обмотку реле в момент появления видеоимпульсов, используют тиратрон или триод мультивибратора (рис. 48, а). Контакты реле могут быть применены для управления оптическим индикатором (лампочкой подсвета), краскопультом, механизмом записи и т. п.

Переменное напряжение, возникающее на обмотке реле, удобно использовать для возбуждения сигнала в звуковом индикаторе (наушниках). Для достижения большой мощности звукового сигнала в момент обнаружения дефекта видеоимпульсы с выхода приемного тракта подают на вход усилителя (рис. 48, б).

#### Система селекции сигналов

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

Как указывалось выше, 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 щуп («Контроль от поверхности»);

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

Для того чтобы в режиме «Контроль от поверхности» при работе призматическими щупами на индикаторы не проникал посылочный импульс, запуск генератора селектирующего импульса (генератора развертки) должен производиться синхронизирующими импульсами, снимаемыми с генератора ультразвуковых колебаний и прошедшими устройство задержки. Вследствие этого импульс подсвета и селекти-

рующий импульс оказываются сдвинутыми во времени по отношению к зондирующему импульсу на время задержки. Очевидно, что время задержки должно быть не менее длительности посылочного импульса, но и не более времени прохождения ультразвукового импульса в призме щупа.

Это время в щупах с призмой из плексигласа не превышает 12 мксек. При такой малой величине времени задержки синхронизирующего импульса наиболее целесообразным с точки зрения стабильности работы, габаритов и стоимости является выполнение устройства задержки в виде линии из нескольких индуктивно-емкостных ячеек. В дефектоскопе УЗД-НИИМ-5 линия задержки состоит из девяти индуктивно-емкостных ячеек, расположенных в экране размером  $6 \times 5 \times 3$  см.

При контроле изделий по слоям запуск генератора селектирующего 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

В отечественной промышленности применяют импульсные ультразвуковые дефектоскопы УЗД-7Н ЦНИИТМАШ, В4-7И [62], УЗД-12, УЗД-14, УЗД-16 ЛЭТИ, УДМ-1М кишиневского завода «Электроточприбор» и специализированные дефектоскопы УЗД-НИИМ-3 и УЗД-НИИМ-5 (УЗД-59, УЗД-60) НИИмостов для контроля качества сварных соединений.

Дефектоскоп УЗД-7Н работает, как и остальные приборы, в импульсном режиме. Частота ультразвуковых колебаний 1,8 и 2,5 Мгц. Индикация дефектов производится по появлению импульсов на экране трубки. Глубиномер с ультразвуковой линией задержки проградуирован в микросекундах и в миллиметрах лишь для прямого щупа. Прибор одноблочный, вес около 16 кг, габариты  $400 \times 300 \times 180$  мм. Питание от сети переменного тока.

В дефектоскопе В4-7И используются ультразвуковые колебания с частотой 0,7; 1,5; 2,5 и 4 Мгц. К прибору прилагаются призматические щупы на частоту 2,5 и 1,5 Мгц. Основной индикатор дефектов — электронно-лучевая трубка.



Предусмотрены «электронная лупа» и возможность подключения дополнительного сигнализатора дефектов. Электронный глубиномер проградуирован в миллиметрах для

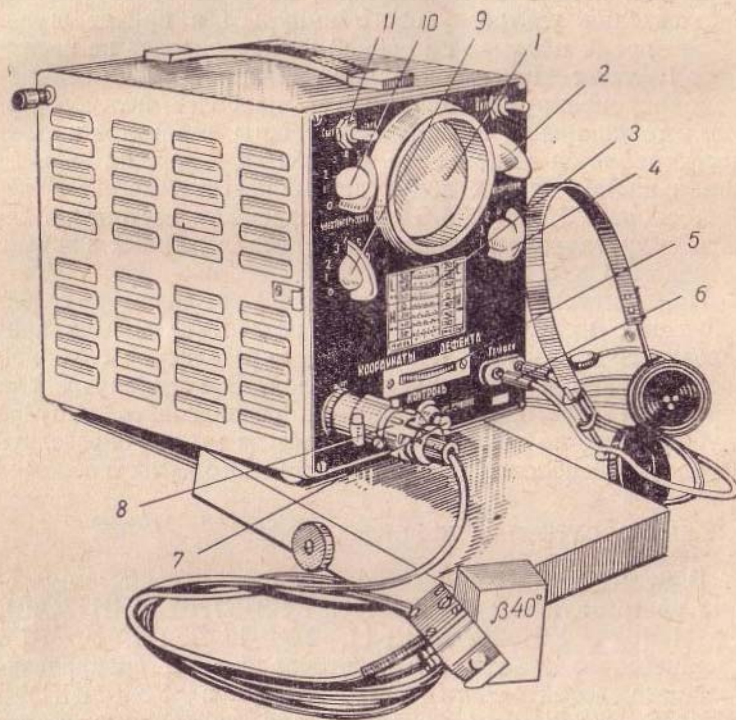


Рис. 49. Ультразвуковой дефектоскоп типа УЗД-НИИМ-5 (УЗД-60): 1 — экран; 2 — ручка «Глубина контроля», регулирующая величину контролируемого участка; 3 — шкала глубиномера с линзой; 4 — ручка регулировки длины развертки; 5 — ручка «Координаты дефекта»; 6 — гнезда для включения телефонных наушников; 7 — тумблер для установки одного из следующих режимов контроля: «Контроль от поверхности» или «Контроль по участкам»; 8 — разъем для подключения кабеля щупа; 9 — ручка регулировки характера изменения чувствительности во времени; 10 — ручка регулировки чувствительности (аттенуатор на входе приемника); 11 — тумблер для перевода лампочки, расположенной у щупа, из режима индикатора в режим непрерывного горения.

прямого щупа. Прибор одноблочный, вес около 18 кг, габариты  $530 \times 400 \times 200$  мм, питание от сети переменного тока.

Дефектоскоп УЗД-16 разработан на основе дефектоскопов УЗД-12 и УЗД-14. Несущая частота 1,25 и 2,5 Мгц.

Индикация дефектов производится по появлению звука в телефонных наушниках и импульса на экране трубки. Предусмотрены «электронная лупа» и электронный глубиномер, проградуированный в миллиметрах лишь для прямого щупа. Прибор одноблочный, вес 11 кг, габариты  $40 \times 28 \times 19$  см, питание от сети переменного тока.

Дефектоскоп УДМ-1М позволяет вести прозвучивание изделий с помощью призматических щупов на частотах 1,8; 2,5; 5 Мгц. Признаком обнаружения дефекта служит свечение неоновой лампочки и импульса на экране дефектоскопа. Электронный глубиномер имеет одну шкалу, которую по эталонам можно перестраивать на щупы с различными углами ввода луча. На экране дефектоскопа виден селектирующий импульс, длительность и положение которого можно регулировать. В дефектоскопе предусмотрена регулировка характера изменения коэффициента усиления во времени. Прибор одноблочный, вес около 14 кг, габариты  $430 \times 340 \times 220$  мм.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-5 (УЗД-59, УЗД-60) работает по однощуповой схеме на одной из следующих частот: 1,8; 2,5 или 3,0 Мгц (рис. 49). Его принципиальная схема приведена на рис. 50.

В дефектоскопе применена плавная регулировка характера изменения чувствительности в зависимости от глубины залегания пороков, что улучшает возможность выявления дефектов, расположенных на малой глубине.

Индикация дефектов производится по импульсам, возникающим на экране электронно-лучевой трубки, загоранию лампочки, расположенной на щупе, а также по появлению звука в телефонных наушниках. Световой и звуковой индикаторы повышают надежность контроля и облегчают работу оператора. Электромеханический индикатор (реле) позволяет при наличии специального приспособления вести автоматический контроль с регистрацией документа.

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 щупом и призматическими с углами падения луча 30, 40 и 50°, три — для измерения расстояния отражающей поверхности от передней грани щупа с теми же углами падения и одной — для измерения времени прохождения ультразвукового импульса







Головка для контроля сварных соединений (рис. 51) состоит из корпуса 6, в котором устанавливается щуп 7, винта 8, крепящего щуп в корпусе, лампочки с фарой 5, линейки 1 с миллиметровыми делениями, ограничителей 3, 4 и штока 2. В корпусе головки дефектоскопа УЗД-НИИМ-5А сделаны отверстия для подвода контактирующей жидкости под щуп и установлена кнопка включения двигателя помпы.

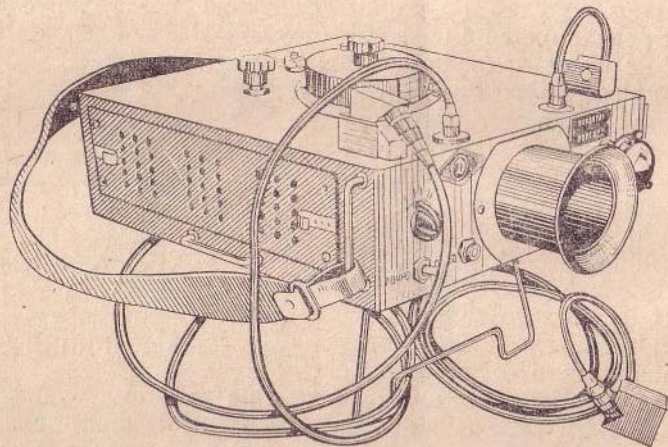


Рис. 52. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-3.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-3 (рис. 52) предназначен для контроля сварных соединений, расположенных на высоте и в труднодоступных местах. Прибор двухблочный, вес самого дефектоскопа около 4 кг, габариты  $27 \times 25 \times 8$  см. При работе дефектоскоп располагают на груди оператора с помощью специальных ремней.

Габариты, вес и потребляемая мощность УЗД-НИИМ-3 снижены по сравнению с УЗД-НИИМ-5 за счет исключения дополнительных индикаторов (слухового и электро-механического) и автоматической подачи жидкости к щупу. Индикация наличия дефекта производится по импульсам, возникающим на экране трубки.

В отношении чувствительности, измерения глубины и контроля по участкам УЗД-НИИМ-3 не отличается от УЗД-НИИМ-5.

Питание прибора от сети переменного тока или аккумуляторной батареи напряжением 12 в.

В 1962 году в СССР разработаны ультразвуковые дефектоскопы УЗД-13 (ЦНИИТМАШ), УЗД-НИИМ-9 и УЗД-НИИМ-10 (НИИмостов) для контроля сварных соединений.

Дефектоскоп УЗД-13 предназначен для контроля стыковых соединений большой толщины (0,3—1 м), где приходится прибегать к методу контроля по слоям (см.

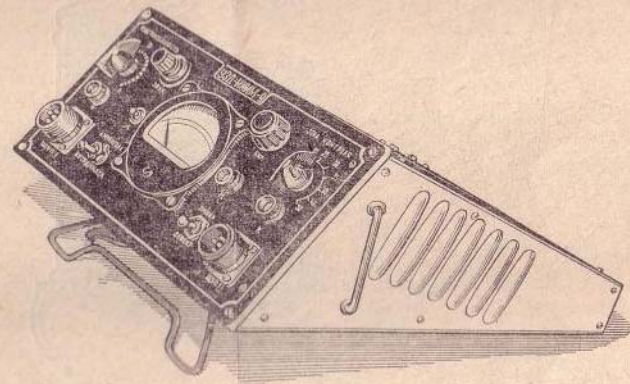


Рис. 53. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-9.

гл. V). 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, питание от сети переменного тока.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-9 разработан для контроля сварных заклепок (рис. 53). Однако он может быть применен и для дефектоскопии стыковых швов толщиной от 25 до 50 мм.

В дефектоскопе вместо электронно-лучевой трубки применен стрелочный индикатор обнаружения дефектов, являющийся одновременно указателем координат выявленных



дефектов. Измерение координат производится автоматически. В обычном состоянии стрелочный индикатор, включенный в режим глубиномера, указывает величину контролируемого участка, а при обнаружении дефекта стрелка отклоняется и указывает глубину расположения дефекта.

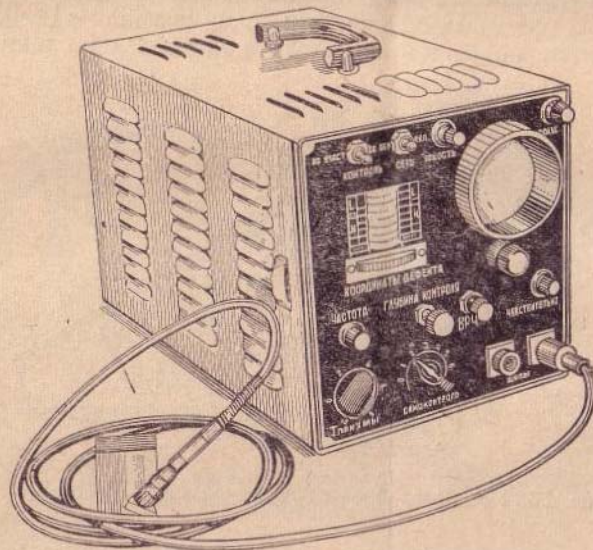


Рис. 54. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-10.

Кроме стрелочного индикатора в дефектоскопе предусмотрен звуковой и световой индикаторы. Несущая частота 2,5 МГц, прибор одноблочный, вес 6 кг, габариты 260 × 370 × 140 мм, питание от сети переменного тока.

Дефектоскоп УЗД-НИИМ-10 (рис. 54) разработан на основе прибора УЗД-НИИМ-5. В нем применен широкополосный усилитель с полосой от 0,5 до 5,5 МГц.

В возбuditеле пьезокристалла предусмотрена возможность настройки контура ударного возбуждения на различные частоты в указанном диапазоне. Для повышения надежности контроля в прибор введен канал самоконтроля. При возникновении неисправности в приборе или искателе автоматически подается аварийный звуковой сигнал. Шка-

лы глубиномера проградуированы в миллиметрах для искателей с углом ввода луча в сталь 40, 50 и 65°.

Для возможности использования глубиномера при работе с различными искателями на переднюю панель прибора выведен переключатель линии на время задержки, равное времени прохождения ультразвука в призме искателя.

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

За рубежом для контроля качества сварки применяют ультразвуковые дефектоскопы: Кретца в Австрии, Крауткремера в ФРГ, DIR-R в Польше, национализированного предприятия в ГДР, фирмы «Сперри» в США и др. Как правило, в этих приборах индикатором дефектов является электронно-лучевая трубка. Для измерения координат используют «неподвижные» метки времени, воспроизводимые на развертке. К приборам прилагается весьма большой ассортимент призматических щупов на разные частоты (от 0,5 до 14 МГц).

К некоторым дефектоскопам, например к дефектоскопам Кретца, прилагается отдельный сигнальный блок, облегчающий процесс контроля. При подключении блока к дефектоскопу на его экране, также как и на экране УДМ-1М, воспроизводится селектирующий импульс, определяющий собой величину и расположение контролируемого слоя в изделии. В блоке предусмотрена звуковая и световая сигнализация обнаружения дефекта, а также возможность контроля акустического контакта.

## 5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При контроле сварных соединений кроме дефектоскопа необходимо иметь: шабер, металлическую щетку и ветошь для очистки поверхности от грязи и брызг металла; метр для измерения параметров шва и координат выявленных дефектов; мел для отметки дефектных участков; карандаш и бумагу для регистрации результатов контроля; приспособления для перемещения щупа в заданных пределах (держатель щупа или магнитную линейку).

Разработанный в НИИмостов держатель щупов для контроля стыковых швов (рис. 55, а, б) состоит из корпуса 1, в котором устанавливается щуп, рейки 2 с миллиметровыми



делениями и ограничителей 3 и 4, которые при контроле отраженным лучом (рис. 54, а), поочередно упираются в кромки валика «усиления», ограничивают перемещение щупа; наружный ограничитель 4 фиксирует максимальное, а внутренний 3 — минимальное расстояние от щупа до кромки «усиления» шва.

При контроле прямым лучом (рис. 54, б) функцию ограничителя 3 выполняет передняя грань щупа, в связи с чем ограничитель 3 снимается с держателя или придвигается вплотную к щупу.



Рис. 55. Держатели щупов конструкции НИИМостов: а — для контроля стыковых швов отраженным лучом; б — для контроля стыковых швов прямым лучом; в — для контроля угловых швов.

Держатель для контроля угловых швов (рис. 55, 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 щупа, при котором конец трубки 4 упирается в полку, соответствует минимальному расстоянию щупа от шва, а положение, при котором выдвинутый до отказа пружиной шток 1 еще упирается в полку, соответствует максимальному расстоянию щупа от полки. Щуп при контроле перемещают так, чтобы конец штока упирался в полку.

Если при контроле необходимо перемещать щуп 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.

## 6. СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Достоверность метода ультразвуковой дефектоскопии обуславливается правильностью выбора основных параметров контроля и точностью соблюдения их в процессе прозвучивания.

К основным параметрам контроля, определяющим его надежность, следует отнести: частоту ультразвуковых колебаний, чувствительность дефектоскопа, угол ввода ультразвуковых колебаний, точность работы глубиномера и системы селекции, разрешающую способность, величину «мертвой» зоны, качество акустического контакта, а также траекторию и порядок перемещения щупа.

Составлению инструкции по ультразвуковой дефектоскопии сварного соединения, как правило, предшествуют экспериментальные исследования по выбору основных параметров контроля.

На первом этапе экспериментальные исследования обычно проводят на образцах соединений с искусственными дефектами (рис. 56). Для выбора необходимой чувствительности наиболее пригодны искусственные дефекты в виде торцовых отверстий с плоским дном, перпендикулярным оси ультразвукового луча (рис. 56, а). Однако необходимость изготовления отверстий для каждого угла ввода луча затрудняет применение их в производственных условиях.

Как это показано И. Н. Ермоловым [32], для определения чувствительности могут быть применены также искусственные дефекты в виде прорезей, образующих угловые отражатели (рис. 56, б, в). Для искателей с углом ввода луча  $\alpha \approx 40 \div 50^\circ$  амплитуда эхо-сигнала от прорези площадью  $S_1$  будет такой же, как амплитуда эхо-сигнала от торцового отверстия, площадь которого  $S \approx 2S_1 \sin \alpha$ , если прорезь вертикальна (рис. 56, б), или  $S \approx 2S_1 \cos \alpha$ , если прорезь горизонтальна (рис. 56, в).

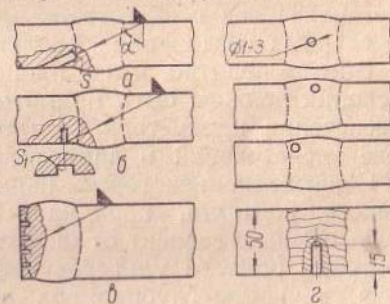


Рис. 56. Образцы с искусственными дефектами для выбора оптимальной чувствительности и методики прозвучивания.



Необходимо отметить, что, как показали теоретические и экспериментальные исследования А. С. Голубева [10], боковые отверстия не могут быть применены для оценки чувствительности при работе на поперечных волнах, так как не существует однозначной зависимости между диаметром отверстия и амплитудой отраженного сигнала.

Для уточнения методики прозвучивания (но не для оценки чувствительности) удобно применять комплект образцов с боковыми отверстиями (рис. 56, з).

На втором этапе исследования выполняют вначале на образцах швов с естественными дефектами, а затем уже на сварных соединениях реальной конструкции.

Вполне понятно, что в процессе ультразвуковой дефектоскопии должны быть приняты все возможные меры для обеспечения параметров контроля, установленных на основе исследований и записанных в инструкции.

Соблюдение некоторых параметров, например акустического контакта, порядка и траектории перемещения щупа, всецело зависит от оператора. Остальные параметры контроля (частота ультразвуковых колебаний, угол ввода луча, точность глубиномера и селективирующей системы, чувствительность, разрешающая способность, величина «мертвой» зоны) определяются только электрической схемой и конструкцией дефектоскопа, а также его работоспособностью. Действительно, даже у одного и того же дефектоскопа чувствительность может резко изменяться в зависимости от срока службы радиоламп, напряжения питания в сети переменного тока, 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 степени демпфирования пьезоэлектрической пластины. Поэтому для достижения наибольшей надежности необходимо в процессе дефектоскопии систематически проверять соответствие основных параметров контроля параметрам, предусмотренным инструкцией. Эта проверка не может быть выполнена на образцах, применяемых при отработке методики дефектоскопии. Кроме того, по этим нестандартным образцам невозможно сравнивать параметры дефектоскопов различных систем.

В связи с изложенным возникает необходимость стан-

дартизации методов проверки параметров дефектоскопии с помощью специальных эталонов. Методика проверки и эталоны должны быть достаточно удобными как для оценки возможностей и сравнения различных дефектоскопов, так и для настройки режима работы и систематической проверки параметров аппаратуры в процессе контроля сварных соединений в заводских и полевых условиях.

Комиссией по контролю качества сварки при Международном институте сварки на основе работ, выполненных в 1955—58 гг., рекомендован эталон (рис. 57) для наладки и проверки ультразвуковых дефектоскопов. Согласно указаний Комиссии, он предназначен для выполнения следующих операций:

1. Калибровки развертки по глубине и проверки линейности развертки. При этом прямой щуп 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 щупа, установленного в положение *D*. При этом предполагается, что время прохождения продольной волны 91 мм в стали равно времени прохождения поперечной волной 50 мм.

2. Настройки и проверки относительной чувствительности. При применении прямого щупа его устанавливают в положение *E* при большой чувствительности или в положение *J* при малой чувствительности. В первом случае мерилком относительной 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 щуп устанавливается в положение *K*; об относительной чувствительности судят по величине эхо-сигнала от отверстия диаметром 1,5 мм.

3. Проверки разрешающей способности только при контроле продольными волнами. Щуп должен находиться в положении *H*.

4. Контроля «мертвой» зоны только при работе продольными волнами. Прямой щуп устанавливают в положение *F* и *G*.

5. Определения центра излучения и угла ввода луча по методике, рассмотренной в разделе 2 гл. II.

6. Определения положения начальной точки на развертке и диаграмм направленности призматического щупа.



Безусловно, рассмотренный эталон в ряде случаев может оказаться весьма полезным. Однако при применении совершенной ультразвуковой аппаратуры, сконструированной с учетом требований, рассмотренных в разделе 1 настоящей главы, этот эталон нельзя признать достаточно эффективным.

Действительно, по этому эталону вряд ли может быть воспроизведена или проверена достаточно точно чувствительность дефектоскопа с призматическим щупом. Объясняется это тем, что в современных дефектоскопах с управляемой системой коррекции коэффициента усиления по глубине определение чувствительности по выявляемости одного отверстия, расположенного на глубине 25 мм, является недостаточным. Чувствительность таких дефектоскопов должна регулироваться по выявляемости двух несплошностей, одна из которых располагается на глубине, соответствующей минимальной глубине залегания возможных дефектов, а другая — на глубине, соответствующей восстановлению коэффициента усиления до максимальной величины. Кроме того, примененный в эталоне отражатель не дает однозначной зависимости между амплитудой отраженного сигнала и частотой ультразвуковых колебаний.

Рассмотренный эталон не позволяет также оценивать разрешающую способность и величину «мертвой» зоны дефектоскопа при работе с призматическими щупами. Значительные габариты эталона и большой вес (около 5 кг) затрудняют пользование им в производственных условиях.

Очевидно, габариты и конфигурация эталона были выбраны из условий обеспечения возможности калибровки развертки по глубине. В современных дефектоскопах, имеющих глубиномеры, необходимость в калибровке развертки отпадает, что делает возможным упрощение конструкции эталона и уменьшение его веса.

Более целесообразным, по нашему мнению, является применение двух эталонов (рис. 58), разработанных НИИМОСТов.

При разработке двух 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 и положение центра излучения щупа, величина «мертвой» зоны и разрешающая способность) целесообразно

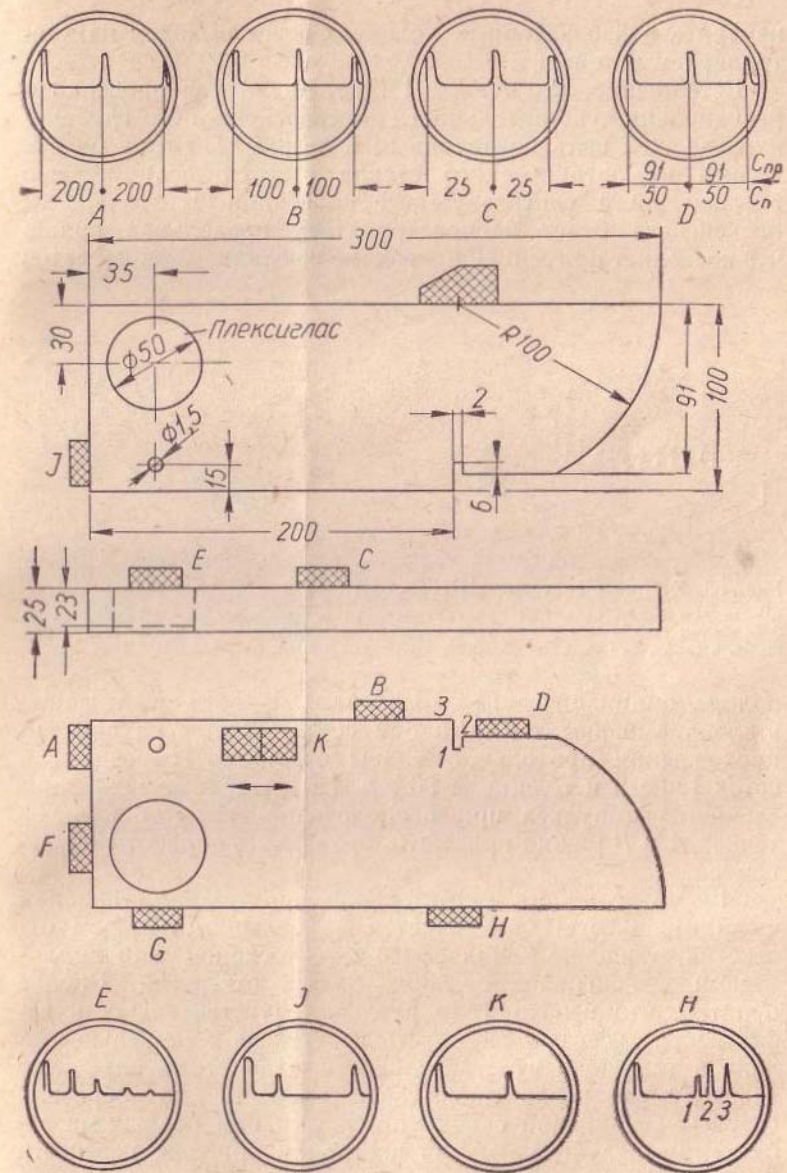


Рис. 57. Эталон для наладки ультразвуковых дефектоскопов, рекомендованный Международным институтом сварки.



измерять в лабораторных условиях перед выходом на контролируемый объект.

Естественно, что эталон I (рис. 58, а) для проверки и регулировки чувствительности дефектоскопа и его глубиномера должен быть портативным и легким. Поэтому он выполнен из органического стекла (плексигласа), хорошо поглощающего ультразвуковые колебания. В эталоне из плексигласа будет распространяться продольная волна, что позволяет применить в качестве искусственных дефектов

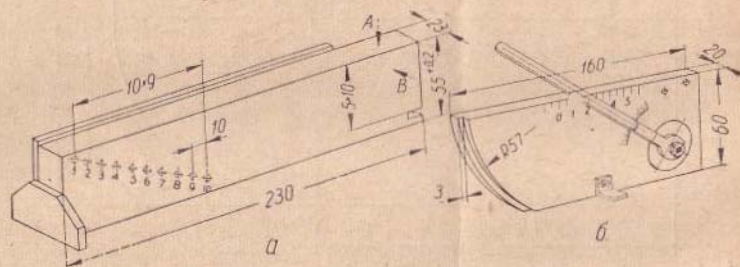


Рис. 58. Эталоны системы НИИмостов:

а — эталон I для проверки чувствительности и точности работы глубиномера; б — эталон II для измерения угла ввода луча и определения центра излучения щупа, а также для оценки величины «мертвой» зоны и разрешающей способности.

полые цилиндрические отверстия. Высота и толщина эталона выбраны так, что они соответствуют по времени прохождения продольной волны стальному образцу высотой 120 мм и толщиной 50 мм. По измерению координат «донного» импульса при расположении прямого щупа в точках А и В можно проверить правильность работы глубиномера.

Чувствительность дефектоскопа по эталону (условная чувствительность) определяется наибольшим номером отверстия, уверенно выявляемого дефектоскопом, или амплитудами эхо-сигналов от двух любых отверстий. Вполне понятно, что необходимая реальная чувствительность дефектоскопа всегда может быть переведена с помощью эталона в условную чувствительность. Для этого, определив необходимую реальную чувствительность на образцах сварных соединений с искусственными или реальными дефектами, следует, не меняя настройки прибора, перенести искатель на плексигласовый эталон и установить, какие отверстия в эталоне уверенно выявляются.

Регулировка дефектоскопа в процессе контроля на условную чувствительность и проверка его по малогабаритному эталону, вес которого не превышает 0,3 кг, не представляет трудности. При необходимости воспроизвести ту же чувствительность дефектоскопа достаточно настроить прибор на выявление тех же отверстий в эталоне. При этом, конечно, необходимо, чтобы частота колебаний и угол прзмы сохранялись неизменными.

Эталон II (рис. 58, б) весом около 1 кг предназначается для измерения остальных параметров контроля: угла ввода луча и положения центра излучения щупа, разрешающей способности и «мертвой» зоны. Первые два параметра измеряются по методике, изложенной в разделе 2 гл. II. Разрешающая способность определяется по расположению на экране эхо-сигналов от уступов и торца образца. Величина «мертвой» зоны оценивается по выявляемости боковых отверстий, расположенных на глубине 3 и 8 мм.

Для определения значения углов ввода луча в шов с высокой точностью измерения на эталоне следует производить при той же температуре, что и контроль, или вносить температурную поправку, если измерение выполняется при другой температуре.

Угол ввода поперечной волны  $\alpha$  в металл связан с температурой окружающей среды уравнением

$$\alpha \approx \arcsin \left[ \frac{C_{m_0} - \Delta C_m (t - 20^\circ)}{C_{n_0} - \Delta C_n (t - 20^\circ)} \sin \beta \right],$$

где  $C_{m_0}$  — скорость распространения поперечной волны в контролируемом металле при температуре  $t = +20^\circ\text{C}$ ; в стали  $C_{m_0} \approx 3260$  м/сек;

$C_{n_0}$  — скорость распространения продольной волны в призме искателя при температуре  $t = +20^\circ\text{C}$ ; в призме из плексигласа  $C_{n_0} \approx 2670$  м/сек;

$\Delta C_m$  — температурный коэффициент скорости распространения поперечной волны в металле; по данным, полученным И. Г. Михайловым, в стали  $\Delta C_m \approx 0,4$  м/сек · град;

$\Delta C_n$  — температурный коэффициент скорости распространения продольной волны в призме искателя; по данным, полученным в НИИмостов, в плексигласе  $\Delta C_n \approx 3$  м/сек · град;

$t$  — температура воздуха (металла и искателя);

$\beta$  — угол падения волны (угол прзмы искателя).



На рис. 59 дан график зависимости угла ввода ультразвукового луча в сталь от температуры воздуха, построенный по приведенной формуле. По этому или подобным графикам легко может быть определена температурная поправка на измеренное значение угла ввода луча.

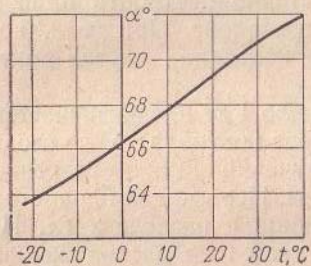


Рис. 59. Зависимость угла ввода луча  $\alpha$  в сталь от температуры воздуха  $t$ ; угол призмы из плексигласа  $\beta \approx 50^\circ$ .

Очевидно, что эталон II для измерения угла ввода луча и величины «мертвой» зоны должен быть изготовлен из контролируемого металла или из металла, близкого по акустическим свойствам к контролируемому.

В целях упрощения изготовления эталона II из различных металлов вводится дополнительный эталон. Он аналогичен по конфигурации описанному выше эталону II (рис. 58, б), но изготавливается из плексигласа. По этому эталону можно определять центр излучения щупа, угол падения ультразвукового луча (угол призмы) и оценивать

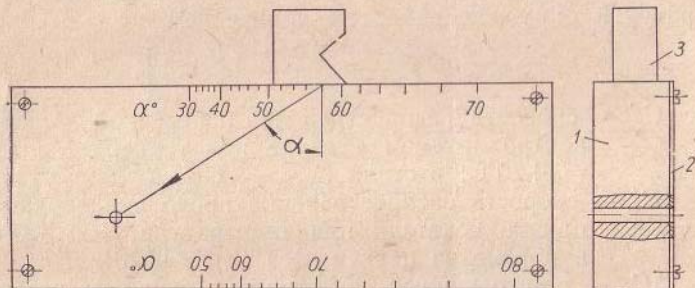


Рис. 60. Эталон II упрощенной конструкции для определения угла ввода звукового луча в контролируемый металл:

1 — образец из контролируемого металла; 2 — шкала; 3 — щуп.

разрешающую способность прибора. В этом случае эталон II, предназначенный теперь только для определения угла ввода луча и величины «мертвой» зоны, может быть прямоугольным и легко изготовлен из контролируемого металла. Его шкала, проградуированная в градусах, крепится к металлу четырьмя болтами (рис. 60).

Итак, предлагается для стандартизации основных параметров ультразвукового контроля применять:

1. Эталон I из органического стекла — для определения и воспроизведения условной чувствительности дефектоскопа, для проверки точности работы электрической части глубиномера; этот эталон может быть использован как при работе с наклонными, так и с прямыми искателями.

2. Эталон II из контролируемого металла — для измерения угла ввода луча и для оценки величины «мертвой» зоны.

При необходимости определения центра излучения щупа, угла падения луча и оценки разрешающей способности может быть применен дополнительный эталон из органического стекла.

Применение предлагаемых эталонов позволит стандартизировать условия прозвучивания швов, что будет способствовать повышению надежности контроля.



### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль стыковых сварных соединений, как правило, осуществляют методом отражений по однощуповой схеме. Значительно реже применяют метод контроля двумя искательными головками.

Вводить ультразвуковые колебания с помощью прямых щупов непосредственно в наплавленный металл нельзя, так как между грубой неплоской поверхностью «усиления» и щупом не удастся создать удовлетворительный акустический контакт. Поэтому прозвучивание швов ведут с помощью призматических щупов, зигзагообразно перемещаемых в определенных пределах вдоль шва (рис. 61, 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 [11].

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 однажды отраженным лучом чувствительность дефектоскопа оказывается недостаточной.

При прозвучивании шва с одной поверхности прямым лучом (рис. 61, б) остается непроконтролированной «мертвая» зона, высота  $l_{min}$  которой связана с шириной «усиления»  $b$  соотношением

$$l_{min} = \left(\frac{b}{2} + d\right) \operatorname{ctg} \alpha,$$

где  $b$  — ширина «усиления»;

$d$  — расстояние центра излучения щупа от его передней грани;

$\alpha$  — 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.

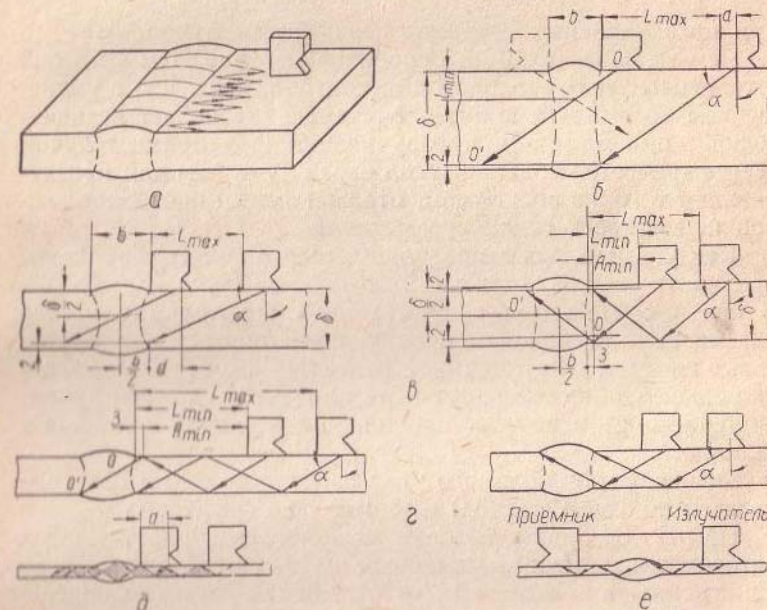


Рис. 61. Схемы прозвучивания стыковых сварных швов.

Значение «мертвой» зоны определяется цифрой по шкале «Н» для применяемого типа щупа, расположенной против значения  $b/2$  на соответствующей шкале «L».

Для обеспечения большей чувствительности и уменьшения «мертвой» зоны каждый шов контролируют щупами с различными углами ввода луча. Типы щупов и их количество выбирают опытным путем.

Швы толщиной 25—150 мм могут быть прозвучены с одной поверхности основного металла прямым и однажды отраженным лучом (рис. 61, в). При этом угол ввода  $\alpha$  выбирают таким, чтобы ось луча в одном из положений щупа пересекла ось симметрии шва толщиной  $\delta$  на



глубине  $0,5\delta$ . Величина угла  $\alpha$  определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{b}{\delta} + \frac{2d}{\delta} \quad (34)$$

при прозвучивании прямым лучом и

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{b}{\delta} \quad (35)$$

при прозвучивании однажды отраженным лучом.

Чем меньше толщина основного металла, тем больший угол ввода луча необходим для контроля шва, ибо с уменьшением толщины  $\delta$  ширина  $b$  «усиления» падает незначительно; при этом для прозвучивания шва прямым лучом всегда требуется больший угол ввода луча, чем для прозвучивания того же шва лучом, отраженным от противоположной поверхности основного металла.

Как указывалось выше, удовлетворительные результаты при контроле дают щупы с углами ввода луча меньше  $70^\circ$ . В связи с этим при существующей конструкции щупов оказывается возможным прозвучивать прямым лучом стыковые швы металла толщиной более 20—25 мм. Швы металла меньшей толщины могут быть прозвучены только лучом, претерпевшим одно или несколько отражений в основном металле.

Значение минимального угла ввода луча может быть вычислено по формулам (34) и (35) или по графикам.

На рис. 62 приведена одна из номограмм, рассчитанных автором для контроля стыковых швов. По графику I этой номограммы в зависимости от отношения  $b/\delta$  легко определить величину минимального угла ввода луча для прозвучивания шва прямым и однажды отраженным лучом. Для контроля следует применять щуп с углом ввода, равным или большим угла, рассчитанного по графикам или формулам. По графикам II и III определяют пределы перемещений этого щупа.

Обычно к дефектоскопу придают щупы с определенным углом ввода ультразвукового луча. Возможность применения одного из этих щупов для прозвучивания стыкового сварного соединения может быть оценена по шкале глубиномера (при применении дефектоскопов системы НИИМОСТов) или по координатной линейке. Для этого визирную линию в глубиномере или на координатной линейке располагают по шкале «L», соответствующей данному щупу, против

значения  $b/2$  для прозвучивания прямым лучом или  $b/2 + 3 - d$  для прозвучивания отраженным лучом; затем по шкале «H», соответствующей тому же щупу, отсчитывают значение  $h$ . Очевидно, что если величина  $h \leq \delta/2$ , то

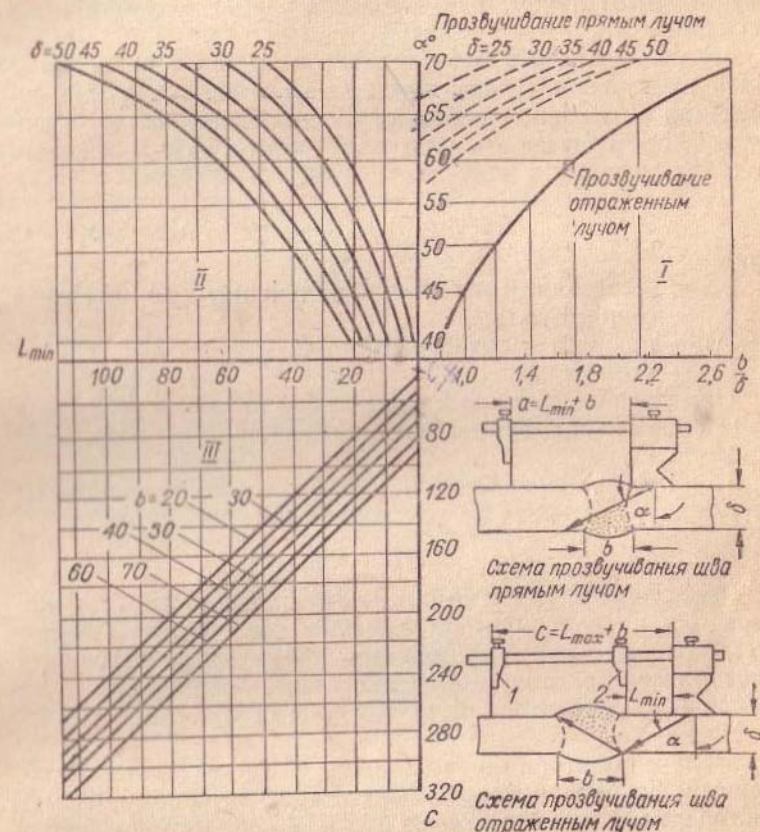


Рис. 62. Номограмма для контроля стыковых швов металла толщиной от 25 до 50 мм.

щуп может быть применен для прозвучивания данного сварного соединения.

Швы толщиной 8—25 мм контролируют щупом с углом ввода луча  $\alpha = 65 \div 70^\circ$  ( $\beta = 50^\circ$ ). При этом нижняя часть шва прозвучивается дважды отраженным лучом, а верхняя — однажды отраженным (см. рис. 61, e).



В тех случаях, когда для металла толщиной 22, 24 и 25 мм ширина валика «усиления» со стороны поверхности, по которой перемещают щуп, не превышает соответственно 8, 12 и 15 мм, нижняя часть сечения шва может быть прозвучена прямым лучом, излучаемым щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$ .

Швы листов толщиной менее 8 мм могут быть прозвучены лучом, претерпевшим многократные отражения в основном металле. Минимальное число отражений, претерпеваемых ультразвуковым лучом в основном металле до входа в шов,

$$n_{\min} = \frac{d}{\delta \operatorname{tg} \alpha},$$

где

$d$  — расстояние от центра излучения до передней грани щупа;

$\delta$  — толщина основного металла;

$\alpha$  — угол ввода луча.

При контроле стыковых швов любой толщины угол ввода луча и способ прозвучивания определяют собой зону перемещения щупа.

При прозвучивании шва прямым лучом щуп перемещают от валика «усиления» на расстояние (см. рис. 61, б, в)

$$L_{\max} \approx \delta \operatorname{tg} \alpha - d. \quad (36)$$

Расстояние  $L_{\max}$  легко определить по шкалам глубиномера или по координатной линейке. Для этого на шкале «Н», соответствующей применяемому щупу, надо установить против визирной линии значение толщины металла  $\delta$ , а на шкале «L», соответствующей тому же щупу, прочесть расстояние  $L_{\max}$ .

В случае контроля шва однажды или многократно отраженным лучом щуп перемещают в зоне, ограниченной минимальным  $L_{\min}$  и максимальным  $L_{\max}$  расстояниями от валика «усиления»:

$$L_{\min} \approx n \delta \operatorname{tg} \alpha - d + 3 \text{ мм} = A_{\min} + 3 \text{ мм}; \quad (37)$$

$$L_{\max} \approx (n + 1) \delta \operatorname{tg} \alpha - d, \quad (38)$$

где  $n$  — число отражений ультразвукового луча в металле;

$\delta$  — толщина основного металла;

$d$  — расстояние от центра излучения щупа до передней грани щупа;

$\alpha$  — угол ввода луча.

Величины  $A_{\min}$  и  $L_{\max}$  также определяют с помощью глубиномера или координатной линейки. Для этого при определении  $A_{\min}$  на шкале «Н», соответствующей данному щупу, против визирной линии устанавливают величину  $\delta n$  (толщина металла, умноженная на число отражений), а при определении  $L_{\max}$  — величину  $\delta (n + 1)$  (толщина металла, умноженная на число отражений плюс единица); при этом на шкале «L», соответствующей тому же щупу, читают в первом случае расстояние  $A_{\min}$ , а во втором —  $L_{\max}$ .

Для обеспечения перемещения щупа в заданных пределах его рекомендуется устанавливать в держатель для контроля стыковых сварных швов (см. рис. 55). При прозвучивании прямым лучом (рис. 62) ограничитель 1 снимают, а ограничитель 2 устанавливают на расстоянии  $a = L_{\min} + b$ .

При применении специализированных дефектоскопов со звуковыми и оптическими 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  $\delta - 2$  мм. Прозвучивание шва отраженным лучом следует производить в режиме «Контроль по участкам» при величине участка  $\delta - 4$  мм, расположенного на глубине  $n\delta + 2$  мм.

В случае применения дефектоскопов системы НИИМОС-тов (УЗД-НИИМ-3 и УЗД-НИИМ-5) настройка прибора для контроля стыковых швов сводится к следующему: тумблер 7 (см. рис. 49) устанавливают в режим «Контроль от поверхности», а ручку 5 «Координаты дефекта» — в положение, соответствующее величине  $\delta - 2$  мм при прозвучивании прямым лучом и  $\delta - 4$  мм при прозвучивании отраженным лучом; затем ручкой 2 «Глубина контроля» устанавливают длительность развертки так, чтобы метка глубины (пятно или ступенька) была расположена на правом конце линии развертки. Если предполагается вести прозвучивание шва отраженным лучом, то тумблер 7 переключают в положение «Контроль по участкам» и устанавливают в положение «Контроль по участкам» и устанавливают в положение  $n\delta + 2$  мм. При такой настройке дефектоскопа линия развертки на экране (рис. 63, б) будет соответствовать участку пути



ультразвукового луча в наплавленном металле шва (участок  $O-O'$  на рис. 63, *a*).

Настройка дефектоскопов типа УЗД-7Н значительно сложнее и производится с помощью координатной линейки или номограмм. Экраны трубок этих дефектоскопов, настроенных на прозвучивание стыковых швов, изображены на рис. 63.

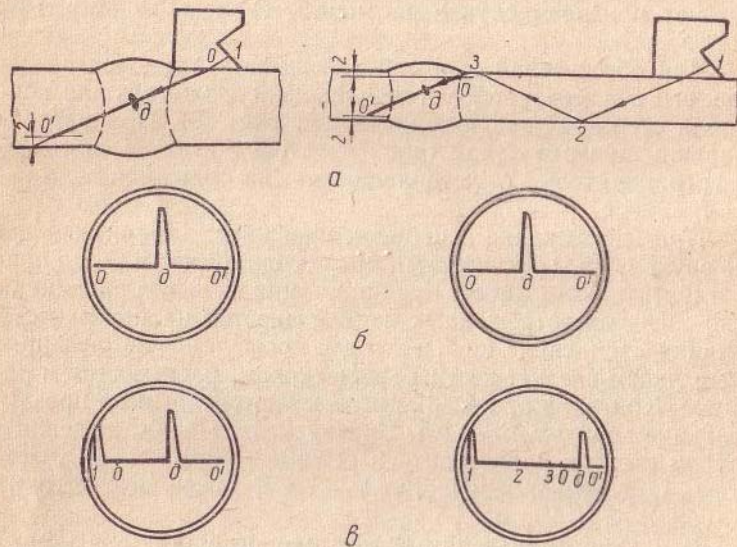


Рис. 63. Схемы прозвучивания шва (*a*) и экраны дефектоскопов типов УЗД-НИИМ-5 (*б*) и УЗД-7Н (*в*).

Сопоставление рис. 63, *б*, *в*, *г* показывает, что только в дефектоскопах системы НИИмостов достаточно полно используется экран трубки и весьма просто производится настройка режима для контроля стыковых сварных соединений.

Следует отметить, что даже при соблюдении изложенных указаний по настройке режима работы дефектоскопа возможно проникновение на индикаторы 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. 64).

Для того 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.

В швах толщиной менее 8 мм весьма сложно отличать эхо-сигналы от дефектов от ложных эхо-сигналов, вызванных неровностями валика «усиления». Поэтому в настоящее время метод ультразвукового контроля стыковых швов с помощью поперечных волн широко применяют лишь при толщине свариваемых листов более 8 мм. В отдельных случаях швы толщиной менее 8 мм контролируют по двухщуповой схеме [28].

## 1. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

При изготовлении и монтаже пролетных строений железнодорожных мостов широко используют метод ультразву-

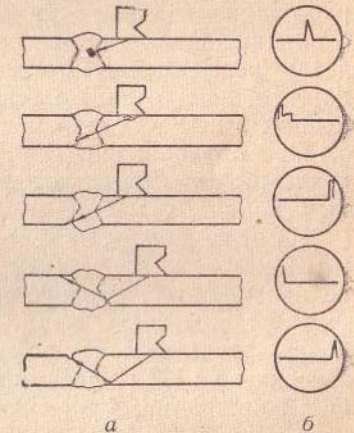


Рис. 64. Проулучивание стыковых швов отраженным лучом (*a*) и изображения на экране дефектоскопа системы НИИмостов, работающего в режиме «контроль по участкам» при регистрации эхо-сигналов от дефекта и неровностей на поверхности (*б*).



ковой дефектоскопии стыковых сварных соединений толщиной от 10 до 50 мм.

Ультразвуковой контроль производят с помощью дефектоскопов типов УЗД-НИИМ-5 и УЗД-НИИМ-3 в соответствии с правилами, утвержденными Министерством путей сообщения.

Контролю по изложенной выше методике подвергают 100% длины стыковых швов I категории и 30% длины каждого шва II категории. Результаты контроля фиксируют в специальном журнале, в котором приводят данные о толщине металла, ширине валика «усиления», типе и пределах перемещения щупов, «условной» чувствительности дефектоскопа, а также эскиз шва с расположением выявленных в нем дефектов.

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 дефектоскопии не позволяют безоговорочно забраковать шов, сомнительный участок шва подвергают рентгенографированию с целью уточнения характера включений. Кроме того, на заводах до 1962 г. рентгенографировали каждый стыковой шов I категории, даже если в нем по данным ультразвукового контроля отсутствовали какие-либо дефекты. При этом преследовалась цель выявления одиночных недопустимых пороков, возможно пропущенных 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 методом ультразвуковой дефектоскопии и рентгенографирования. Исследования проводились на специально сваренных для этой цели соединениях металла 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 производился независимо друг от друга тремя операторами, которым результаты рентгенографирования не были известны.

Анализ результатов комплексного контроля и последующего металлографического исследования 30 образцов

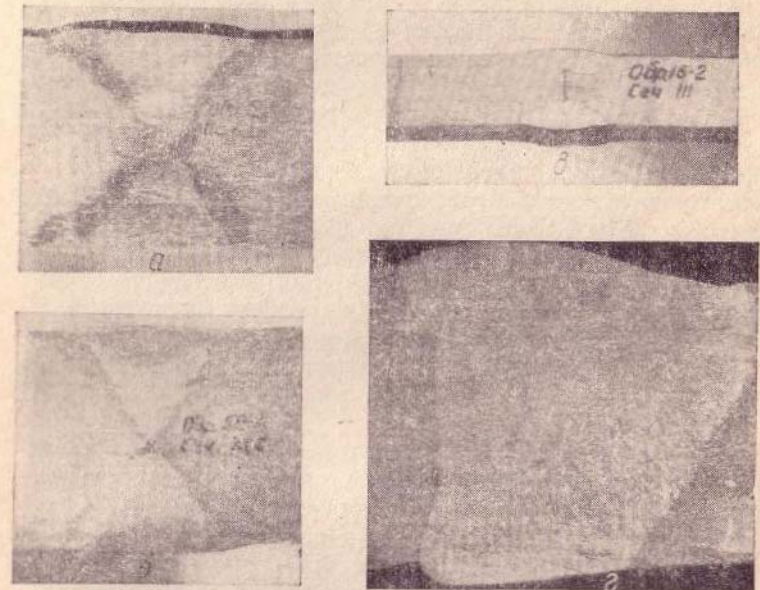


Рис. 65. Макрошлифы стыковых сварных швов, в которых ультразвуковой дефектоскопией выявлены дефекты, не обнаруживаемые рентгенографированием:

а — шов толщиной 50 мм с трещиной; б — шов толщиной 50 мм с порами; в — шов толщиной 16 мм с трещиной; г — шов электрошлаковой сварки толщиной 50 мм с несплавлением.

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 трех образцах, фотографии макрошлифов которых приведены на рис. 65, а, в, г, ультразвуком были зафиксированы трещины, не обнаруженные рентгенографированием.



Одиночные включения малой величины, не выходящие за пределы допусков, ультразвуковой дефектоскопией в общем обнаруживаются менее уверенно, чем рентгенографированием.

Выявляемость одиночных дефектов ультразвуковым контролем во многом определяется сосредоточенностью оператора. Необходимо отметить, что при больших толщинах свариваемого металла (более 25 мм) подобные дефекты в равной мере могут быть пропущены и рентгенографированием. На рис.65, б приведен макрошлиф, на котором видны поры, пропущенные при рентгенографировании и выявленные ультразвуковой дефектоскопией.

Заметим, что в процессе исследований число пропусков дефектов при рентгенографировании швов толщиной более 30 мм оказалось выше, 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 таких случаев было шесть. При толщине металла 40 мм было два случая пропуска дефектов при ультразвуковом контроле и четыре — при рентгеновском.

Учитывая большой опыт применения ультразвуковой дефектоскопии в мостостроении и результаты описанных выше исследований, с 1962 г. отменено обязательное рентгенографирование швов I категории при изготовлении пролетных строений. Рентгенографирование оставлено лишь для периодической проверки работы оператора и ультразвукового дефектоскопа, а также для уточнения в ряде случаев характера выявленных ультразвуком дефектов.

Внедрение метода ультразвуковой дефектоскопии в мостостроение позволило значительно расширить объем контроля, производить проверку качества сварки непосредственно на рабочих местах без нарушения нормального хода производственного процесса.

Весьма эффективным оказалось применение этого метода при монтаже новых и обследовании эксплуатируемых пролетных строений, где он уже несколько лет применяется практически без дублирования просвечиванием. Производительность ультразвукового контроля в условиях монтажа и эксплуатации оказалась в 3—5 раз выше производительности гаммаграфирования. Так, за один рабочий день при обследовании пролетных строений в 1962 г. удалось прокон-

тролировать дефектоскопом УЗД-НИИМ-5 18 стыковых швов металла толщиной 30—50 мм, на что при контроле гаммаграфированием потребовалось бы около четырех дней.

## 2. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПАРОПРОВОДАХ И КОТЛАХ

Метод ультразвуковой дефектоскопии сварных швов труб и котлов находит широкое применение при строительстве и в процессе ремонта паропроводов тепловых электростанций, при ремонте паровозов в процессе изготовления автоклавов, газгольдеров и других сосудов.

Для контроля швов паропроводов используют обычно дефектоскопы с рабочей частотой ультразвуковых колебаний 1,8 МГц, в частности, УЗД-7Н и УЗД-60 (УЗД-НИИМ-5). Наружную часть шва прозвучивают однажды отраженным, а внутреннюю — дважды отраженным лучом, излучаемым щупом с углом призмы  $\beta = 40^\circ$ . Применение щупа с углом  $\beta = 40^\circ$  для прозвучивания внутренней части шва вместо щупа с углом  $\beta = 50^\circ$  позволяет оценивать характер и размеры выявленных дефектов по формам эхо-сигналов от них и подкладного кольца.

Вначале метод ультразвукового контроля швов паропроводов применялся лишь для обнаружения участков с внутренними включениями. Окончательная оценка качества этих участков производилась по результатам последующего гаммаграфирования. Практика применения ультразвуковой дефектоскопии показала, что этим методом надежно выявляются различные недопустимые дефекты в швах труб, в том числе трещины и тонкие непровары, не обнаруживаемые гаммаграфированием. Поэтому, начиная с 1959 г., для контроля швов паропроводов из низколегированных сталей используют в основном ультразвуковую дефектоскопию.

Ультразвуковой контроль без дублирования просвечиванием применяют также при оценке качества швов котлов паровозов при их ремонте. Прозвучиванию подвергают швы по всей длине, имеющей иногда протяженность до 15 м. Внутреннюю часть шва толщиной 18 мм прозвучивают прямым лучом, а наружную часть — однажды отраженным лучом, излучаемым щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$ . Для контроля используют дефектоскопы 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.

Аналогичная методика ультразвукового контроля применяется для исследования качества сварки циркуляционных труб диаметром 90 мм при толщине стенки 5 мм. Валик «усиления» этих швов в соответствии с техническими условиями на сварку зачищают до плавного перехода к основному металлу. Прозвучивают швы многократно отраженным лучом, излучаемым щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$ .

Щуп с обычной плоской рабочей гранью перемещают по цилиндрической поверхности трубы.

Интересно отметить, что при этом не наблюдается эхосигналов 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 упомянутых напльвах, которые при рентгенографировании дают ложное представление о наличии дефектов в шве трубы.

Ультразвуковой контроль шва одной трубы занимает 3—5 мин.

### 3. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

Ультразвуковая дефектоскопия является практически единственным надежным методом проверки качества сварных соединений большой толщины.

Процесс прозвучивания в этом случае по существу ничем не отличается от рассмотренного процесса прозвучивания швов средней толщины. При прозвучивании обычно применяют щупы с углом призмы 30, 40 и 50°. Весьма часто для большей надежности контроля швы последовательно прозвучивают разными щупами.

Ультразвуковой контроль сварных соединений большой толщины в ряде случаев осложняется уменьшением чувствительности вследствие рассеяния ультразвука и невозможностью уточнения просвечиванием характера выявленных пороков.

Рассеяние ультразвуковых колебаний растет с увеличением частоты и величины зерна. В результате сильного

рассеяния колебаний могут возникать эхо-сигналы от структуры, называемые реверберационными шумами (рис. 66, б).

Обычно из-за большой нелинейности усилителя приемного тракта на экране дефектоскопа наблюдаются только шумы от ближней границы сплавления (рис. 66, в).

Уменьшение чувствительности и возникновение реверберационных шумов, связанные с рассеянием ультразвука, могут весьма резко проявляться при контроле легированных сталей, особенно сталей аустенитного класса. Поэтому для контроля соединений из легированных сталей приходится применять более низкие частоты, чем для контроля соединений из конструкционных сталей.

Максимальная частота ультразвуковых волн, которые можно использовать для контроля данного сварного соединения, зависит также от термообработки шва и его толщины. Так, например, ультразвуковые колебания с частотой 2,5 МГц можно использовать для контроля аустенитных швов без предварительной термообработки, если толщина их менее 15 мм. Контроль швов толщиной до 30 мм иногда можно вести с помощью колебаний частотой 1,8 МГц. Для контроля аустенитных швов на глубину 40—45 мм необходимо снизить частоту колебаний до 0,8—0,6 МГц. Если же аустенитные швы двухфазных сталей перед

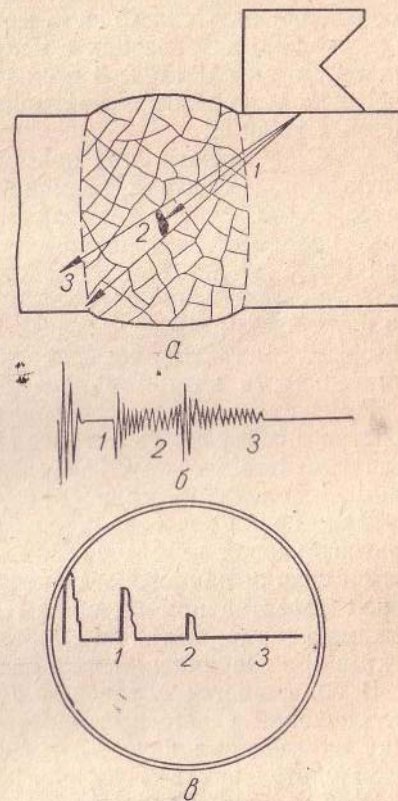


Рис. 66. Схема контроля шва с крупнозернистой структурой наплавленного металла (а), осциллограмма напряжений на входе приемника (б) и экран трубки дефектоскопа (в):



контролем подвергнуть аустенизации, то оказывается возможным прозвучивать колебаниями частотой 1,8 МГц швы толщиной до 100 мм.

Оптимальная частота колебаний для контроля сварных соединений больших толщин может быть определена экспериментально на образцах с искусственными и естественными дефектами. В табл. 6 приведены данные частот колебаний, используемых для контроля стыковых соединений различных толщин.

Следует указать, что повышению отношения величины сигнала от дефекта к величине реверберационных шумов способствует сужение ультразвукового пучка путем его фокусировки или увеличения диаметра излучателя. Однако при особо крупнозернистой структуре шва удовлетворительное соотношение сигнала к шуму можно достичь только при весьма низких частотах ультразвуковых колебаний, которые на практике не применяют, так как при этом чувствительность контроля недостаточна.

При контроле швов толщиной более 0,3—0,5 м целесообразно прозвучивать их последовательно по слоям, повышая чувствительность дефектоскопа с увеличением глубины расположения слоя [31].

Для оценки качества швов большой толщины по данным ультразвуковой дефектоскопии необходимо изучить технологию сварки данного соединения, характер возникающих в нем дефектов при возможных нарушениях нормального 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 посредством ультразвуковой дефектоскопии.

В настоящее время ультразвуковая дефектоскопия применяется для проверки качества многих сварных соединений толщиной до 700 мм, в частности, для контроля электрошлаковой сварки корпусов доменных печей, станин, гидравлических прессов, корпусов атомных реакторов и т. п.

#### 4. КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ 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 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 (см. табл. 3). Меньшее затухание ультразвука в алюминиевых сплавах, чем в сталях, а также

Таблица 8

Значения углов преломления поперечной волны в алюминиевом сплаве АМГ-6Т при возбуждении ее продольной волной, падающей из плексигласа

Угол падения	Угол преломления	
	расчетный	измеренный
30	35	40
40	49	48
50	61,5	61,5

лучшее состояние поверхности позволяют использовать для контроля ультразвуковые колебания с частотой 2,5 МГц и более.

Методика контроля стыковых сварных соединений из алюминиевых сплавов идентична методике контроля соединений из сталей. Для прозвучивания можно применять типовые призматические щупы.

Из опыта дефектоскопии стальных изделий известно, что истинные значения угла преломления поперечной волны несколько отличаются от расчетных. Как показали измерения, аналогичное явление, но в значительно меньшей степени, наблюдается и при прозвучивании изделий из алюминиевых сплавов (табл. 8).

Малое отличие углов распространения ультразвука в стали и дюралюминии делает возможным, как показывают расчеты и эксперимент, использовать глубиномер дефектоскопа, проградуированный для стали, для измерения координат дефектов в швах алюминиевых сплавов.

Исследования показали, что при ультразвуковой дефектоскопии обеспечивается выявление в стыковых швах из алюминиевых сплавов всех наиболее опасных дефектов, в том числе окисных пленок и густых сеток мелких пор, не обнаруживаемых рентгенографированием. Так, например, из девяти швов, бездефектных по данным рентгенографирования, в семи с помощью ультразвукового дефектоскопа были обнаружены дефекты большой протяженности. При механических испытаниях эти швы показали низкую ви-



брационную прочность по сравнению с прочностью двух остальных швов, признанных бездефектными при ультразвуковом контроле. В изломе всех семи швов были видны окисные пленки. Излом двух бездефектных соединений прошел по основному металлу.

Вольфрамовые включения ультразвуковой дефектоскопией не выявляются.

Для прозвучивания стыковых соединений толщиной 10—40 мм оказалось более удобно применять щупы с углом призмы  $50^\circ$ . При прозвучивании швов щупами с меньшим углом призмы часто возникали ложные сигналы от неровностей и скоплений контактирующей жидкости на поверхности основного металла [18].

#### 5. СПЕЦИФИКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СТЫКОВЫХ ШВОВ ЛИСТОВ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

Метод ультразвуковой дефектоскопии до сих пор не нашел широкого практического применения для контроля качества стыковых швов листов малой толщины.

В директивном документе Центрального института сварки ГДР указывается даже на недопустимость оценки качества швов толщиной менее 8 мм по данным ультразвукового контроля. Объясняется это тем, что при контроле упомянутых швов поперечными волнами весьма сложно отличать с помощью глубиномера эхо-сигналы, вызванные дефектами, от эхо-сигналов, отраженных от неровностей валика «усиления». В связи с этим селекцию эхо-сигналов приходится производить по экрану трубки дефектоскопа, что, естественно, требует особого навыка от оператора.

Процедура ультразвукового контроля швов малой толщины, имеющих грубую чешуйчатую поверхность валика, может быть упрощена применением «теневого» метода (см. рис. 61,а) взамен метода «отражений» (см. рис. 61,б). Само собой разумеется, что при этом чувствительность ультразвукового контроля несколько снизится.

Для прозвучивания швов целесообразно применять щуп с возможно большим углом ввода луча, ибо с увеличением угла уменьшается влияние валика шва на распространение колебаний.

Как показывают исследования, при контроле швов толщиной 8 мм и менее ультразвуковыми колебаниями частотой 2,5 МГц с помощью щупа с углом призмы  $\beta = 50^\circ$  ам-

плитуда эхо-сигналов от валика усиления обычно значительно ниже, чем амплитуда эхо-сигналов от внутренних неспаров и крупных трещин. Это обеспечивает достаточно надежное выявление имеющихся в швах крупных трещин и неспаров. При этом, однако, не гарантируется обнаружение одиночных дефектов и даже их скоплений. Так, например, в процессе эксперимента ультразвуковому контролю было подвергнуто 24 шва толщиной 6 и 8 мм с внутренними дефектами различного характера. Сопоставление данных ультразвукового контроля с результатами рентгенографирования показало, что методом «отражений» при прозвучивании швов щупом с углом  $\beta = 50^\circ$  были обнаружены все шесть неспаров, а также 54 дефекта в виде одиночных шлаковых включений, пор, их скоплений и цепочек, а 45 аналогичных дефектов были пропущены.

Разрешающую способность, а следовательно, и достоверность контроля можно увеличить применением более высоких частот (5—10 МГц) и искателей с углом ввода луча в металл порядка  $70\text{--}80^\circ$  [7].

В заключение необходимо отметить, что контроль швов при малой высоте валика и плавном переходе его к основному металлу весьма прост. Прозвучивание такого шва производится щупом с углом  $\beta = 50^\circ$ , перемещаемым параллельно шву.



### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ УГЛОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ

Угловые швы сварных соединений долгое время в основном контролировали внешним осмотром, промером и путем надзора за соблюдением установленной технологии в процессе изготовления конструкции. Более надежные методы контроля, определяющие наличие или отсутствие внутренних дефектов в угловых швах без разрушения конструкции, 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 в некоторых случаях снижают прочность соединений, особенно при воздействии вибрационных нагрузок.

Разработанные в последнее время 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 непровары в корне шва.

На рис. 67 приведены схемы прозвучивания угловых швов, которые, как показали исследования, практически могут быть применены для выявления внутренних пороков.

Наиболее целесообразным является метод ввода ультразвукового луча в шов через основной металл примыкаемого листа (схема 3), так как он позволяет выявить все виды внутренних дефектов в угловых швах тавровых и крестовых соединений. При этом угол ввода луча должен быть таким, чтобы направление луча было приблизительно перпендикулярным к сечению, в котором площадь дефектов максимальна. Анализ геометрии распространения луча по-

казывает, что прозвучивание наплавленного металла шва с катетами  $K_1$  и  $K_2$  при толщине привариваемого листа  $\delta$  может быть осуществлено одним щупом с углом ввода луча  $\alpha_1$  или последовательно двумя щупами с углами ввода луча  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 68).

Угол ввода луча  $\alpha_1$  определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \approx \frac{K_1}{K_2}. \quad (39)$$

Так как обычно  $K_1 \approx K_2$ , то  $\alpha_1 \approx 45^\circ$ . Щупом с углом ввода луча  $\alpha_1 = 45^\circ$  полностью прозвучивается угловой шов, для которого справедливо соотношение

$$2K_1 < \delta.$$

Последнее выражение практически имеет место при  $\delta = 30$  мм. При толщинах  $\delta < 30$  мм щупом с углом ввода луча  $\alpha_1 = 45^\circ$  прозвучивается лишь часть шва, заштрихованная на рис. 68 сплошными линиями. Остальная часть шва, заштрихованная пунктирными линиями, может быть прозвучена щупом с углом ввода луча  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Минимальная величина угла  $\alpha_2$ , обеспечивающая надежный контроль объема шва, заштрихованного пунктирными линиями, определяется из равенства

$$\operatorname{tg} \alpha_2 \approx \frac{2K_1}{\delta}. \quad (40)$$

При контроле щуп перемещают в пределах, определяемых минимальным  $L_{\min}$  и максимальным  $L_{\max}$  расстояниями его от полки 1 (рис. 68). Эти расстояния могут быть определены по формулам

$$L_{\min} \approx \delta \operatorname{tg} \alpha - d + K_1 + 3 \text{ мм} = A_{\min} + K_1 + 3 \text{ мм}; \quad (41)$$

$$L_{\max} \approx 2\delta \operatorname{tg} \alpha - d + K_1 = A_{\max} + K_1. \quad (42)$$

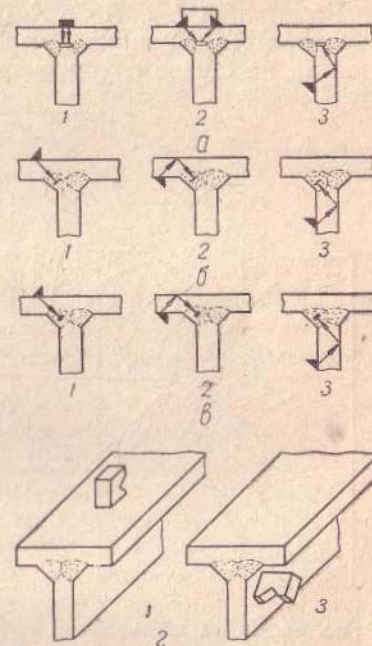


Рис. 67. Схемы прозвучивания угловых швов при выявлении: а — непровара в корне шва; б — продольных трещин; в — пор и шлака; г — поперечных трещин.



Расстояние от щупа до полки, при котором ультразвуковой луч проходит через ось симметрии углового соединения,

$$L_{cp} \approx 1,5\delta \operatorname{tg} \alpha - d. \quad (43)$$

Расстояния  $L_{cp}$ ,  $A_{min}$ ,  $A_{max}$  определяют по шкалам глубиномера. Так, например, для определения  $L_{cp}$  нужно поставить на шкале глубиномера «Н», соответствующей при-

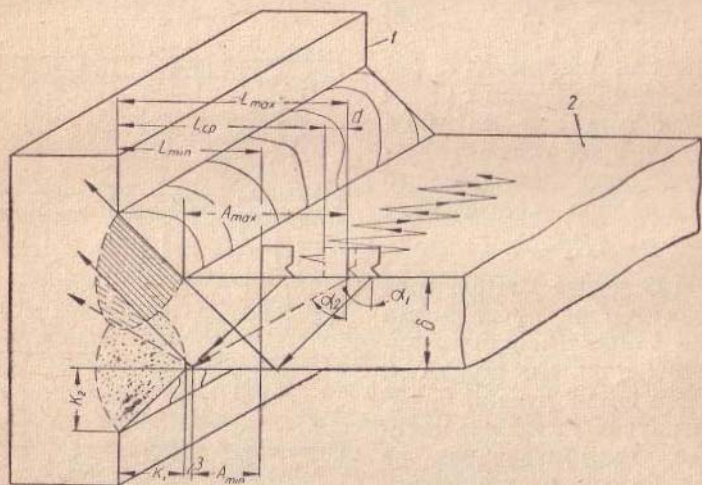


Рис. 68. Схема перемещения щупа при контроле углового шва:  
1 — полка; 2 — стенка.

меняемому щупу, число, равное  $1,5\delta$ , и прочесть по шкале «Л» для того же щупа искомую величину.

При перемещении щупа не рекомендуется приближать его ко шву ближе, чем на расстояние  $L_{min}$ , так как в противном случае могут появиться отраженные импульсы от дефектов в противоположном шве. Для ограничения перемещения щупа может быть использован держатель щупа, описание которого приведено в гл. III.

В процессе прозвучивания швов выбоины на поверхности металла иногда вызывают отражение ультразвука, что усложняет контроль и может привести к ложному 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 участкам». В этом случае на экране дефектоскопа «просматривается» участок пути ультразвукового луча, проходящий через наплавленный металл шва, и индикаторы реагируют на импульсы, отраженные от дефектов шва. При контроле угловых швов тавровых соединений с двухсторонним сколом кромок выделяют участок величиной  $0,5\delta + K_2$ , расположенный на глубине  $1,3\delta$ . Для выявления поперечных

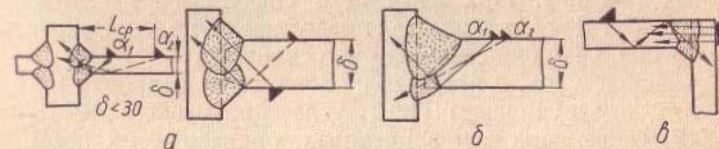


Рис. 69. Схемы прозвучивания угловых швов со сквозным проплавлением:

а — углового шва с X-образной разделкой; б — углового шва с V-образной разделкой; в — шва углового соединения.

трещин следует дополнительно прозвучить каждый шов соединения щупом с углом  $\beta = 40^\circ$  по схеме 1 или 3, приведенной на рис. 67, г. Ложные эхо-сигналы достаточно легко можно отличить от импульсов, вызванных дефектом, путем измерения координат расположения отражающей поверхности. При этом прежде всего следует измерить расстояние от щупа до отражающей поверхности.

Рекомендуемые схемы прозвучивания угловых швов в соединениях различного вида показаны на рис. 69.

Следует отметить, что путем измерения координат расположения выявленного включения и озвучивания его под различными углами удастся с большим приближением, чем это имело место при контроле стыковых швов, определять характер дефектов.

#### 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 примыкаемых листов (стенки) обычно лежит в пределах от 8 до 20 мм.

Качество швов таких соединений может быть проконтролировано методом ультразвуковой дефектоскопии путем



прозвучивания наплавленного металла однажды отраженным лучом (рис. 69, а). При этом непровар в корне шва наиболее устойчиво выявляется щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$ , а трещины, поры, шлаковые включения и непровары по кромке — щупом с углом призмы  $\beta = 40^\circ$ .

Поскольку наиболее вероятным дефектом является непровар в корне шва, контроль целесообразно начинать с прозвучивания соединения щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$  ( $\alpha_2 = 65^\circ$ ). При этом щуп следует перемещать на расстоянии  $L_{\text{ср}}$  от полки, определяемом по соотношению (43) или по глубиномеру дефектоскопа.

Участки швов, в которых не обнаружен непровар в корне шва, прозвучивают щупом с углом призмы  $\beta = 40^\circ$  ( $\alpha_1 = 50^\circ$ ), перемещаемым в пределах, определяемых расстояниями  $L_{\text{min}}$  и  $L_{\text{max}}$  от полки соединения (см. рис. 68). Для выявления поперечных трещин щуп систематически поворачивают на  $10-20^\circ$  в обе стороны.

Изложенная методика введена в «Правила контроля сварных соединений при изготовлении пролетных строений ж.-д. мостов» и уже в течение ряда лет 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 уверенное выявление внутренних трещин и непроваров, в том числе и таких, которые не могут быть обнаружены рентгенографированием (рис. 70).

Естественно, что надежность регистрации дефектов в виде одиночных пор и шлаковых включений при ультразвуковом контроле может оказаться несколько ниже, чем при рентгенографировании. Однако в связи с большой сложностью рентгенографирования тавровых соединений и невозможностью просвечивания крестовых соединений качество угловых швов пролетных строений контролируют только ультразвуковой дефектоскопией.

Аналогичную методику ультразвукового контроля угловых швов применяют при проверке качества тавровых соединений электровозов.

Если по конструктивным соображениям не может быть применена изложенная выше методика, швы тавровых соединений прозвучивают с наружной поверхности полки (см. рис. 67, а, 2; б, 1; в, 1; г, 1). Внедрение ультразвуковой дефектоскопии для 100%-ного контроля угловых сварных соединений позволяет гарантировать более высокое каче-

ство сварных конструкций, а также способствует отработке технологии сварки. Так, если на одном из мостовых заводов в начальной стадии применения ультразвукового контроля швов тавровых соединений брак сварки составлял более 50%, впоследствии он не превышал 5%.

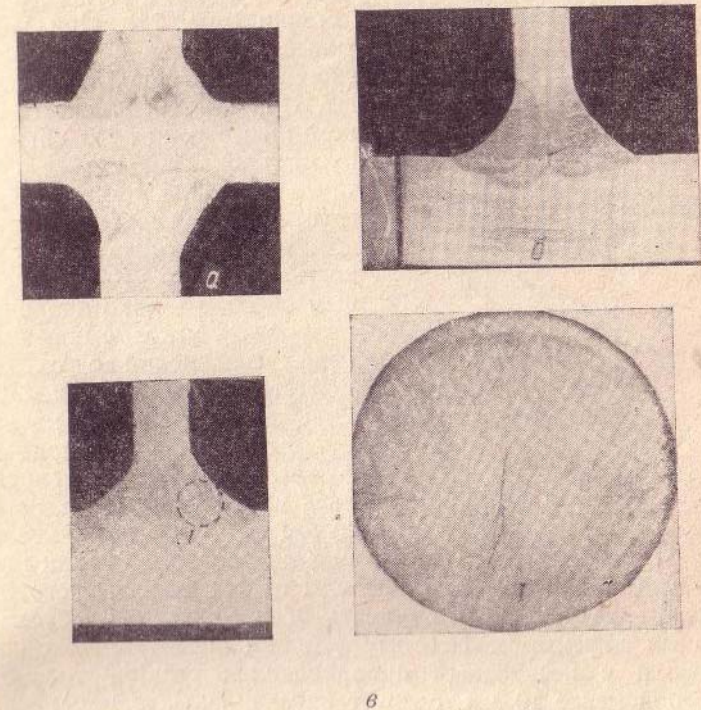


Рис. 70. Макрошлифы угловых швов тавровых и крестовых соединений, на которых видны дефекты, выявленные ультразвуковой дефектоскопией и не обнаруженные рентгенографированием:

а — крестовое соединение с непроваром, переходящим в трещину; б — тавровое соединение с непроваром; в — тавровое соединение с трещиной.

В ряде случаев встречаются тавровые соединения, в которых толщина примыкаемого 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 С НЕСКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ ПРИМЫКАЕМОГО ЛИСТА

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 щупом, расположенным на поверхности стенки (рис. 71). При этом дефекты в шве или непроваренный угол стенки вызывают

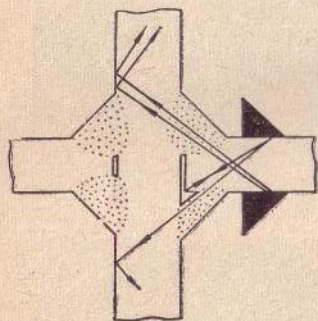


Рис. 71. Схема прозвучивания угловых швов крестовых и тавровых соединений с несквозным проплавлением примыкаемого листа (стенки) толщиной более 20 мм.

эхо-сигнал большой амплитуды. При контроле качественного шва отраженный сигнал будет значительно слабее, ибо торец стенки в месте предусмотренного непровара имеет достаточно плоскую поверхность. Очевидно, что аналогичным образом 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 однажды отраженным лучом не дали положительных результатов, так как возникающие при этом эхо-сигналы от технологического непровара не удавалось отличать от эхо-сигналов, обусловленных дефектами. Поэтому угловые швы тавровых соединений с несквозным проплавлением стенки, толщина которой менее 20 мм, следует прозвучивать лучом, вводимым через металл полки (см. схему 1 на рис. 67, б, в, г и схему 2 на рис. 67, а).

При изготовлении некоторых конструкций требуется, чтобы технологический непровар в тавровых соединениях не превышал определенной допустимой величины. В 1958 г. Тилиандер [76] предложил способ измерения ширины непровара с помощью прямого щупа. Результаты измерений в значительной степени определяются чистотой поверхности, на которой устанавливают щуп, и точностью его расположения. Сам процесс измерения весьма трудоемок.

эхо-сигнал большой амплитуды. При контроле качественного шва отраженный сигнал будет значительно слабее, ибо торец стенки в месте предусмотренного непровара имеет достаточно плоскую поверхность. Очевидно, что аналогичным образом 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 однажды отраженным лучом не дали положительных результатов, так как возникающие при этом эхо-сигналы от технологического непровара не удавалось отличать от эхо-сигналов, обусловленных дефектами. Поэтому угловые швы тавровых соединений с несквозным проплавлением стенки, толщина которой менее 20 мм, следует прозвучивать лучом, вводимым через металл полки (см. схему 1 на рис. 67, б, в, г и схему 2 на рис. 67, а).

Более простая методика определения ширины непровара разработана в 1962 г. в НИИмостов. Эта методика позволяет также контролировать тавровые соединения на непровар, ширина которого превосходит допустимую. Для контроля применяют специальные щупы (рис. 72) [39].

Щуп состоит из плексигласовой призмы 1, пьезоэлектрических пластин 4, включенных параллельно, корпуса 2 и разъема 3 для подключения щупа к прибору. В зависимо-

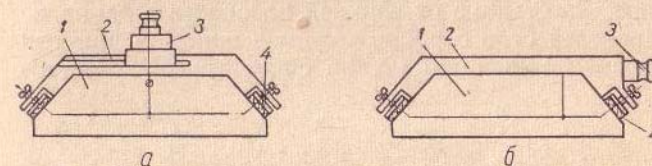


Рис. 72. Щупы конструкции А. С. Кукли для контроля качества тавровых соединений.

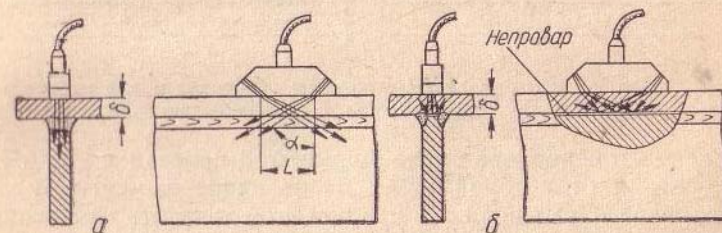


Рис. 73. Схемы прозвучивания таврового соединения с полным проваром и непроваром в корне шва.

сти от условий работы щупа могут быть изготовлены с вертикальным (рис. 72, а) или с горизонтальным (рис. 72, б) расположением разъема. Угол  $\alpha$  ввода лучей в металл и расстояние  $L$  между точками ввода выбирают таким, чтобы ультразвуковые лучи пересекались на глубине, равной толщине полки  $\delta$  (рис. 73, а).

При заданной величине угла  $\alpha$  расстояние  $L$  может быть определено из соотношения

$$L = 2\delta \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\delta$  — толщина листа полки.

Очевидно, что при перемещении щупа по поверхности полки над стенкой в случае полного провара ультразвуковые лучи без отражений будут переходить из полки в стенку.



ку (рис. 73,а). Если же в соединении окажется непровар, то часть ультразвуковых колебаний отразится от него и вернется на пластины (рис. 73,б). При этом амплитуда отраженного сигнала будет пропорциональна ширине непровара.

Для измерения ширины непровара применяют эталон (рис. 74), изготовленный из того же металла, что и полка. Прорезы в эталоне имитируют собой непровары различной ширины. Расстояние от верхней плоскости эталона до торцов прорезей строго равно толщине полки. С практически достаточной точностью можно считать, что ширина обна-

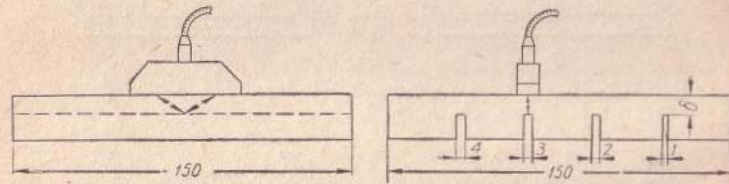


Рис. 74. Эталон для определения ширины непровара и для настройки дефектоскопа при контроле качества тавровых соединений.

руженного непровара равна ширине той прорези в эталоне, эхо-сигнал от которой равен по величине эхо-сигналу от непровара. Опыт показал, что при этом точность измерения ширины непровара достигает  $\pm 0,5$  мм.

Для контроля соединений на отсутствие в них непроваров, превосходящих по ширине допустимую величину  $b$ , вначале устанавливают чувствительность дефектоскопа такой, чтобы в эталоне выявлялись прорезы шириной  $b + 1$  мм и более. Затем, не меняя чувствительности дефектоскопа, перемещают щуп по поверхности полки над стенкой. Очевидно, что при такой чувствительности дефектоскоп будет выявлять непровары, ширина которых превосходит допустимую величину на 1 мм и более. Данная методика нашла применение для контроля тавровых соединений тепловозов.

### 3. КОНТРОЛЬ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ ВНАХЛЕСТКУ

Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений внахлестку (рис. 75,а) находит применение при контроле качества сварки вагонных тележек, мостовых кранов и других металлоконструкций.

Прозвучивание швов толщиной 8—20 мм целесообразно вести отраженным лучом, используя для этого вначале щуп с углом ввода луча  $\alpha_1 \approx 60-70^\circ$  ( $\beta \approx 50^\circ$ ), а затем — щуп с углом  $\alpha_2 \approx 40^\circ$  ( $\beta \approx 30^\circ$ ). Щупы при контроле перемещают параллельно шву на определенном расстоянии от угла верхнего листа. Для выявления различным образом

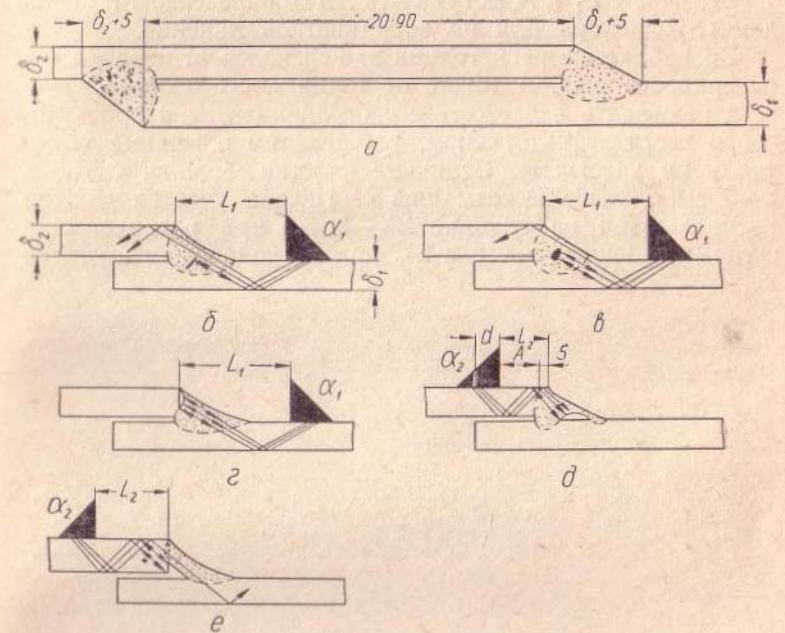


Рис. 75. Типовые размеры сварного соединения внахлестку и схемы прозвучивания шва при выявлении дефектов.

ориентированных дефектов щупы систематически поворачивают в обе стороны на  $5-10^\circ$ .

При прозвучивании щуп с углом призмы  $\beta = 50^\circ$  располагают на поверхности нижнего листа на расстоянии от шва

$$L_1 \approx (2\delta_1 + 0,5\delta_2) \operatorname{tg} \alpha_1 - d.$$

Этим щупом обеспечивается выявление трещин (рис. 75,б), газовых и шлаковых включений (рис. 75,в), непроваров по торцу верхнего листа (рис. 75,г).



Дефекты в виде непровара по кромке нижнего листа (рис. 75,δ) и непровара угла верхнего листа (рис. 75,ε) могут быть обнаружены щупом с углом  $\beta = 30^\circ$ , располагаемым на верхнем листе на расстоянии от шва

$$L_2 = 2\delta_2 \operatorname{tg} \alpha_2 - d + 5 \text{ мм} = A + 5 \text{ мм}.$$

Величины  $L_1$  и  $A$  могут быть легко определены по шкалам глубиномера или по координатной линейке.

Во избежание регистрации эхо-сигналов от неровностей поверхности шва, а также от торца листа целесообразно щуп размещать в держателе с ограничителем, а прозвучивание вести дефектоскопом, работающим в режиме «Контроль по участкам». Величина участка должна быть на 2—3 мм больше высоты шва  $\delta_2$ . Начало участка должно располагаться на глубине  $2\delta_1$ —3 мм при расположении щупа на нижнем листе и  $2\delta_2$  при расположении щупа на верхнем листе.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ШВОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Контактная сварка находит широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, при восстановлении рельсовых плетей железнодорожного транспорта, изготовлении быстрорежущего инструмента, точечной и роликовой 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.

Исследованиями последних лет установлена возможность применения импульсной ультразвуковой дефектоскопии для контроля качества контактной сварки.

Ультразвуковая дефектоскопия, как и обычно, сводится к прозвучиванию шва импульсами ультразвуковых колебаний и исследованию процесса их распространения методом отражений или «теньвым» 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 щупа оказывается возможным, если стык отстоит от плоскости, на которой устанавливается щуп, на расстоянии не более 200—300 мм и не менее, чем величина «мертвой» зоны дефектоскопа. В остальных случаях контактный шов прозвучивают с помощью призматического щупа путем ввода колебаний в шов через основной металл.



Опыт применения ультразвуковой дефектоскопии швов контактной сварки показывает, что при контроле выявляется 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.

#### 1. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ

Контактная сварка широко используется в СССР и за рубежом при восстановлении вышедших из строя рельсов и при изготовлении плетей длиной до 800 м для бесстыкового пути. При этом в одной плети иногда насчитывается более 60 сварных соединений.

В связи со все возрастающими нагрузками и скоростями движения поездов необходимо обеспечивать высокое качество сварных стыков рельсов.

Дефекты в виде продольных расслоений, рыхлостей, неполной сварки, пузырей, непроваров, кратерных усадок и светлых силикатных включений при любой их величине значительно снижают прочность сварных стыков. Дефекты в виде серых силикатных включений при площади их менее 15 мм<sup>2</sup> не являются опасными [13].

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 дефектному месту. Так, например, при ультразвуковом контроле одного из сварных стыков в плети рельса типа Р-65 был обнаружен крупный дефект, занимающий около 40% сечения головки. Часть плети со стыком была вырезана и разрушена на прессе. При этом излом плети начался в подошве по сварному стыку, а в области головки прошел по зоне термического влияния, но не по дефектному сечению. Последующий металлографический анализ подтвердил наличие в головке крупного пережога.

С 1960 г. в СССР начато широкое применение ультразвуковой дефектоскопии для оценки качества сварных стыков рельсов, выполненных электроконтактной сваркой. При этом используется методика и аппаратура, разработанные НИИмостов при участии ЦНИИМПС.

Стыки проверяют после зачистки грата и остывания до температуры 60°C. Контроль их производится в специальном помещении — контрольном посту, расположенном в

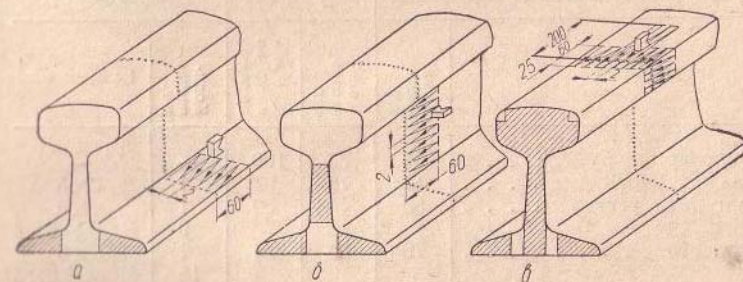


Рис. 76. Схемы прозвучивания сварного стыка рельса (область, подвергаемая контролю, заштрихована).

технологическом потоке за операцией шлифовки. Через контрольный пост проходит каждая свариваемая плеть.

Процесс контроля стыка сводится к прозвучиванию его импульсами ультразвуковых колебаний, излучаемых призматическими щупами, и регистрации эхо-сигналов от внутренних дефектов. Стык, в котором обнаружен какой-либо дефект, бракуют.

Предварительными исследованиями по выявляемости дефектов в стыках контактной сварки установлена целесообразность прозвучивания шейки и подошвы рельса щупом с углом призмы  $\beta = 50^\circ$  (рис. 76, а, б), а головки — вначале щупом с углом  $\beta = 50^\circ$  и затем щупом с углом  $\beta = 40^\circ$  (рис. 76, в).

Сравнение результатов ультразвукового контроля с осмотром изломов проконтролированных стыков показало, что ультразвуковым дефектоскопом УЗД-НИИМ-5 на максимальной чувствительности достаточно надежно выявляются крупные дефекты в виде непроваров, пузырей, плоских изломов, кратерных усадок и рыхлостей. Силикатные включения (серые) площадью менее 15 мм<sup>2</sup>, не являющиеся



дефектами, выявляются значительно хуже. Данные сопоставления результатов ультразвукового контроля с результатами осмотра излома стыков приведены в табл. 9.

С 1961 г. согласно инструкции Министерства путей сообщения СССР запрещена укладка в главный путь сварных

Таблица 9

Результаты ультразвукового контроля 49 сварных стыков рельсов





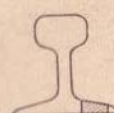
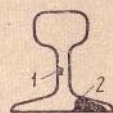






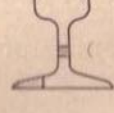
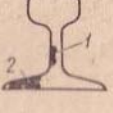
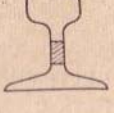
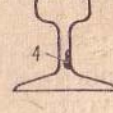
Вид	Включения, обнаруженные при осмотре излома стыков			Включения, выявленные УЗД		Включения, пропущенные УЗД	
	Количество, шт.	Количество, шт.	% к общему количеству	Количество, шт.	Размер, мм	Количество, шт.	Размер, мм
Непровары и пузыри . . . . .	33	33	100	—	—	—	—
Плоский излом . . . . .	13	12	92	1	3×5	1	4×5
Кратерная усадка . . . . .	50	40	80	9	Менее 3×4	1	3×5
Рыхлость . . . . .	70	53	76	16	Менее 3×4	—	—
Светлые силикатные скопления . . . . .	—	—	—	—	—	—	—
Серые силикатные скопления площадью: более 15 мм <sup>2</sup> менее 15 мм <sup>2</sup>	—	—	—	—	—	—	—
	27	8	29	19	Менее 3×5	—	—

рельсов без предварительного ультразвукового контроля. Анализ результатов ультразвукового контроля более 100 тыс. сварных стыков, сваренных на рельсостроительных предприятиях СССР, подтвердил возможность применения изложенной методики для 100%-ного контроля качества сварки рельсов. Время контроля одного стыка составляет 3—7 мин. При контроле выявляются многие недопустимые дефекты, расположенные в головке, шейке и подошве рельса. В табл. 10 и на рис. 77 показаны некоторые дефекты, выявленные в сварных стыках при ультразвуковом контроле рельсов на рельсостроительных предприятиях. В процессе контроля 100 тыс. стыков только в трех стыках были обнаружены допустимые включения в виде силикатных скоплений небольшой величины.

Применяемый в СССР метод импульсной ультразвуковой дефектоскопии оказался более чувствительным и производительным, чем «теневой» метод ультразвукового контроля, используемый в ФРГ.

Таблица 10

Результаты ультразвукового контроля и осмотра излома сварных стыков рельсов на рельсостроительных предприятиях

Дефекты, выявленные			
ультразвуковой дефектоскопией	при осмотре излома	ультразвуковой дефектоскопией	при осмотре излома
			
			
			
			

Примечание: 1 — силикатные включения; 2 — пережог; 3 — шлаковое включение; 4 — пузыри.

При контроле сварных стыков рельсов, уложенных в пути, дефектоскоп УЗД-НИИМ-5 устанавливают на специальную тележку с аккумуляторной батареей. Производительность контроля в этом случае значительно ниже, чем на предприятии, что связано с очисткой сильно загрязненной поверхности рельса и перемещением дефектоскопа от стыка к стыку.

Для проверки качества рельсов, свариваемых в пути передвижным рельсостроительным агрегатом, разработан специальный ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-6. Он



позволяет вести непрерывный контроль основного металла рельса по всей длине, болтовых и сварных стыков, а также определять координаты расположения выявленных дефектов.

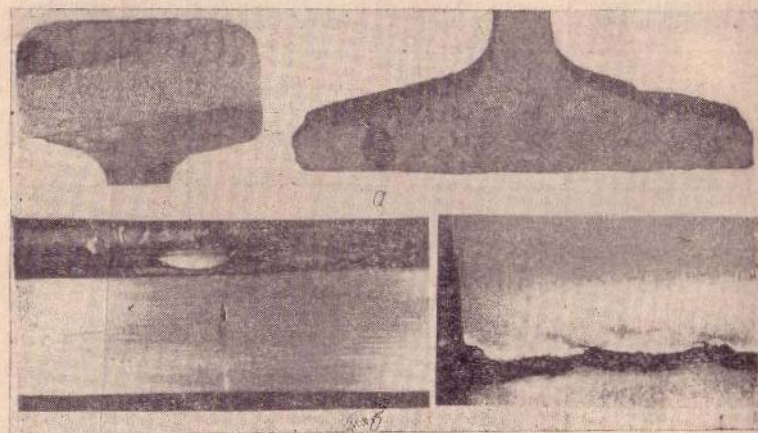


Рис. 77. Изломы (а) и макрошлифы (б) сварных стыков рельсов, в которых при ультразвуковом контроле были обнаружены дефекты.

## 2. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СТЫКОВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Контактно-стыковую сварку используют при изготовлении режущего инструмента для соединения хвостовика из углеродистой стали с рабочей частью из быстрорежущей стали.

В процессе эксплуатации сварной стык находится под воздействием знакопеременной нагрузки значительной величины. Поэтому к качеству сварки предъявляют весьма жесткие требования. Для выявления внутренних дефектов сварки может быть использован метод импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Прозвучивание осуществляют с помощью прямого щупа 1, устанавливаемого на хвостовике 2 (рис. 78). О наличии дефекта 4 судят по появлению эхо-сигнала от несплошности в зоне стыка 3. Для контроля стыков может быть применен почти любой импульсный ультразвуковой дефектоскоп с частотой заполнения ультразвукового импульса 1,8—3 Мгц.

Длительный опыт применения ультразвуковой дефектоскопии показал, что этим методом обеспечивается надежное выявление наиболее опасных дефектов контактной сварки, снижающих прочность инструмента. На рис. 79 в качестве примера приведены фотографии излома инструмента по месту сварки, в стыке которого при ультразвуковом контроле были обнаружены дефекты.

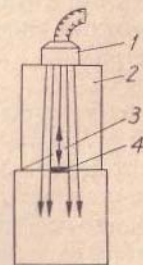


Рис. 78. Схема прозвучивания сварного стыка инструмента.



Рис. 79. Изломы сварных стыков инструмента, в которых при ультразвуковом контроле были обнаружены недопустимые дефекты (газовые поры).

## 3. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ТОЧЕК И СВАРНЫХ ЗАКЛЕПОК

Методом ультразвуковой дефектоскопии в сварных точках могут быть выявлены непровары, трещины и поры, а также определен диаметр ядра точки.

Контролируют точки методом отражений с помощью двух щупов. Для удобства контроля в МВТУ им. Баумана предложен щуп (рис. 80) с двумя приемно-излучающими пластинами, размещенными в одной призме. Колебания, излучаемые одной пластиной, распространяются в верхнем листе и при попадании на качественно сваренную точку проникают в нижний лист. Интенсивность колебаний, достигающих другой пластины, в этом случае весьма мала. При наличии дефекта интенсивность принимаемого сигнала резко увеличивается, что регистрируется индикатором дефектоскопа. Следует отметить, что часто встречаемый дефект в виде сплипания данным методом не выявляется.

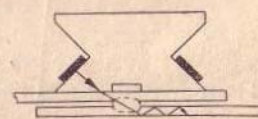


Рис. 80. Схемы прозвучивания сварной точки.



Диаметр сварной точки определяют по длине зоны, в которой при перемещении щупа над точкой на экране дефектоскопа отсутствует импульс. При этом чувствительность дефектоскопа должна быть более низкой, чем при контроле на отсутствие внутренних дефектов. Регулируют ее по величине эхо-сигнала на экране дефектоскопа при расположении щупа на участке, не имеющем сварных точек. При оптимальной чувствительности и большом навыке оператора удается достичь точности измерения диаметра не ниже 2 мм.

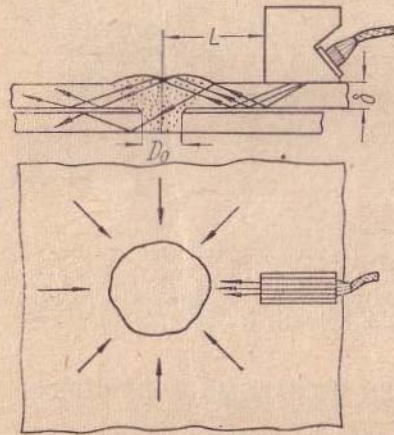


Рис. 81. Схема прозвучивания сварной заклепки.

Сварные заклепки следует контролировать в два этапа. На первом этапе выявляют внутренние недопустимые дефекты, а на втором—определяют соответствие истинной величины диаметра ядра заданной величины  $D_0$ .

Для выявления дефектов каждую заклепку прозвучивают со всех сторон с помощью щупа, выполняющего функции излучения и приема ультразвуковых колебаний (рис. 81). Появление эхо-сигнала из зоны проплавленного металла свидетельствует о наличии дефектов в заклепке.

Ко второму этапу контроля приступают после того, как убедятся в отсутствии в заклепках внутренних дефектов. Величину диаметра заклепки можно измерить с помощью двух щупов, укрепленных на общем штативе. При этом один из щупов предназначается для излучения, а другой— для приема ультразвуковых колебаний. Диаметр ядра, как и при контроле сварных точек, определяют по длине зоны, в которой при перемещении щупов над заклепкой

индикатор дефектоскопа не регистрирует прохождение ультразвуковых колебаний от передающего щупа к приемному. Опыт показывает, что при величине ядра 10—14 мм точность измерения составляет 1—3 мм. Однако сам процесс измерения весьма трудоемок и не может быть рекомендован для массового контроля качества соединений на сварных заклепках. Производительность контроля можно значительно повысить, если для измерения диаметра ядра применить предложенный автором ультразвуковой калибр.

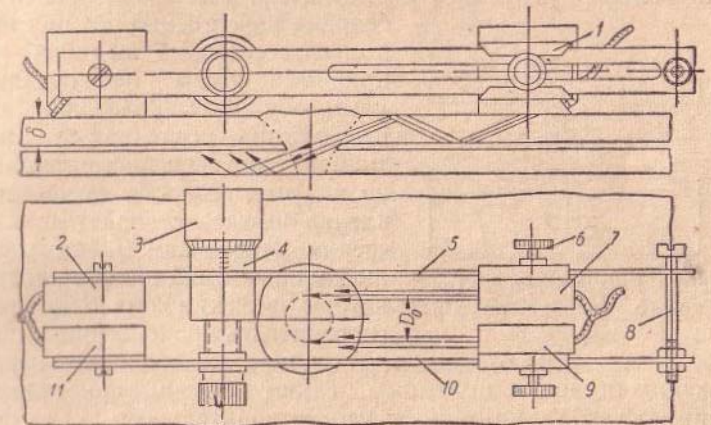


Рис. 82. Определение диаметра ядра заклепки ультразвуковым калибром.

Ультразвуковой калибр (рис. 82) состоит из двух передающих 7, 9 и двух приемных 2, 11 щупов, стальных линеек 5, 10, ползьев 1, направляющей 8, микрометрического винта 3 с гайкой 4 и стопорного винта 6. Пьезоэлектрические пластины передающих щупов, как и приемных, включены параллельно. Приемные щупы 2 и 11 прикреплены винтами соответственно к линейкам 5 и 10. Передающие щупы 7 и 9, жестко связанные с ползьями 1, можно устанавливать на необходимом расстоянии от приемных щупов и укреплять их в таком положении с помощью стопорного винта 6. Расстояние  $D$  между передающими и между приемными щупами регулируется вращением микрометрического винта 3. При вращении винт 3 ввинчивается или вывинчивается из гайки 4, укрепленной на



линейке 5, смещая линейку 10 со щупами 9 и 11 по направляющей 8. С помощью винта устанавливают максимально возможное расстояние  $D$  между щупами, при котором еще оба ультразвуковых луча переходят в нижний лист через проплавленный металл заклепки диаметром  $D_0$ , не достигая приемных щупов. 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. если заклепка

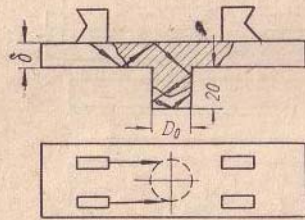


Рис. 83. Регулировка ультразвукового калибра по эталону.

сварена качественно, то при одном из положений калибра на приемные щупы не попадут ультразвуковые колебания от передающих щупов. Если же диаметр ядра меньше минимально допустимого, т. е. если заклепка не удовлетворяет техническим требованиям, то при любом положении калибра индикаторы дефектоскопа будут регистрировать прохождение ультразвуковых колебаний от передающих щупов к приемным. Таким образом, при применении калибра критерием удовлетворительного качества заклепки является исчезновение сигнала на индикаторе дефектоскопа при перемещении калибра над заклепкой.

Для достижения большей точности в оценке качества заклепок целесообразно перед измерением ядра зачищать заподлицо головки заклепок, а калибр и чувствительность дефектоскопа настраивать на специальных эталонах (рис. 83), имитирующих собой соединения на сварных заклепках.

## МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Применяемая в настоящее время аппаратура позволяет производить ультразвуковую дефектоскопию сварных соединений только при ручном перемещении щупов и без получения документа. Результаты дефектоскопии во многом зависят от оператора (квалификации, сосредоточенности в процессе работы), а отсутствие документа контроля снижает его достоверность. Надежность ультразвуковой дефектоскопии может быть значительно повышена механизацией и особенно автоматизацией процесса контроля.

### 1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В первых шести главах было показано, что наиболее удовлетворительным для контроля качества сварных швов металлоконструкций в большинстве случаев является метод импульсной ультразвуковой дефектоскопии с совмещением функций излучения и приема ультразвуковых колебаний в одной искательной головке (щупе).

Процесс импульсной ультразвуковой дефектоскопии как ручной, так и автоматической, предназначенный не только для обнаружения дефектов, но и для определения их относительных размеров и координат расположения, можно представить состоящим из:

1) прозвучивания контролируемого объема ультразвуковым лучом, перемещаемым в этом объеме. При этом щуп, излучающий ультразвуковые колебания, может находиться



в покое или совершать движение по определенной траектории относительно контролируемого объема. Траектория относительного перемещения щупа связана с характером излучения ультразвукового луча таким образом, что обеспечивается построение прозвучивание контролируемого объема;

2) приема и сигнализации о приеме импульсов, отраженных от внутренних дефектов. Для того чтобы приемно-сигнализирующее устройство реагировало только на эхо-

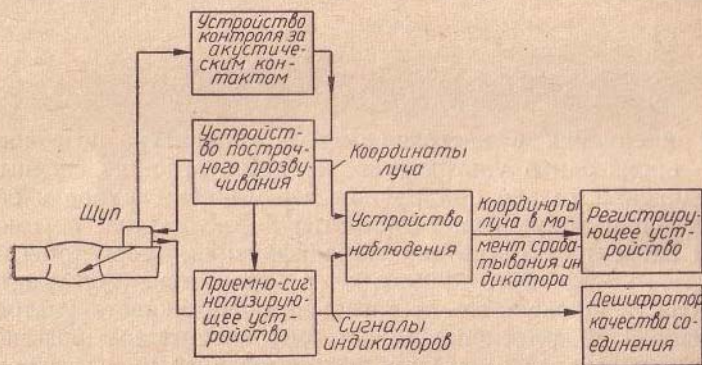


Рис. 84. Функциональная схема процесса импульсной ультразвуковой дефектоскопии.

сигналы, отраженные от дефектов, процесс работы этого устройства должен определяться методом прозвучивания;

3) постоянного наблюдения за состоянием сигнализаторов и положением ультразвукового луча с целью определения координат последнего в момент выявления дефектного места, т. е. в момент срабатывания сигнализатора (индикатора);

4) регистрации результатов наблюдения на бумаге, фотоснимке, поверхности объекта и т. п. в виде документа, информирующего об обнаружении дефектов и их координатах. При этом данные о координатах дефекта должны фиксироваться таким образом, чтобы легко можно было исправить дефектное место в контролируемом шве;

5) оценки качества шва по результатам прозвучивания;

6) контроля за состоянием акустического контакта и работой автомата.

Функциональная схема, отображающая описанный выше процесс ультразвукового контроля, приведена на рис. 84.

В этой схеме устройство построения прозвучивания обеспечивает определенный характер излучения ультразвукового луча и такое перемещение щупа, при котором осуществляется построение прозвучивание всего контролируемого объема. Приемно-сигнализирующее устройство усиливает поступившие на щуп отраженные и преобразованные импульсы, селектируя и подавая на индикаторы лишь те из них, которые являются эхо-сигналами от дефектов. Программа работы временного селектора определяется методом прозвучивания шва, его типом и размерами. Она может устанавливаться оператором однажды при настройке аппаратуры или постоянно вводиться в процессе контроля устройством прозвучивания. Устройство наблюдения постоянно следит за координатами луча и показаниями индикаторов. Регистрирующее устройство отмечает координаты луча при срабатывании индикатора, т. е. при обнаружении дефекта. Дешифратор производит оценку качества проконтролированного соединения в соответствии с заданными техническими условиями на качество сварки. Контроль за работой автомата и акустическим контактом между пьезоэлектрической приемно-излучающей пластиной и сварным соединением обеспечивается устройством контроля за акустическим контактом, которое при нарушении контакта или выходе из строя какого-либо узла автомата останавливает процесс дефектоскопии и подает соответствующий аварийный сигнал.

Рассмотренной функциональной схемой охватываются все возможные варианты процесса ультразвуковой дефектоскопии швов: ручной, автоматический и полуавтоматический.

При ручном контроле функции устройства прозвучивания, устройства наблюдения, регистрирующего устройства и дешифратора выполняются оператором, а в качестве приемно-сигнализирующего устройства служит дефектоскоп. Действительно, оператор перемещает щуп по траектории, определяемой углом ввода луча, типом и размерами шва; этим же определяется программа работы временного селектора, которая перед контролем вводится в дефектоскоп оператором путем установки величины контролируемого участка и глубины его залегания.



В процессе прозвучивания оператор постоянно наблюдает за перемещаемым им щупом, акустическим контактом и показаниями индикатора. При срабатывании индикатора оператор регистрирует координаты щупа путем записи или отметки местоположения щупа непосредственно на изделии и оценивает качество шва.

При автоматическом контроле швов перемещение щупа по траектории, определяемой характером излучения ультразвукового луча, типом и размерами шва, как и сам характер излучения, должны обеспечиваться с помощью устройства построчного прозвучивания. В качестве приемно-сигнализирующего устройства необходимо использовать усилитель с временной селекцией, заключающейся в том, чтобы приемник в своем обычном состоянии был «закрыт» и «открывался» лишь на время, в течение которого ожидаются импульсы, отраженные от дефектов, залегающих в контролируемом объеме.

Устройство наблюдения за перемещением ультразвукового луча и индикаторами может быть осуществлено в виде элемента, копирующего движение луча (или щупа) и имеющего два противоположных качественных состояния, соответствующих отсутствию и наличию эхо-импульсов на выходе приемно-сигнализирующего тракта.

Регистратор результатов контроля должен записывать, фотографировать или отмечать на поверхности изделия положение и качественное состояние элемента устройства наблюдения. Регистрация может производиться непрерывно в процессе прозвучивания или только при обнаружении дефекта.

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 рациональным будет применение полуавтоматического 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 производительность и достоверность. При полуавтоматическом процессе контроля можно значительную часть функций устройства наблюдения за акустическим контактом и дешифратора воз-

ложить на оператора, механизировав процесс прозвучивания и регистрации.

Возможности автоматического ультразвукового контроля, характер получаемого при этом документа, а также конструкция аппаратуры во многом определяются методом прозвучивания контролируемого объекта.

## 2. МЕТОДЫ ПРОЗВУЧИВАНИЯ ШВОВ

Методы прозвучивания в зависимости от характера излучения ультразвукового луча и траектории перемещения щупа при контроле могут быть разбиты на пять основных видов.

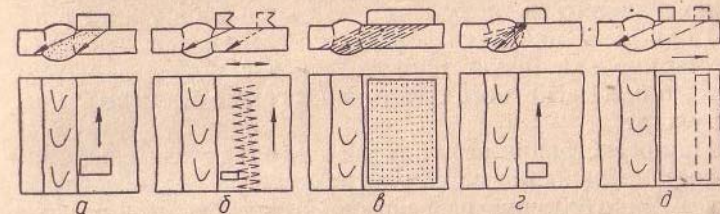


Рис. 85. Методы прозвучивания сварных соединений.

1. Метод продольного перемещения щупа. Луч вводится в металл под определенным углом. Щуп содержит один или несколько приемно-излучающих элементов. Прозвучивание осуществляется за счет продольного перемещения щупа вдоль шва (рис. 85, а).

2. Метод продольно-поперечного перемещения. Луч вводится в металл под определенным углом. Щуп содержит один приемно-излучающий элемент. Прозвучивание осуществляется за счет продольно-поперечного перемещения щупа (рис. 85, б).

3. Метод «бегающего» луча. Луч вводится в металл под одним или разными фиксированными углами. Щуп содержит мозаику из приемно-излучающих элементов. Прозвучивание осуществляется путем последовательного переключения приемно-излучающих элементов, благодаря чему луч «обегает» весь контролируемый объем, в то время как сам щуп находится в покое относительно контролируемого объекта (рис. 85, в).

4. Метод качающегося луча. Луч вводится в металл под непрерывно меняющимся углом. Щуп содержит один приемно-излучающий элемент. Прозвучивание осуществляется путем качания луча и перемещения щупа вдоль шва (рис. 85, г).

5. Метод поперечного перемещения щупа. Луч вводится



в металл под определенным углом. Щуп содержит один или несколько приемно-излучающих элементов. Прозвучивание осуществляется путем поперечного перемещения щупа (рис. 85, д).

Следует заметить, что при контроле различных изделий и сварных соединений могут применяться как перечисленные методы прозвучивания, так и их комбинации.

### 3. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ШВОВ

Результатом автоматического ультразвукового контроля должны являться документ (ультразвукограмма) или же маркировка дефектного соединения.

Маркировка может производиться с помощью механического или магнитного отметчика, а также с помощью краскопульты.

При регистрации результатов контроля желательно, чтобы система, записывающая ультразвукограммы, обеспечивала возможно большую разрешающую способность и позволяла по ультразвукограммам судить о расположении дефектов по длине и по глубине шва, а также о их форме и размерах.

Разрешающая способность контроля и характер ультразвукограмм во многом определяются методом прозвучивания. Так, например, заведомо можно утверждать, что при прозвучивании методом продольного или поперечного перемещения щупа разрешающая способность будет значительно меньше, чем при прозвучивании методом качающегося луча.

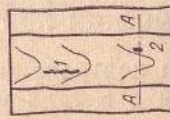
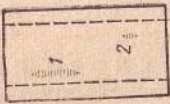

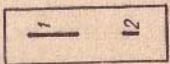
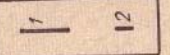
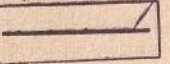






Исследования показали, что при автоматическом контроле сварных соединений в ряде случаев целесообразно получать документ контроля в виде ультразвукограмм двух видов. Ультразвукограмма I вида должна характеризовать отсутствие или наличие в шве дефектов, их расположение по длине шва и относительные размеры, а иногда и примерную глубину залегания дефектов. Ультразвукограмма II вида должна представлять собой фотографию изображения поперечного сечения шва в месте обнаружения дефекта, характеризуя конфигурацию выявленных дефектов и их расположение по сечению шва.

В табл. 11 приведены эскизы ультразвукограмм, получаемых при различных методах прозвучивания.

Анализируя рассмотренные методы прозвучивания и ультразвукограммы, приходим к следующим выводам.

Таблица 11

Ультразвукограммы, получаемые при контроле шва

Расположение дефектов в контролируемом шве	Ультразвукограмма шва при контроле методом					Ультразвукограмма II вида не регистрируется
	продольно-поперечного перемещения щупа	«бегающего» луча	качающегося луча	продольного перемещения щупа	поперечного перемещения щупа	
						
						



Метод продольно - поперечного перемещения щупа позволяет регистрировать два вида ультразвукограмм. 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.

Метод «бегающего» луча позволяет получать аналогичные ультразвукограммы двух видов; однако решающая способность этого метода, точность определения относительных размеров дефектов и координат их расположения значительно ниже, чем метода продольно-поперечного перемещения щупа.

Искажения в изображении дефекта на ультразвукограммах II вида, получаемых при контроле методом «бегающего» луча, определяются размерами приемно-излучающего элемента и оказываются настолько значительными, что практически судить о форме дефекта не удастся. В связи с этим при контроле методом «бегающего» луча целесообразно ограничиваться регистрацией ультразвукограмм I вида.

Метод качающегося луча дает возможность также 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 характеру расположения по сечению данный метод ничем не уступает методу продольно-поперечного перемещения щупа.

Метод продольного перемещения щупа позволяет фиксировать лишь ультразвукограмму I вида, характеризующую расположение и протяженность дефектов только по длине шва.

Метод поперечного перемещения щупа обеспечивает лишь регистрацию дефектов в шве без определения места их расположения.

#### 4. ТЕХНИКА ВВОДА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И КОНТРОЛЬ ЗА АКУСТИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ

При автоматическом контроле сварных швов ввод ультразвуковых колебаний в металл удобно производить через прослойку минерального масла или водяную ванну,

в которой размещается приемно-излучающая система. При этом для предотвращения попадания на приемную пластину колебаний, отраженных от поверхности металла, целесообразно использовать призмы с ловушкой.

Прослойка контактирующей среды не оказывает влияния на геометрию распространения ультразвукового луча

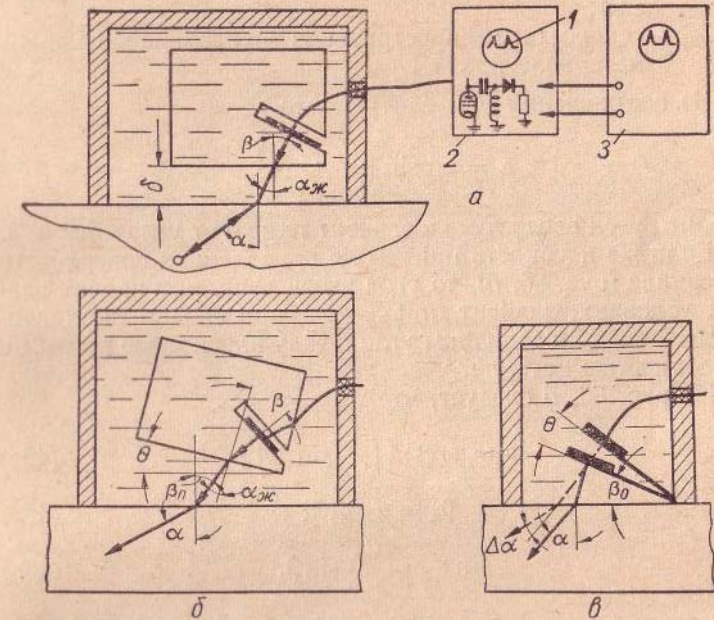


Рис. 86. Схемы ввода ультразвуковых колебаний в изделие через локальную ванну:

1 — импульс от отверстия; 2 — дефектоскоп; 3 — осциллоскоп.

в контролируемом металле, если плоскость призмы, через которую выходит луч, параллельна поверхности металла (рис. 86, а). Действительно, при параллельности плоскости призмы и поверхности металла мы имеем следующие соотношения между углами преломления и падения:

$$\frac{\sin \alpha}{C_{п}} = \frac{\sin \alpha_{ж}}{C_{ж}} = \frac{\sin \beta}{C_{пр}}, \quad (44)$$

где  $\alpha$  — угол преломления луча в металле (угол ввода луча);



$C_{п}$  — скорость распространения поперечной волны в металле;

$\alpha_{ж}$  — угол преломления луча в контактирующей жидкости;

$C_{ж}$  — скорость распространения продольной волны в контактирующей жидкости;

$\beta$  — угол падения ультразвукового луча (угол призмы);

$C_{пр}$  — скорость распространения продольной волны в материале призмы.

Из соотношений (44) следует, что

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{C_{п}}{C_{пр}} \sin \beta \right),$$

т. е. что угол ввода луча  $\alpha$  зависит только от угла призмы  $\beta$ .

Если же плоскость призмы не параллельна поверхности материала (рис. 86, б), то угол ввода луча, при прочих равных условиях, зависит от акустических свойств контактирующей среды и величины угла между плоскостью призмы и поверхностью металла.

Из рис. 86, б следует, что

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{C_{п}}{C_{ж}} \sin \beta_{п} \right); \quad (45а)$$

$$\beta_{п} = \alpha_{ж} \pm \theta; \quad (45б)$$

$$\sin \alpha_{ж} = \frac{C_{ж}}{C_{пр}} \sin \beta. \quad (45в)$$

Подставляя выражения (45б) и (45в) в (45а), получаем

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{C_{п}}{C_{ж}} \left( \frac{C_{ж}}{C_{пр}} \sin \beta \cos \theta \pm \sin \theta \sqrt{1 - \left( \frac{C_{ж}}{C_{пр}} \sin \beta \right)^2} \right) \right]. \quad (45)$$

Значения величин в формуле (45) те же, что и в формуле (44).

Из формулы (45) видно, что приращение угла ввода луча на один градус наклона призмы тем больше, чем больше угол призмы  $\beta$ . При применении плексигласовых призм с углом  $\beta = 50^\circ$  и использовании воды в качестве контактирующей среды формула (45) принимает вид

$$\alpha = \arcsin (0,876 \cos \theta \pm 1,98 \sin \theta). \quad (46)$$

Предполагая, что непараллельность будет малой ( $\theta < 3^\circ$ ), с погрешностью, не превышающей 1%, можем заменить формулу (46) выражением

$$\alpha \approx \arcsin (0,876 \pm 1,98\theta). \quad (46а)$$

Зависимость величины приращения угла ввода луча при изменении угла наклона призмы приведена на рис. 25.

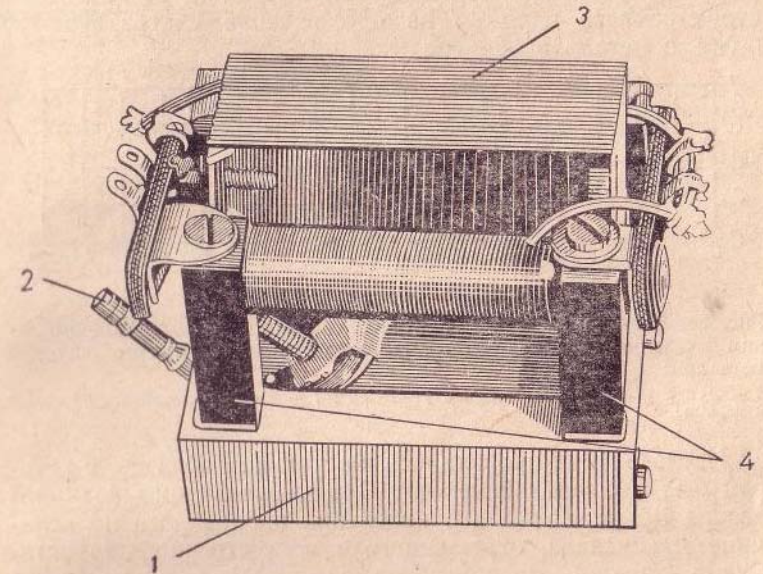


Рис. 87. Локальная ванна конструкции НИИмостов:

1 — ванна; 2 — штуцер для подвода воды под щуп; 3 — щуп с призмой из плексигласа; 4 — электромагнит.

Из него видно, что небольшой угол между плоскостью призмы и поверхностью изделий приводит к довольно резкому изменению угла ввода луча в металл.

В ряде случаев, например, при работе по двухщуповой схеме, возможно и более целесообразно вводить ультразвуковые колебания в металл непосредственно через жидкость (рис. 86, в). Очевидно, что отклонение угла падения волны на угол  $\theta$  от номинального значения  $\beta_0$  (рис. 86, в) приводит к такому же изменению угла ввода луча  $\alpha$ , как и наклон призмы на тот же угол  $\theta$  (рис. 86, б). В связи с этим при вводе колебаний в металл через слой жидкости в процессе контроля



соединения необходимо сохранять строго постоянным угол между призмой или пьезоэлектрической пластиной и поверхностью металла.

На рис. 87 приведена фотография локальной ванны с электромагнитными присосами, обеспечивающая постоянство угла ввода луча.

Величина водяного зазора в ванне между призмой щупа и металлом, как показали исследования, не оказывает существенного влияния на прохождение ультразвука от щупа в металл и обратно.

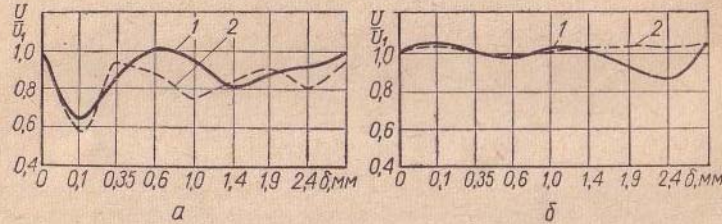


Рис. 88. Зависимость амплитуды эхо-сигнала, вызванного внутренним дефектом, от величины водяного зазора между призмой щупа и металлом:

*a* — щуп с углом  $40^\circ$ ; *b* — щуп с углом  $50^\circ$ ; 1 — первое измерение; 2 — второе измерение.

Исследования проводились на стальном образце, в котором был имитирован дефект. Влияние величины водяного зазора  $\delta$  на прохождение колебаний оценивалось по величине эхо-сигнала, отраженного от искусственного дефекта. Схема эксперимента приведена на рис. 86, *a*, а результаты исследований представлены графиками на рис. 88.

На каждом графике по оси абсцисс отложена величина слоя  $\delta$ , а по оси ординат — отношение амплитуды эхо-сигнала  $U$  при величине слоя  $\delta > 0$  к амплитуде эхо-сигнала  $U_1$  при непосредственном контакте щупа с металлом ( $\delta = 0$ ). В процессе исследований производились измерения амплитуды  $U$  эхо-сигнала при слое, равном 0; 0,1; 0,35; 0,6; 1,0; 1,4; 1,9; 2,4; 5 мм.

Из графиков (рис. 88) видно, что при работе по прокатанной поверхности величина водяной прослойки незначительно влияет на качество акустического контакта, если она лежит в пределах от 0,35 до 5 мм.

При автоматическом прозвучивании необходимо постоянно следить за качеством акустического контакта. Осуще-

ствить это можно двумя путями: 1) проверкой наличия контактирующей среды между щупом и металлом (косвенный контроль); 2) определением величины интенсивности проходящих в металл колебаний (непосредственный контроль).

Косвенный контроль может вестись по схеме, приведенной на рис. 89. Если ванна заполнена водой до заданного уровня, то цепь реле замкнута; в случае уменьшения уровня воды, что может привести к нарушению акустического контакта, цепь размыкается и включается аварийный сигнал.

Непосредственный контроль может осуществляться измерением амплитуды донного отражения продольной волны, излучаемой специальной пластиной в призму щупа и вводимой в металл в том же месте, где вводится основная (рабочая) поперечная ультразвуковая волна (рис. 90, *a*), или

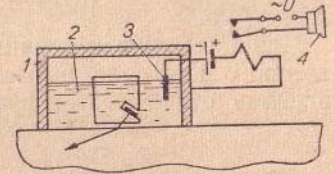


Рис. 89. Схема косвенного контроля качества акустического контакта:

1 — ванна; 2 — контактирующая жидкость; 3 — электроды; 4 — звуковой аварийный сигнал.

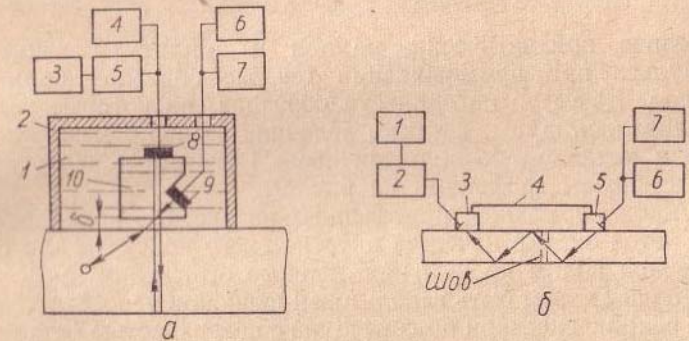


Рис. 90. Схема непосредственного контроля качества акустического контакта:

*a* — измерением величины донного отражения импульса: 1 — контактирующая жидкость; 2 — ванна; 3 — устройство прекращения контроля и подачи аварийного сигнала при нарушении контакта; 4, 5 — генератор и приемник контрольного канала; 6, 7 — генератор и приемник рабочего канала; 8, 9 — пьезоэлементы; 10 — призма щупа; *b* — измерением интенсивности прошедших через шов колебаний: 1 — устройство прекращения контроля и подачи аварийного сигнала при нарушении контакта; 2 — приемник контрольного канала; 3 — приемный контрольный щуп; 4 — механическая связь щупов; 5 — приемно-излучающий рабочий щуп; 6, 7 — генератор и приемник рабочего канала.



же измерением амплитуды поперечной волны, отраженной от поверхности металла (рис. 90, б).

Последний способ непосредственного контроля акустического контакта применяется при дефектоскопии сварных швов труб.

Для проверки применимости первого способа непосредственного контроля выполнены измерения величины эхосигналов от искусственных дефектов при прозвучивании

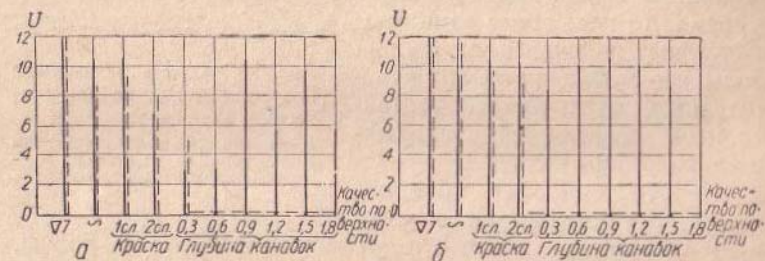


Рис. 91. Зависимость величины донного отражения и величины эхосигнала от искусственного дефекта от качества поверхности (контактирующая среда — вода):

$a - \delta = 0$ ;  $b - \delta \approx 3$  мм; ———— величина донного импульса, - - - - - величина эхо-сигнала от дефекта.

образцов призматическим щупом и амплитуды донного импульса при прозвучивании тех же образцов прямым щупом. Качество поверхности образцов, на которые устанавливались щупы, а также величина зазора  $\delta$  между щупом и металлом были различными. Результаты измерений представлены графиками на рис. 91.

Анализ графиков, приведенных на рис. 91, показывает, что метод оценки качества акустического контакта для поперечной волны по величине донного отражения продольной волны может быть использован лишь при непосредственном соприкосновении призмы щупа с поверхностью металла, заведомо не имеющей грубых неровностей.

Следует отметить, что в большинстве случаев достаточно применять косвенный контроль за акустическим контактом.

## 5. ДЕШИФРАТОР КАЧЕСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Целью ультразвукового контроля, как и всякого другого, является получение объективного документа о состоянии сварного соединения и оценка качества соединения по этому документу в соответствии с техническими условиями на качество сварки.

Сварное соединение по результатам контроля обычно оценивается как «пригодное к эксплуатации» или как «непригодное к эксплуатации» в зависимости от:

- 1) наличия или отсутствия включений в шве;
- 2) размера включений;
- 3) характера включений;
- 4) минимального расстояния  $l_{\min}$  между отдельными включениями;
- 5) числа включений на 1 м шва.

По документу, полученному при ультразвуковой дефектоскопии, можно судить лишь о размерах включений, их взаимном расположении и количестве. В связи с этим не всегда оказывается возможным по ультразвукограмме отметить шов к «пригодному» или «не пригодному».

Таким образом, мы приходим к выводу, что 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 оценки качества проконтролированного соединения с выдачей объективного документа предназначается дешифратор. По существу дешифратор является счетно-решающим устройством, 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 со следующей характеристикой качества шва:

- 1) «Пригоден»;
- 2) «Брак»;
- 3) «Неопределенность».

В табл. 12 приведены примеры программ, которые могут быть положены в основу работы дешифратора при контроле некоторых сварных соединений.



Таблица 12

Данные для программирования работы дешифратора дефектоскопа при ультразвуковом контроле некоторых сварных соединений

Тип сварного соединения	Состояние шва по результатам ультразвукового контроля (ультразвукограммы)	Качество шва по документу дешифратора		
		«Пригоден»	«Брак»	«Неопределенность»
Стыковой шов I категории пролетного строения железнодорожного моста	Включений нет	×		
	Включение протяженностью более $0,04\delta + 5$ мм		×	
	Четыре и более включений любой величины на 1 м шва		×	
	Два любых включения при расстоянии менее 45 мм между ними		×	
	Включения величиной менее $0,04\delta + 5$ 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		×	
	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.  $\delta$  — толщина шва.

Очевидно, что наличие включений в шве, их протяженность, расстояние между ними, а также количество их на 1 м шва выражаются на выходе приемно-сигнализирующего устройства соответственно появлением сигналов, длительностью сигнала от каждого включения, интервалом времени между сигналами от включений и количеством отдельных сигналов, появившихся за время контроля 1 м шва. Поэтому работа дешифратора может быть основана на измерении времени  $t_n$  поступления сигнала от каждого включения, интервала времени  $T_n$  между окончанием обнаружения сигнала от предыдущего включения и началом поступления сигнала от последующего включения, числа  $n$  сигналов от отдельных включений, пришедших за время  $T_k$  контроля 1 м шва, и последующем сравнении каждой из трех измеренных величин с заданными и введенными в дешифратор. Если хотя бы одна из трех измеренных величин  $t_n$ ,  $\frac{1}{T_n}$ ,  $n$  окажется равной или большей, чем величины

$t'_n$ ,  $\frac{1}{T'_n}$ ,  $n'$ , 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 зафиксирует показаний «Брак» и «Неопределенность», что будет свидетельствовать о хорошем качестве шва.

Если обозначить через  $v$  — скорость передвижения искательной системы вдоль шва;  $A$  — максимальную условную протяженность допустимого включения;  $l_{\min}$  — минимальное допустимое условное расстояние между включениями;  $n$  — максимальное число включений, допустимых на 1 м шва, то значения  $t'_n$ ,  $T'_n$  и  $T'_k$  могут быть рассчитаны по следующим соотношениям:

$$t'_n = \frac{A}{v}; T'_n = \frac{l_{\min}}{v}; T'_k = \frac{1}{v}.$$

Так, например, при скорости контроля  $v = 14 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$  (около 50 м/ч) для швов толщиной  $\delta = 50$  мм I категории железнодорожных мостов получаем (см. табл. 12)

$$t'_n = \frac{7}{14} = 0,5 \text{ сек}; T'_n = \frac{45}{14} = 3,2 \text{ сек};$$

$$T'_k = \frac{1000}{14} = 73 \text{ сек}.$$



Возможная функциональная схема дешифратора приведена на рис. 92. 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.

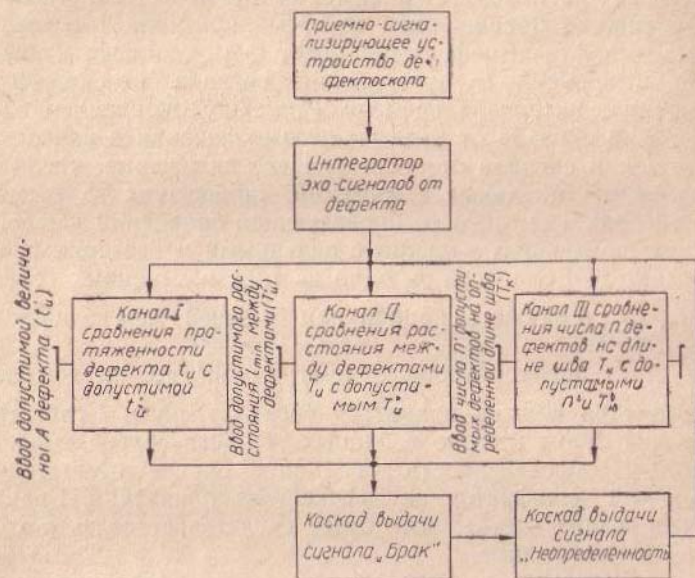


Рис. 92. Функциональная схема дешифратора.

Канал I производит сравнение длительности  $t_n$  сигнала на выходе интегратора с заданной  $t'_n$ , т. е. сравнивает 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  $n$  отдельных сигналов, появившихся на выходе интегратора за время  $T_k$ , т. е. за время контроля определенной длины шва. Если подщи-

танное число  $n$  окажется равным или больше 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, как упоминалось выше, появится сигнал «Брак»; при этом сигнал «Неопределенность» будет сброшен импульсом, поступившим с каскада выдачи сигнала «Брак».

В качестве интегратора может быть, например, использовано реле, включенное в анод ждущего мультивибратора (см. рис. 48, а), контакты которого размыкаются на время обнаружения включения.

Схемы всех трех каналов дешифратора представляют собой по существу схемы измерения длительности и счета импульсов. Они весьма просты и легко могут быть осуществлены на электронных лампах и реле.

## 6. ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ЭХО-СИГНАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

Применение системы временной селекции, как уже упоминалось, вызвано необходимостью отделения эхо-сигналов, вызванных дефектами, от других импульсов, поступающих на вход приемного тракта.

Селекция достаточно просто осуществляется с помощью каскада совпадений и генератора стробирующего импульса. При этом длительность  $t_c$  стробимпульса определяет собой толщину  $H$  контролируемого слоя, а интервал времени  $T$  между моментом излучения зондирующего импульса и моментом начала селективирующего импульса — глубину  $h$  расположения начала контролируемого слоя (рис. 93). Величины  $t_c$ ,  $H$ ,  $T$ ,  $h$  связаны между собой соотношениями (24)

$$t_c = \frac{2H}{C_n} \sec \alpha; \quad T = \frac{2h}{C_n} \sec \alpha + t_{ш.}$$

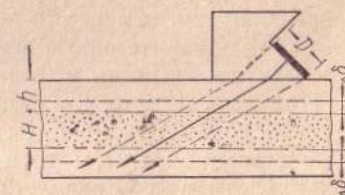


Рис. 93. Схема прозвучивания наклонным лучом.



Время прохождения ультразвука в призме щупа  $t_{ш}$  определяется длиной пути его в призме (рис. 93):

$$t_{ш1} = 0$$

для колебаний, излучаемых наиболее близким к поверхности металла краем пластины,

$$t_{ш0} = \frac{D \operatorname{tg} \beta}{C_{ш}}$$

для ультразвуковых колебаний, распространяющихся по оси луча, и

$$t_{ш2} = \frac{2D \operatorname{tg} \beta}{C_{ш}}$$

для колебаний, излучаемых наиболее удаленным от поверхности металла краем пластины.

В приведенных формулах  $C_{ш}$  — скорость распространения ультразвука в материале призмы.

В дефектоскопах шкалы генератора задержки стробирующего импульса на время  $T$  и генератора селективирующих импульсов длительностью  $t_c$ , а также устройств для измерения координат дефектов градуируют при идеализированном представлении ультразвукового луча в виде тонкой нити, совпадающей с осью реального луча.

При ручном контроле такое допущение не приводит к грубым ошибкам, так как оператор обычно, после обнаружения эхо-сигнала, производит дополнительное селективное путем измерения координат отражающей поверхности, предварительно располагая щуп так, чтобы отражающая поверхность находилась на оси луча (см. рис. 16).

При автоматическом контроле с помощью известных дефектоскопов исключается возможность дополнительного селективного путем измерения координат отражающей поверхности при определенном положении щупа. Поэтому могут быть зафиксированы эхо-сигналы от отражающих поверхностей, расположенных в области  $\Delta\delta$  вне зоны, выбранной для контроля (рис. 93).

Величина  $\Delta\delta$  определяется соотношениями

$$\Delta\delta \approx \frac{C_n}{2} (t_{ш2} - t_{ш0}) \cos \alpha = \frac{C_n}{2} (t_{ш2} - t_{ш0}) \cos \alpha = \frac{C_n}{2} t_{ш0} \cos \alpha.$$

После некоторых преобразований получаем

$$\Delta\delta \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{C_n}{C_{ш}} D \operatorname{tg} \beta \sqrt{1 - \left(\frac{C_n}{C_{ш}}\right)^2 \sin^2 \beta}, \quad (47)$$

где  $C_n$  — скорость распространения ультразвука в контролируемом металле;

$C_{ш}$  — скорость распространения ультразвука в призме щупа;

$D$  — диаметр приемно-излучающего элемента;

$\beta$  — угол падения ультразвукового луча.

Из формулы (47) следует, что неточность селекции тем больше, чем больше диаметр приемно-излучающей пластины и угол ввода луча. Поэтому при автоматическом контроле следует брать приемно-излучающие элементы возможно меньшего диаметра и уделять особое внимание плавности перехода валика «усиления» шва к основному металлу.

Известно, что амплитуда эхо-сигналов от дефекта при перемещении наклонного щупа обычно вначале монотонно возрастает, достигая максимума, а затем монотонно падает (рис. 94).

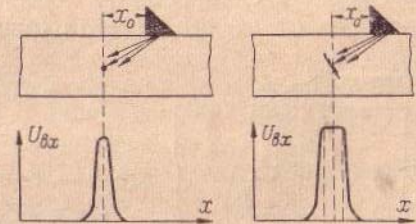


Рис. 94. Зависимость амплитуды эхо-сигналов от дефектов от положения щупа.

Как видно из рис. 94, зона перемещения щупа значительно превышает размеры обнаруживаемого в ней дефекта. В связи с этим изображения, получаемые на ультразвукограммах, в общем случае будут превышать истинные размеры дефектов. Следует отметить, что в ряде случаев при контроле сварных соединений определенного типа может быть экспериментально установлено соотношение между размерами дефектов и их изображений. Наилучшее воспроизведение конфигурации дефекта на ультразвукограмме может быть получено при применении дисковых приемно-излучающих элементов.

## 7. СКОРОСТЬ СКАНИРОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

Оконечным устройством дефектоскопа для автоматического контроля является регистратор того или иного типа. Для уменьшения чувствительности дефектоскопа к помехам,



обычно представляющим собой хаотичные непериодические одиночные сигналы, необходимо, чтобы регистратор срабатывал лишь после приема определенного наперед заданного количества  $N$  эхо-сигналов, отраженных от дефекта. Для этого на выходе усилителя (до регистратора) должно быть предусмотрено интегрирующее устройство (например, диодный детектор), вызывающее срабатывание регистратора после поступления  $N$ -го эхо-импульса.

Для регистрации дефекта при наличии интегратора в дефектоскопе необходимо, чтобы за время озвучивания было принято не менее  $N$  эхо-сигналов, отраженных от этого дефекта.

Скорость сканирования, обеспечивающая прием  $N$  эхо-сигналов от любого дефекта (рис. 95)

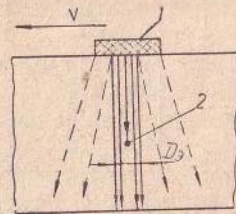


Рис. 95. К расчету скорости сканирования: 1 — приемно-излучающий элемент; 2 — дефект.

$$v = \frac{D_s}{t} = \frac{D_s}{\frac{1}{F} N} = \frac{F}{N} D_s, \quad (48)$$

где  $v$  — скорость сканирования;

$D_s$  — эффективный диаметр ультразвукового луча;

$t$  — время прохождения приемно-излучающим элементом расстояния  $D_s$ ;

$F$  — частота следования зондирующих импульсов;

$\frac{1}{F}$  — промежуток времени между двумя любыми эхо-сигналами;

$\frac{1}{F} N$  — время, необходимое для приема  $N$  эхо-сигналов.

Так, например, при  $D_s = 5$  мм,  $F = 200$  гц и  $N = 20$  согласно соотношению (48) скорость сканирования не должна превышать 50 мм/сек (180 м/ч).

С целью увеличения скорости сканирования целесообразно использовать максимально возможные частоту следования ультразвуковых импульсов и эффективный диаметр ультразвукового луча.

Частота следования ультразвуковых импульсов берется такой, чтобы излучение каждого последующего импульса происходило после полного затухания предшествующего. Максимально возможная частота следования ультразвуковых импульсов обуславливается конфигурацией подде-

жащего контролю сварного соединения, структурой металла шва, частотой используемых ультразвуковых колебаний и может быть легко определена экспериментально.

Эффективный диаметр ультразвукового луча, при прочих равных условиях, определяется требованиями к постоянству чувствительности, величиной контролируемого слоя в направлении луча и расстоянием его от излучателя. Если предположить, что величина контролируемого слоя весьма мала (например, стык контактной сварки) и слой расположен в дальней зоне излучателя, то эффективный диаметр

$$D_s \approx 2r \operatorname{tg} \varphi_c, \quad (48a)$$

где  $r$  — расстояние контролируемого слоя от излучателя;  $\varphi_c$  — угол раскрытия ультразвукового луча, при котором амплитуда эхо-сигнала от дефекта составляет не менее  $C\%$  от амплитуды при расположении дефекта на оси излучателя.

При малых значениях угла  $\varphi_c$  его величина равна:

$$\varphi_c \approx K \frac{\lambda}{D}, \quad (48b)$$

где  $\lambda$  — длина ультразвуковой волны;

$D$  — диаметр излучателя;

$K$  — коэффициент, зависящий от принятой величины  $C$ .

Принимая, что  $\operatorname{tg} \varphi_c \approx \varphi_c$ , из соотношений (48a) и (48b) получаем, что

$$D_s \approx 2Kr \frac{\lambda}{D}.$$

Так например, если принять, что колебания чувствительности контроля стальных изделий в зависимости от положения дефекта в сечении луча не должны превышать 30% ( $C = 70\%$ ,  $K \approx 0,44$ ), диаметр излучателя 12 мм, частота ультразвуковых колебаний 2,5 Мгц и расстояние от излучателя до контролируемого стыка 30 мм, то величина эффективного диаметра луча составит приблизительно 5 мм.

Очевидно, что ширина строки при сканировании не должна превышать величину  $D_s$ .



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ МЕТОДАМИ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЩУПА

Метод продольного перемещения щупа целесообразно использовать для контроля качества стыковых сварных швов малой толщины и угловых швов в соединениях длиной более 500 мм.

Для одновременного прозвучивания нескольких зон шва, например, верхней и нижней половин стыкового соединения, необходимо применение нескольких щупов, размещенных в общем искательном устройстве и подключенных к разным каналам. Чтобы устранить возможность регистрации одним из каналов ультразвуковых импульсов, излучаемых другим каналом, в аппаратуре должна быть применена частотная селекция. В связи с этим каналы должны излучать ультразвуковые импульсы, отличающиеся по частоте заполнения, и иметь усилители высокой частоты с резонансной частотной характеристикой. Полосы пропускания и резонансные частоты усилителей каналов должны удовлетворять соотношению (рис. 96)

$$f_{i+1} - \Delta f_{i+1} - \Delta f_i \geq f_{i-1} + \Delta f_{i-1} + \Delta f_i,$$

где  $f_i$ ,  $f_{i-1}$ ,  $f_{i+1}$  — резонансные частоты усилителей ультразвуковых колебаний данного, предшествующего и последующего каналов;  
 $\Delta f$ ,  $\Delta f_{i+1}$ ,  $\Delta f_{i-1}$  — полосы пропускания на уровне  $0,1K_0$  усилителей тех же каналов.

Для предотвращения проникновения на индикаторы и регистраторы эхо-импульсов от неровностей поверхности шва в каждом канале должна осуществляться временная селекция. Результаты контроля целесообразно регистрировать на бумажной ленте  $\mathcal{Z}$  (рис. 97), отмечая показания каждого канала в отдельности. При такой системе регистра-

ции можно судить о глубине расположения выявленного включения. Так, например, регистрация дефекта пером 1 канала ближней зоны при контроле стыкового соединения свидетельствует о расположении дефекта в верхней части шва. 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.

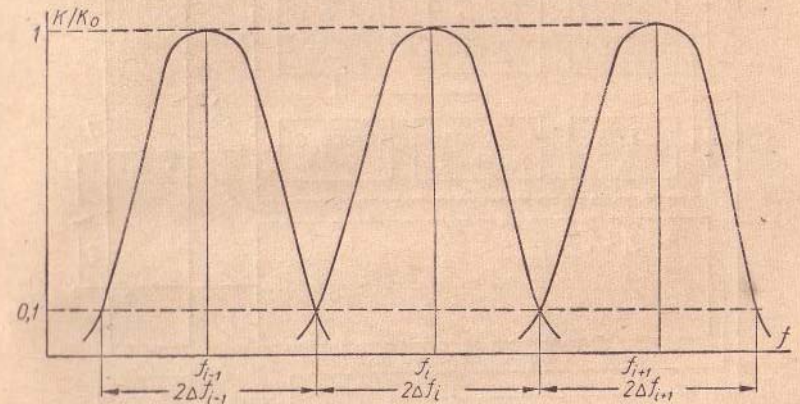


Рис. 96. Частотные характеристики усилителей высокой частоты:  
 $K$  — коэффициент усиления;  $K_0$  — коэффициент усиления на резонансной частоте.

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 щупа приведена на рис. 97. Схемой предусматривается косвенный контроль за акустическим контактом по уровню заполнения ванны контактирующей жидкостью.

Прозвучивание стыковых соединений обеспечивается перемещением вдоль шва искательного устройства с двумя приемно-излучающими пьезоэлектрическими пластинами. Для выявления дефектов, различным образом ориентированных в шве, искательному устройству придается качающееся (маятниковое) движение.



Угол ввода ультразвукового луча, диаметр пьезоэлектрических пластин и их расстояние до шва определяются толщиной сварного соединения.

Диаметр пластин, необходимых для прозвучивания стыкового шва, будет тем больше, чем толще шов. Возможность

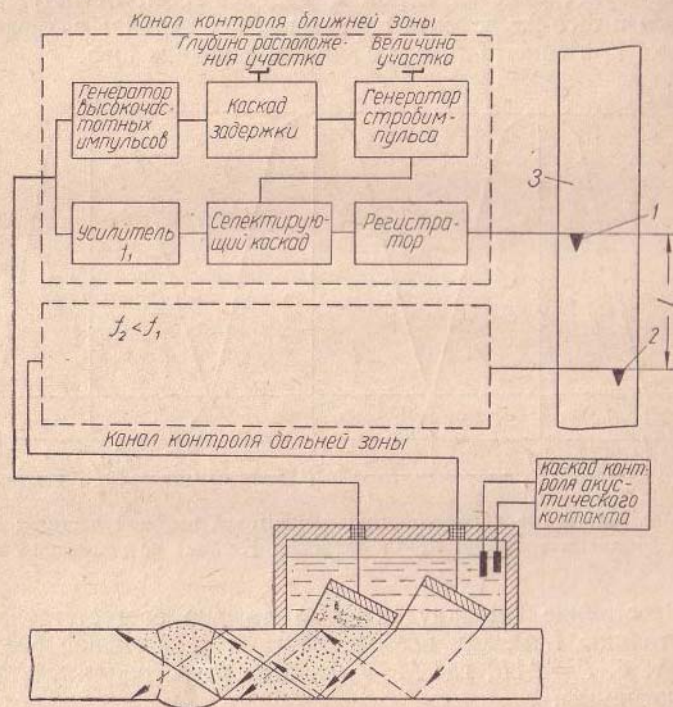


Рис. 97. Функциональная схема двухканального ультразвукового дефектоскопа для контроля качества стыковых швов методом продольного перемещения щупа.

применения пьезоэлектрических пластин большого диаметра ограничивается спецификой временной селекции эхосигналов при автоматическом контроле швов с валиком «усиления» (см. гл. VII). В связи с этим рассматриваемый метод может быть использован лишь для контроля стыковых швов малой толщины с плавным переходом валика «усиления» к основному металлу.

Прозвучивание угловых швов осуществляется также с помощью двух приемно-излучающих пластин. Одна из этих пластин предназначена для выявления непровара и других дефектов в корне шва, а вторая — дефектов, расположенных в остальной части шва (рис. 98). Диаметр пьезоэлектрических пластин в этом случае зависит от толщины примыкаемого листа (стенки) и величины катетов шва. При толщине листа стенки менее 20 мм диаметр пластин, необходимых для контроля углового соединения, не превышает 15 мм.

Для контроля швов малой ширины и протяженности, но большой высоты, например, рельсовых стыков, выполненных электроконтактной сваркой, более удобно применять метод поперечного перемещения щупа.

Прозвучивание больших сварных сечений осуществляется составным вибратором или несколькими составными вибраторами, расположенными на различных поверхностях соединения. При этом для исключения взаимного влияния вибраторов должна быть предусмотрена частотная селекция. Предотвращение проникновения на регистратор эхосигналов от поверхности изделия и зондирующего импульса обеспечивается введением временной селекции. Документ, регистрирующий результаты контроля, характеризует лишь наличие или отсутствие дефектов в проверенном шве.

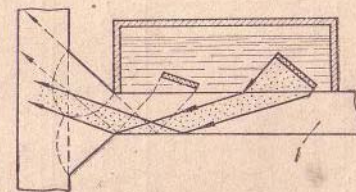


Рис. 98. Схема прозвучивания углового шва: 1 — стенка.

## 1. АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ШВОВ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЩУПА

Метод продольного перемещения щупа находит весьма широкое применение при контроле качества сварки труб в стационарных условиях.

Установка, разработанная Институтом электросварки им. Е. О. Патона, обеспечивает выявление дефектов площадью 1 мм<sup>2</sup> и более при скорости контроля до 120 м/ч. Прозвучивание шва трубы осуществляется двумя искательными головками, расположенными в локальных ваннах.



Ванны совместно с дефектоскопом перемещаются вдоль шва. Результаты контроля фиксируются самописцем на бумажной ленте. Кроме того, дефектное место шва отмечается краской.

НИИМОСТов разработана передвижная установка для автоматического контроля стыковых и угловых швов (рис. 99). Шов прозвучивается двумя щупами, расположенными в локальных ваннах (см. рис. 87). Ванны, установленные в общий кожух, перемещаются вдоль шва с помощью специальной каретки. Каретка движется на электромагнитных колесах, приводимых в движение мотором постоянного тока. На каретке размещаются кассеты с электротермической бумагой, которая «разворачивается» при контроле вдоль шва. Дефекты фиксируются на ней черными линиями. Каретка подключается к установке многожильным кабелем. Установка представляет собой двухканальный дефектоскоп с рабочими частотами 1,8 и 2,5 Мгц.

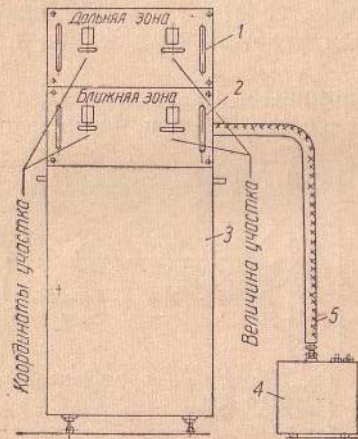


Рис. 99. Общий вид опытной передвижной установки для автоматического контроля швов методом продольного перемещения щупа:

- 1 — канал контроля дальней зоны;
- 2 — канал контроля ближней зоны;
- 3 — дверка тумбочки;
- 4 — каретка;
- 5 — кабель.

Весь монтаж расположен в верхней части металлической тумбочки. В нижней части ее предусмотрены полки для размещения каретки и кабелей. Длина кабелей позволяет без перемещения установки производить контроль швов протяженностью до 6 м. Для проверки швов большей протяженности передвигают вдоль шва саму установку.

Схема установки приведена на рис. 100.

Установка при скорости контроля до 150 м/ч позволяет выявлять дефекты площадью 2 мм<sup>2</sup> и более. По ультразвукограмме, записанной на токочувствительной бумаге в масштабе 1 : 1, можно судить о протяженности дефектных участков и определить их месторасположение в соединении.

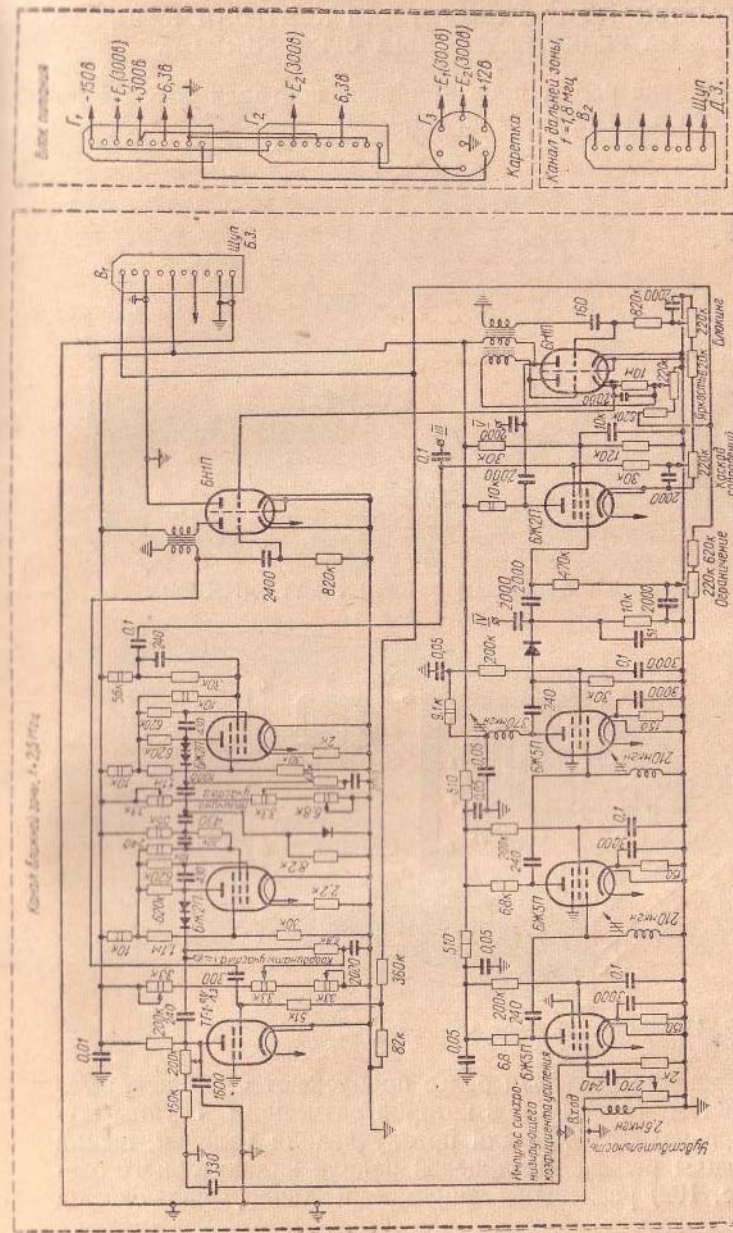


Рис. 100. Принципиальная схема опытной установки для автоматического контроля швов методом продольного перемещения щупа.



## 2. УСТАНОВКА УРДА-1 (НИИМ) ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕЛЬСОВ НА РЕЛЬСОСВАРОЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Установка работает на принципе контроля методом поперечного перемещения щупа.

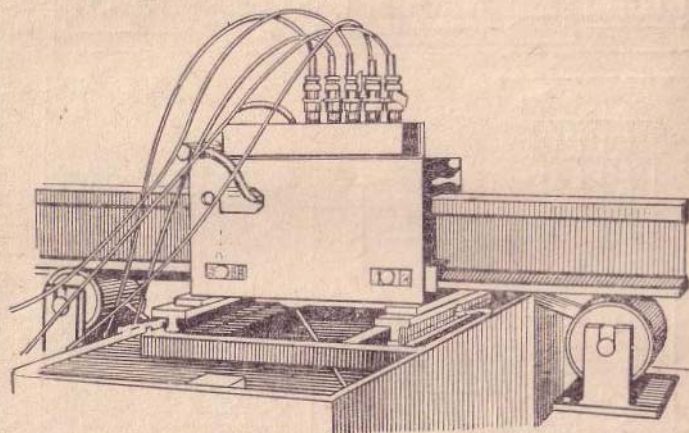


Рис. 101. Искательная система установки УРДА-1 (НИИМ).

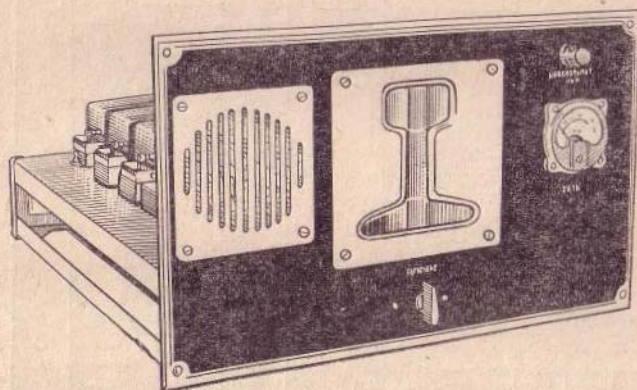


Рис. 102. Индикаторный блок установки УРДА-1 (НИИМ).

В процессе контроля рельс пропускают через искательную систему (рис. 101), в которой размещены группы щупов, предназначенных для прозвучивания головки, шейки и подошвы рельса. На лицевой панели индикаторного блока (рис. 102) размещены динамик и табло, являющиеся

индикаторами обнаружения дефектов. При обнаружении 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 щупы. Углы ввода ультразвуковых лучей и схема размещения щупов выбраны на основе результатов предварительных исследований и двухлетнего опыта применения ручного ультразвукового контроля сварных стыков рельсов.

Индикаторный блок имеет выход на краскопульт, срабатывающий при выявлении дефекта и распыляющий краску на дефектное место рельса.

В установке УРДА-1 (НИИМ) предусмотрена система самоконтроля. При нормальной работе всех блоков и наличии акустического контакта на табло освещен весь контур сечения рельса. В случае нарушения в работе одного из блоков включается звонок и гаснет подсвет той части контура рельса, контроль которой прекращен.

Проверка работоспособности установки до начала контроля производится нажатием соответствующих кнопок, чем имитируется обнаружение дефекта.

Настройка установки на контроль рельса определенного типа сводится к регулировке потенциометра, выведенного под шлиц на лицевую панель блока контроля.

Осциллоскоп является дополнительным индикатором типа А. На его экране возможно наблюдать селективирующие импульсы и импульсы на выходе каскада совпадений одного из блоков контроля. Подключение осциллоскопа к любому блоку контроля производится переключателем.

С помощью глубиномера, встроенного в осциллоскоп, можно измерять координаты расположения выявленных дефектов. Кроме того, осциллоскоп может быть использован для наблюдения форм напряжений в различных точках установки при ее ремонте.

Установка УРДА-1 (НИИМ), контролирующая как сварные стыки, так и основной металл рельса по всей его длине, может быть использована и на рельсопрокатных заводах. Скорость контроля практически не ограничена.



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЩУПА

Метод продольно-поперечного перемещения щупа 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 100 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 щупа и «бегающего» луча.

Максимальная толщина металла, которая может быть проконтролирована методом продольно-поперечного перемещения щупа, ограничивается падением чувствительности вследствие увеличения пути прохождения ультразвуковых колебаний в металле; кроме того, с увеличением толщины металла возрастают пределы перемещения щупа в направлении, перпендикулярном шву, что ведет к усложнению конструкции и увеличению размеров автомата. Контроль швов толщиной свыше 100 мм более целесообразно производить методом качающегося луча.

Сущность метода заключается в следующем (рис. 103). Щупу, установленному в специальное приспособление, особым механизмом сообщается продольно-поперечное перемещение, при котором обеспечивается построчное прозвучивание контролируемого объема шва любой длины. Со щупом связано устройство наблюдения с регистратором, копирующее движение щупа. Регистратор, управляемый индикатором приемно-сигнализирующего устройства, отмечает на ультразвукограмме I вида положения устрой-

ства 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 I вида соответствуют размерам проконтролированного участка, размеры же дефектов на ультразвукограмме получают искаженными вследствие того, что диаметр луча больше размеров выявляемых пороков.

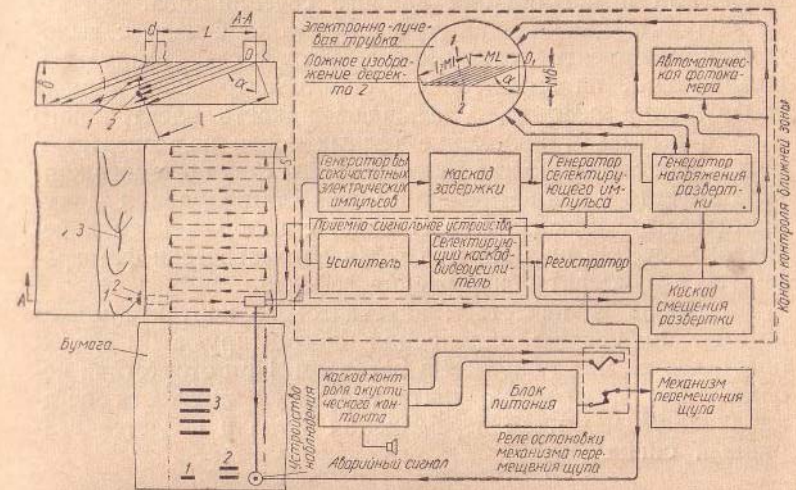


Рис. 103. Функциональная схема автоматического контроля швов методом продольно-поперечного перемещения щупа.

Для предотвращения проникновения на индикатор эхo-импульсов от неровностей поверхности шва в приемно-сигнализирующем устройстве должна осуществляться временная селекция.

С целью получения ультразвукограмм II вида (изображение поперечного сечения шва) применяется индикатор типа B. На экране электронно-лучевой трубки воспроизводится линия развертки, расположенная под углом к вертикали, равным углу  $\alpha$  ввода ультразвукового луча в металл. Длительность развертки равна времени прохождения ультразвуковым импульсом расстояния от щупа на заданную глубину и обратно. Длина развертки соответ-



ствуется в масштабе  $M$  длине пути ультразвукового импульса в контролируемом участке металла. Специальным синхронизирующим устройством обеспечивается горизонтальное смещение развертки синхронно с поперечным перемещением щупа. Величина горизонтального смещения развертки соответствует в том же масштабе  $M$  длине  $L$  поперечного перемещения щупа.

Таким образом, электронный луч копирует на экране трубки распространение ультразвукового импульса в металле при прозвучивании данного сечения шва.

Модулятор электронно-лучевой трубки связан с выходом приемно-сигнализирующего устройства. Импульсы, возникающие на выходе видеусилителя 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 (ультразвукограммы II вида) с изображением поперечного сечения шва экран трубки автоматически фотографируется в момент обнаружения дефекта.

Контроль за качеством акустического контакта может вестись по уровню заполнения контактирующей средой пространства между щупом и металлом. При отсутствии необходимого количества контактирующей жидкости останавливается механизм перемещения щупа и подается аварийный сигнал.

### 1. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ИСКАЖЕНИЯ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ НА УЛЬТРАЗВУКОГРАММЕ I ВИДА

Под разрешающей способностью аппаратуры при получении ультразвукограммы I вида будем понимать минимальные расстояния между дефектами, отдельно воспроизводимыми на ультразвукограмме (рис. 104). При прочих равных условиях разрешающая способность тем меньше, чем больше диаметр ультразвукового луча. Разрешающая способность по высоте шва (расстояние  $l_b$  на рис. 104), кроме того, зависит от угла ввода луча  $\alpha$  и определяется равенством

$$l_b = Ka \operatorname{ctg} \alpha,$$

где  $l_b$  — расстояние между дефектами по высоте шва;  
 $K$  — коэффициент, зависящий от характеристики направленности луча;  
 $a$  — расстояние между дефектами в направлении поперечного перемещения щупа;  
 $\alpha$  — угол ввода луча.



Рис. 104. Разрешающая способность и искажения в изображении дефектов при получении ультразвукограммы I вида.

Размеры  $C_n$ ,  $h_n$  изображений дефектов на ультразвукограмме получаются искаженными по сравнению с истинными размерами дефектов  $C$ ,  $h$  и связаны с ними соотношениями

$$C_n = K_1 C;$$

$$h_n = K_2 h.$$

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  зависят от характеристики направленности луча, конфигурации, размеров и глубины залегания дефекта.

Ориентировочные значения коэффициентов  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  для сварных соединений определенного типа могут быть установлены экспериментально.

### 2. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ИСКАЖЕНИЯ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ НА УЛЬТРАЗВУКОГРАММЕ II ВИДА

Для наблюдения на индикаторе типа  $B$  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, отдельно различаемыми на экране) и возможные искажения в изображении дефектов при регистрации ультразвукограммы II вида зависят от:

- а) длительности ультразвукового и видеоимпульса, подаваемого на индикатор;
- б) масштаба изображения и размера пятна электронно-лучевой трубки;
- в) ширины, угла расхождения и угла ввода ультразвукового луча.

Влияние перечисленных факторов на качество изображения может быть ориентировочно оценено при схематическом представлении формы ультразвукового луча в виде тонкой нити и в виде пучка расходящихся нитей.

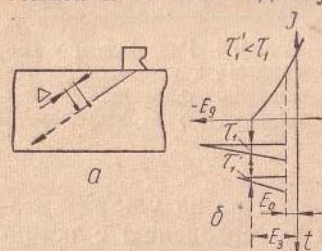


Рис. 105. Зависимость разрешающей способности и качества изображения от длительности и формы ультразвукового импульса и видеоимпульса:

$\Delta$  — расстояние между дефектами;  $E_d$  — напряжение на управляющей сетке трубки;  $J$  — ток луча в трубке;  $t$  — время;  $E_0$  — напряжение смещения на управляющей сетке, соответствующее нормальной яркости;  $E_1$  — напряжение на управляющей сетке, запирающее трубку по току (шумовая яркость).

При получении изображения дефекта играет роль длительность видеоимпульса  $\tau_1$  на уровне напряжения, соответствующем запираению электронно-лучевой трубки  $E_3$ . Длительность видеоимпульса  $\tau_1$ , определяющая качество изображения на экране, зависит от амплитуды видеоимпульса, которая в свою очередь обусловлена чувствительностью дефектоскопа, глубиной залегания и характером дефекта,

Длительность ультразвукового импульса  $\tau$  связана с разрешающей способностью соотношением (рис. 105, а)

$$\tau \approx \frac{2\Delta}{C_n}, \quad (49)$$

где  $\Delta$  — минимальное расстояние между дефектами, еще различаемыми на экране;

$C_n$  — скорость распространения поперечных ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковой импульс и тем более видеоимпульс на выходе усилителя не являются прямоугольными и, следовательно, имеют разную длительность на разном уровне напряжения (рис. 105, б).

а также качеством акустического контакта щупа с металлом.

Для увеличения разрешающей способности и получения более качественного изображения, не зависящего от амплитуды эхо-сигнала, целесообразно при контроле использовать более кратковременные ультразвуковые импульсы, а модуляцию по яркости производить предварительно нормализованными по длительности и амплитуде видеоимпульсами с выхода усилителя.

Предельная разрешающая способность при получении изображения может определяться длительностью ультразвуковых импульсов или же масштабом изображения и диаметром пятна. Разрешающая способность, определяемая длительностью импульса  $\tau$ , и разрешающая способность, определяемая масштабом изображения  $M$  и диаметром пятна  $d_n$ , будут равны, если

$$\frac{2l}{C_n \tau} = \frac{Ml}{d_n}, \quad (50)$$

где  $\frac{2l}{C_n \tau}$  — число импульсов, которые могут разместиться во времени при длине  $l$  пути ультразвукового импульса в контролируемом участке (см. рис. 103);  $\frac{Ml}{d_n}$  — число пятен, которые могут уложиться на линии развертки длиной  $Ml$ .

Используя формулу (50), можно определить минимальный масштаб изображения, позволяющий использовать предельную разрешающую способность, обуславливаемую длительностью ультразвукового импульса:

$$M_{\min} = \frac{2d_n}{C_n \tau}. \quad (51)$$

Очевидно, что в большинстве случаев максимально возможный масштаб получаемого изображения будет ограничиваться диаметром экрана электронно-лучевой трубки.

Величина максимально возможного масштаба  $M_{\max}$  получаемого изображения определяется соотношением

$$M_{\max} = \frac{D}{\sqrt{H^2 + (L + H \operatorname{tg} \alpha)^2}}, \quad (52)$$



где  $D$  — диаметр экрана электронно-лучевой трубки;  
 $H$  — толщина контролируемого слоя;  
 $L$  — величина поперечного перемещения щупа;  
 $\alpha$  — угол ввода ультразвукового луча.

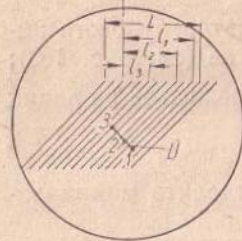
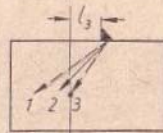
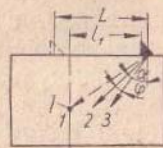


Рис. 106. Влияние угла расхождения  $\varphi$ , угла ввода  $\alpha$  и ширины ультразвукового луча на качество изображения дефектов:  
 1 — дефект; 11 — изображение дефекта.

тер получаемого изображения дефекта поясняется рис. 106. Как видно из рис. 106, искажения при получении видимого изображения дефекта будут тем меньше, чем меньше диаметр, угол расхождения  $\varphi$  и угол ввода  $\alpha$  ультразвукового луча.

Применительно к стыковым сварным швам формула (52) принимает вид

$$M_{\max} = \frac{D}{\sqrt{H^2 + (2H \operatorname{tg} \alpha - d)^2}}, \quad (53)$$

где  $d$  — расстояние центра излучения щупа от его передней грани.

Значения максимально возможного масштаба  $M_{\max}$  получаемого изображения при контроле швов толщиной  $H$  щупом с углом  $\alpha = 65^\circ$  ( $d = 20$  мм) и диаметре экрана  $D = 130$  мм приведены ниже:

$H$ , мм	$M_{\max}$	$H$ , мм	$M_{\max}$	$H$ , мм	$M_{\max}$
25	1,5	75	0,4	150	0,2
50	0,7	100	0,3	200	0,15

При диаметре трубки  $D = 130$  мм ( $d_n \approx 0,5$  мм), длительности ультразвукового импульса  $\tau \approx 2$  мксек и скорости ультразвука в стали  $C_n \approx 3,26$  мм/мксек минимальный масштаб изображения  $M_{\min} = 0,15$ . Из сравнения величины  $M_{\min} = 0,15$  с данными, приведенными выше, следует, что максимальная разрешающая способность изображения, воспроизводимого на экране диаметром 130 мм, приблизительно равна 3 мм и получается при контроле стыковых швов толщиной до 200 мм.

Влияние расхождения ультразвукового луча и ширины его на характер получаемого изображения дефекта поясняется рис. 106.

Как видно из рис. 106, искажения при получении видимого изображения дефекта будут тем меньше, чем меньше диаметр, угол расхождения  $\varphi$  и угол ввода  $\alpha$  ультразвукового луча.

Экспериментальные исследования по регистрации ультразвукограммы II вида подтвердили изложенные выше теоретические предположения.

Исследования производились на стальных образцах, в которых были имитированы дефекты в виде отверстий диаметром 1,5 мм, и на стыковых сварных швах толщиной 40 мм. Щуп, 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 индикаторного блока.

Яркость развертки модулировалась импульсами, поступающими непосредственно с выхода видеоусилителя дефектоскопа, или нормализованными импульсами, снимаемыми с блокинг-генератора.

Анализ результатов экспериментальных работ показал, что:

1) для получения большей разрешающей способности, не зависящей в сильной степени от чувствительности и акустического контакта, следует использовать предварительно нормализованный видео-

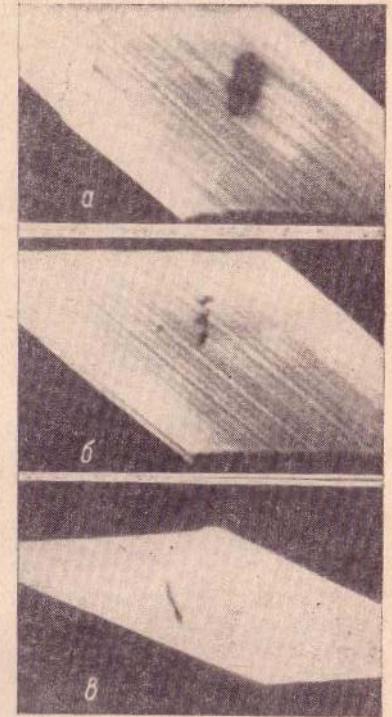


Рис. 107. Фотографии экрана трубки при выявлении трех отверстий диаметром 1,5 мм, расположенных на расстоянии 3,5 мм друг от друга (глубина залегания первого отверстия 25 мм):

$a$  — угол ввода луча  $\alpha = 50^\circ$ , модуляция по яркости осуществлялась видеоимпульсом;  $b$  — угол ввода луча  $\alpha = 50^\circ$ , модуляция по яркости осуществлялась нормализованным видеоимпульсом;  $c$  — угол ввода луча  $\alpha = 65^\circ$ , модуляция по яркости осуществлялась нормализованным видеоимпульсом.



импульс выходного каскада приемника дефектоскопа (рис. 107, а, б);

2) искажения в изображении дефектов увеличиваются с увеличением угла ввода ультразвукового луча (рис. 107, б, в);

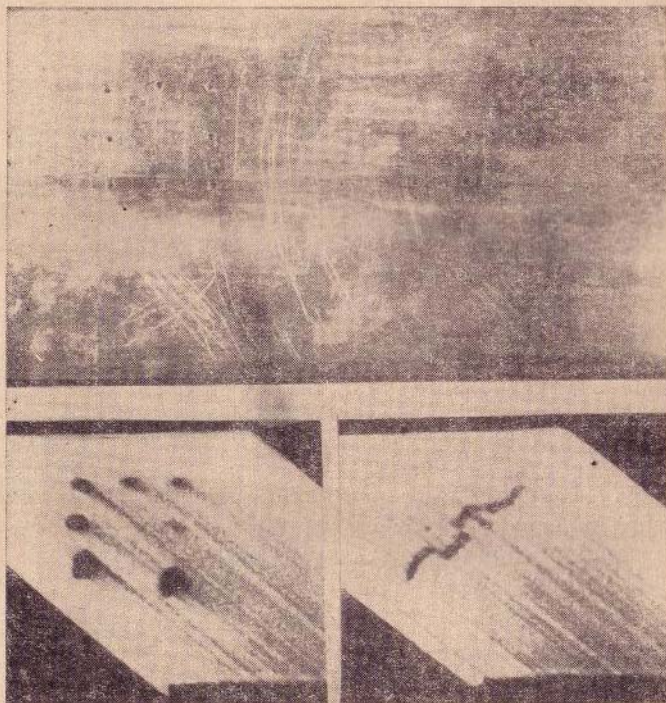


Рис. 108. Расположение в образце дефектов в виде отверстий диаметром 1,5 мм и фотографии экрана при выявлении их методом продольно-поперечного перемещения щупа.

3) при близком расположении дефектов и большой чувствительности возможно появление на экране ложных изображений выявленных дефектов вследствие вторичных отражений от них ультразвукового импульса (см. рис. 103);

4) при расположении двух или более одинаковых по размерам дефектов по линии распространения ультразвуковых колебаний на экране трубки возможно воспроизведение изображения лишь дефекта, ближайшего к щупу (рис. 108).

### 3. ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОГРАФИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ СЕЧЕНИЯ ШВА

При автоматическом контроле методом продольно-поперечного перемещения щупа 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  $N$  — число воспроизводимых сечений;

$l$  — длина контролируемого участка шва;

$S$  — шаг продольного перемещения щупа (см. рис. 103).

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. Величина 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. 109). 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.

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 щупа и длилось в течение этого хода. В связи с этим включение устройства управления затвором фотокамеры производится фиксаторами при достижении щупом 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 которого фотографировалось. По окончании экспонирования производится автоматическая перемотка фотопленки.

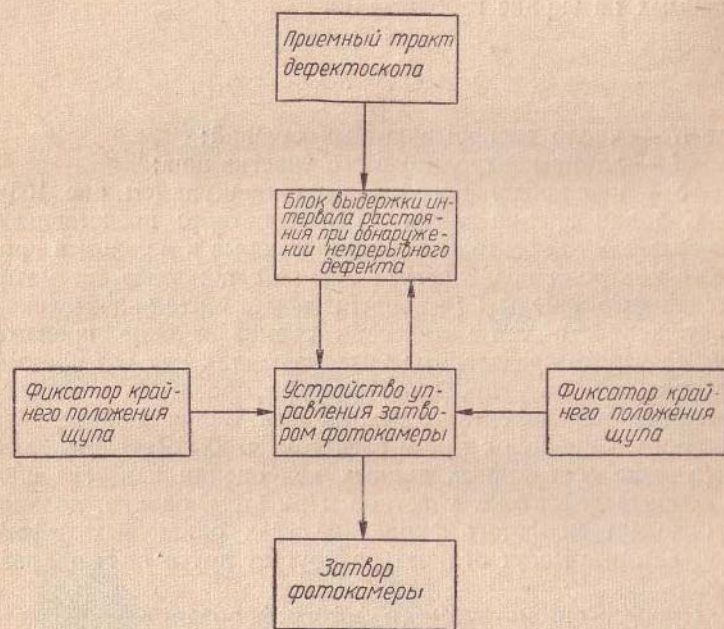


Рис. 109. Функциональная схема каскада автоматического фотографирования.

#### 4. ПРОЗВУЧИВАНИЕ СТЫКОВЫХ ШВОВ

Прозвучивание стыковых швов обеспечивается продольно-поперечным перемещением щупа в определенных пределах. Для выявления различным образом ориентированных дефектов искательному устройству придается качающееся (маятниковое) движение. Способ прозвучивания, угол ввода луча и пределы перемещения щупа определяются толщиной металла и шириной валика «усиления» шва.

В гл. IV показано, что даже для контроля одного и того же стыкового шва должны быть последовательно применены различные способы прозвучивания с помощью различных щупов. Смена способов прозвучивания и щупов требует перестройки режима работы каскада задержки и генератора селективирующих импульсов. Поэтому при

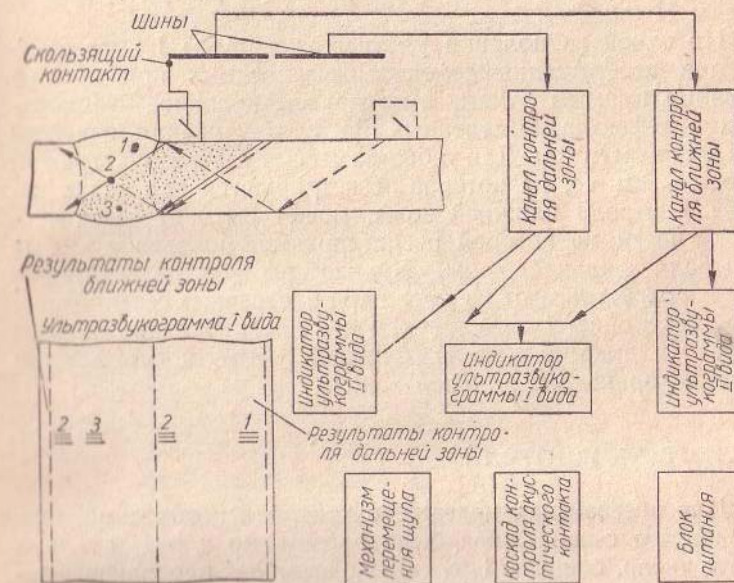


Рис. 110. Функциональная схема двухканальной установки для контроля стыковых швов методом продольно-поперечного перемещения щупа.

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 через специальные шины, размещенные на механизме перемещения щупа, подключаются к ультразвуковому дефектоскопу (рис. 110). В ультразву-



ковом дефектоскопе предусматривается два самостоятельных канала — для прозвучивания шва прямым лучом (канал контроля ближней зоны) и для прозвучивания шва отраженным лучом (канал контроля дальней зоны). Блок-схема каналов приведена на рис. 103. 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 отраженным лучом. Для удобства чтения ультразвукограммы I вида часть ее, на которой регистрируются показания канала контроля ближней зоны, может быть отделена чертой от части, на которой регистрируются показания канала контроля дальней зоны. 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).

### 5. СКОРОСТЬ КОНТРОЛЯ

Для обеспечения надежного контроля необходимо, чтобы каждое сечение шва было прозвучено  $n$  раз, где  $n$  — целое число, большее 1. В связи с этим шаг продольного перемещения щупа  $S$  должен составлять  $n$ -ную часть от ширины ультразвукового луча

$$S = \frac{D_0}{n},$$

где  $D_0$  — эффективный диаметр ультразвукового луча.

Естественно, что постоянство величины шага  $S$  независимо от скорости контроля может быть обеспечено, если скорости поперечного и продольного перемещений щупа связаны между собой определенным образом. Скорость продольного движения щупа, т. е. скорость контроля, прямо

\* При значительном усложнении схемы дефектоскопа возможна регистрация ультразвукограмм II вида обеих половин шва на общем индикаторе.

пропорциональна скорости его поперечного движения (см. рис. 103).

$$v_{пр} \approx \frac{S}{2L} v_n, \quad (54)$$

где  $v_n$  — скорость поперечного перемещения щупа;

$v_{пр}$  — скорость продольного перемещения щупа;

$L$  — шаг поперечного перемещения щупа;

$S$  — шаг продольного перемещения щупа;

Максимально возможная скорость поперечного перемещения щупа обуславливается частотой излучения ультразвуковых импульсов и может быть определена из соотношения

$$\frac{N}{F} = \frac{D_0}{v_{n\max}}, \quad (55)$$

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) щупа;

$F$  — частота излучения ультразвуковых импульсов;

$D_0$  — эффективный диаметр луча;

$v_{n\max}$  — максимально возможная скорость поперечного перемещения щупа;

$\frac{N}{F}$  — время, необходимое для излучения  $N$  импульсов;

$\frac{D_0}{v_{n\max}}$  — время прохождения приемно-излучающим элементом расстояния  $D_0$ , равного ширине ультразвукового луча.

Из формул (54) и (55) получаем выражение для определения максимально допустимой скорости контроля шва

$$v_{пр\max} = \frac{1,8D_0^2 F}{L} \cdot \frac{1}{nN}, \quad (56)$$

где  $v_{пр\max}$  — максимальная скорость, м/с, при которой еще каждое сечение прозвучивается  $n$  раз и каждая точка объема при каждом поперечном ходе щупа озвучивается  $N$  ультразвуковыми импульсами;

$D_0$  — эффективный диаметр ультразвукового луча, мм;

$F$  — частота излучения импульсов, гц;

$L$  — шаг поперечного перемещения щупа, мм;



$n$  — число прозвучиваний каждого сечения шва;  
 $N$  — число импульсов, озвучивающих каждую точку в сечении за одно поперечное перемещение щупа.

Так, например, при диаметре луча  $D_s = 5$  мм, частоте  $F = 1000$  гц, числе импульсов, озвучивающих каждую точку контролируемого объема за один ход поперечного перемещения щупа,  $N = 10$ , шаге поперечного перемещения щупа  $L = 100$  мм и пятикратном прозвучивании каждого сечения шва ( $n = 5$ ) скорость контроля не должна превышать 9 м/ч.

Для перемещения щупа при автоматическом контроле данным методом могут быть использованы приспособления с различными кинематическими схемами.

Приспособление, общий вид и кинематическая схема которого приведены на рис. 111, было разработано НИИМостов в 1954 г. для прозвучивания однотипных швов небольшой протяженности при выполнении экспериментальных исследований.

Весь механизм перемещения щупа и записи ультразвукограммы размещен на раме, присасывающейся к контролируемому объекту тремя электромагнитами; сила притяжения электромагнитов обеспечивает жесткое крепление установки к металлу в любом положении: горизонтальном (снизу и сверху) и вертикальном.

Продольное перемещение щупа осуществляется червячной передачей, состоящей из однозаходного червяка 3 с шагом 3 мм и накидной гайкой 2, жестко связанной со щупом 4.

Синхронизация поперечного движения щупа с продольным обеспечивается зубчатой передачей  $z_3-z_4$ , связывающей между собой вращение червяка и работу кулисного механизма.

Шестерня  $z_3$  во вращательном движении связана с червяком шпонкой, а в продольном движении — со щупом, перемещаясь по шпоночной канавке, идущей вдоль червяка.

На оси шестерни  $z_4$  сидит маховик кулисного механизма, придающего щупу поперечное движение; ход щупа в поперечном движении регулируется путем изменения точки закрепления шатуна на маховике.

Вращательное движение червяку передается от двигателя 1 через шестеренчатую пару  $z_1-z_2$ . Щуп вставляется в держатель, укрепленный на ползуне с помощью на-

правляющих и пружин; пружины обеспечивают необходимое давление щупа на металл в процессе контроля. Над держателем щупа установлено перо с электромагнитом, прижимающим перо к бумаге в момент обнаружения дефекта. Кассета с рулоном писчей бумаги располагается

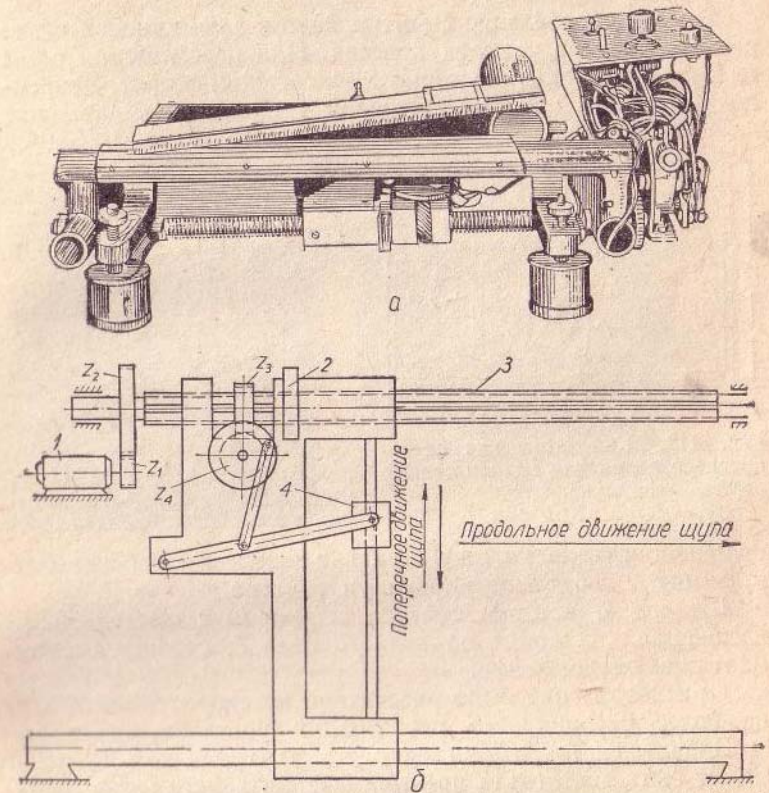


Рис. 111. Приспособление для автоматического контроля швов методом продольно-поперечного перемещения щупа:  
 а — общий вид; б — кинематическая схема.

над пером; перезарядка кадра производится путем вытягивания бумаги из кассеты. Автоматическая остановка щупа в момент окончания контроля осуществляется с помощью концевого выключателя. Границы хода щупа отмечаются на ультразвукограмме путем замыкания электро-



магнита пера механическими контактами, связанными с маховиком кулисного механизма. Размеры регистрируемой ультразвукограммы не более  $210 \times 130$  мм.

На рис. 112 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

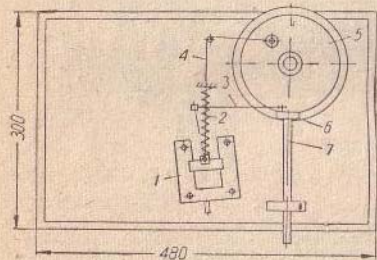


Рис. 112. Кинематическая схема приспособления для механического перемещения щупа.

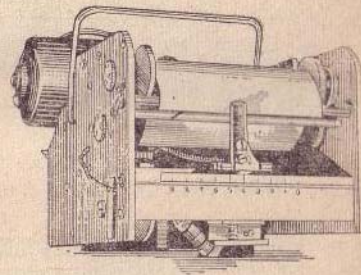


Рис. 113. Общий вид каретки для автоматического контроля швов методом продольно-поперечного перемещения щупа.

перпендикулярно ко шву щуп 1 и одновременно сжимает пружину 2, возвращающую щуп обратно.

Штанга 3, которая связана шарниром с шестерней 6, насаженной на конце приводного вала 7, сообщает щупу 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 каретки конструкции НИИмостов (рис. 113).

Движение каретки осуществляется электродвигателем, приводящим в движение стальные колеса в виде валиков.

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. Автомат передвигается вдоль шва (продольное движение) в вертикальном и вися-

чем (потолочном) положениях. Поперечное перемещение ванны, в которой укреплен щуп, связано с продольным движением каретки кулисным механизмом через фрикционную муфту. Фрикционная муфта ограничивает пределы перемещения щупа в поперечном ко шву направлении и предохраняет автомат от возможного повреждения при наличии на поверхности, по которой перемещается щуп, крупных выступов и брызг металла.

Результаты контроля фиксируются на электротерми-

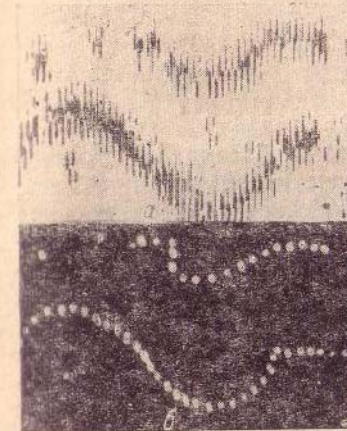


Рис. 114. Ультразвукограмма (а) и рентгенограмма (б) плиты толщиной 12 мм, в которой имитированы дефекты; ультразвукограмма записана на бумаге с помощью приспособления, приведенного на рис. 111.

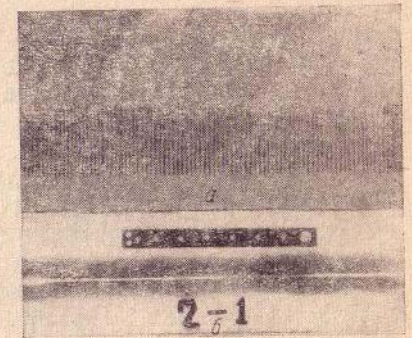


Рис. 115. Ультразвукограмма (а) и рентгенограмма (б) стыкового сварного шва толщиной 20 мм со сплошным непроваром; ультразвукограмма записана на электротермической бумаге с помощью каретки (рис. 113).

ческой бумаге с помощью пера, размещенного над щупом. При обнаружении дефекта на перо с помощью электронного реле подается напряжение, в результате чего на бумаге выжигается черная линия. Механизм перемотки электротермической бумаги из подающей кассеты в приемную рассчитан так, что длина перемотанной части строго равна длине пути, пройденного автоматом.

На рис. 114 и 115 приведены ультразвукограммы, полученные с помощью дефектоскопов УЗД-НИИМ-2 и УЗД-НИИМ-5 и экспериментальных приспособлений для автоматического контроля (рис. 111, 113). Для сравнения рядом с ультразвукограммой помещена рентгенограмма.



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ШВОВ МЕТОДОМ „БЕГАЮЩЕГО“ ЛУЧА

Методом «бегающего» луча целесообразно контролировать стыковые и угловые швы небольшой протяженности. Предлагаемый метод заключается в следующем. Щуп, состоящий из мозаики приемно-излучающих пьезоэлектрических элементов, подключается к приемно-сигнализирующему устройству и генератору электрических импульсов через устройство построчного прозвучивания. Подключение пластин осуществляется таким образом, что ультразвуковой луч постепенно обегает весь объем контролируемого участка. Размеры контролируемого участка определяются размерами щупа (т. е. числом и диаметром пьезоэлектрических элементов щупа).

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 задается 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 ко шву.

В качестве устройства наблюдения удобно использовать электронно-лучевую трубку, на экране которой воспроизводится развертка типа *C*. При этом длина строк соответствует длине щупа, а высота кадра — ширине щупа. 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. При отсутствии дефектов яркость и фокусировка изображения нормальны. 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 щупе, 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 толщиной 2—5 мм с косвенным контролем за его качеством.

Функциональная схема установки для автоматического контроля качества швов представлена на рис. 116. Для получения более качественного изображения целесообразно, чтобы ширина строки соответствовала ширине пьезоэлектрической пластины. Частота  $F_c$  строк должна быть не более той, при которой каждая из  $n_c$  пьезоэлектрических пластин в ряду при каждом включении успевает излучить не менее  $N$  зондирующих импульсов. Частота строк  $F_c$  обуславливается частотой излучения ультразвуковых импульсов и связана с ней соотношением

$$\frac{1}{F_c n_c} = \frac{N}{F}. \quad (57)$$

Из уравнения (57) следует, что

$$F_c \leq \frac{F}{N n_c}. \quad (58)$$

В уравнениях (57) и (58):

$F_c$  — частота строк;

$F$  — частота посылок импульсов;



$n_c$  — число пластин в строке;  
 $N$  — число импульсов, излучаемых пластиной при каждом ее подключении;

$\frac{1}{F_{\text{лс}}}$  — время подключения одной пластины;

$\frac{N}{F}$  — время, необходимое для излучения  $N$  зондирующих импульсов.

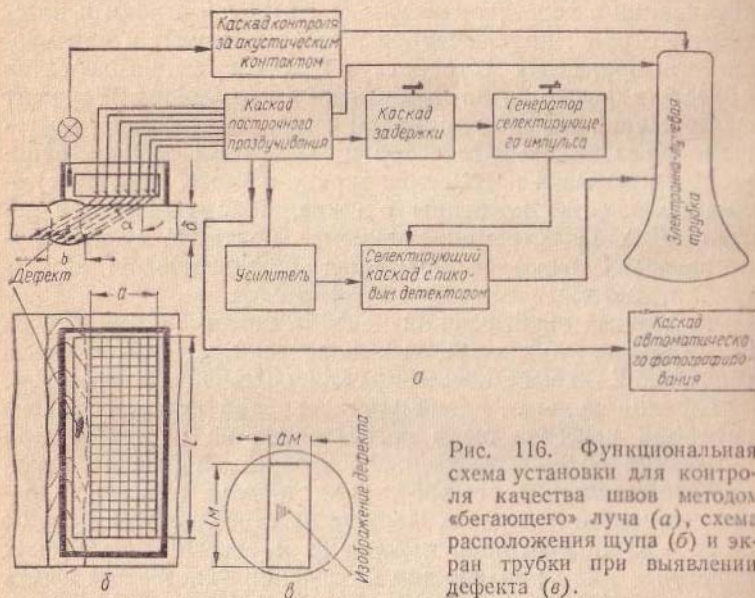


Рис. 116. Функциональная схема установки для контроля качества швов методом «бегущего» луча (а), схема расположения щупа (б) и экран трубки при выявлении дефекта (в).

Частота кадров  $F_k$  связана с частотой строк  $F_c$  соотношением

$$F_k = \frac{F_c}{n_k}, \quad (59)$$

где  $n_k$  — число строк в кадре (число рядов пластин в щупе).

Число пластин в ряду зависит от длины контролируемого участка

$$n_c = \frac{l}{D}, \quad (60)$$

где  $l$  — длина контролируемого участка шва;

$D$  — диаметр пластины.

Количество рядов пластин в щупе определяется толщиной контролируемого шва, углом ввода луча и диаметром приемно-излучающих пластин (рис. 117)

$$n_c \approx \frac{a \cos \beta}{D}. \quad (61)$$

При этом общее число пластин в щупе

$$n = n_c n_k = \frac{la \cos \beta}{D^2}. \quad (62)$$

Так, например, при контроле швов толщиной  $\delta = 60$  мм и длиной 200 мм щупом с углом ввода луча  $\alpha = 65^\circ$  (угол призмы из плексигласа  $\beta = 50^\circ$ ) и пластинами диаметром  $D = 12$  мм с регистрацией изображения на экране трубки в масштабе  $M = 1 : 4$  имеем:

число пластин в ряду

$$n_c = \frac{l}{D} = \frac{200}{12} \approx 17;$$

число рядов в щупе

$$n_k = \frac{a \cos \beta}{D} \approx \frac{\delta \operatorname{tg} \alpha \cos \beta}{D} = \frac{60 \cdot 2,145 \cdot 0,643}{12} \approx 7;$$

общее число пластин

$$n = n_c n_k = 17 \cdot 7 = 119;$$

длина щупа

$$l \approx D n_c = 12 \cdot 17 = 204 \text{ мм};$$

ширина щупа

$$a \approx \delta \operatorname{tg} \alpha = 60 \cdot 2,145 \approx 130 \text{ мм};$$

максимальная частота строк при частоте посылок ультразвуковых импульсов  $F = 300$  гц и  $N = 10$

$$F_c \leq \frac{F}{n_c N} = \frac{300}{17 \cdot 10} = 1,77 \text{ гц};$$

максимальная частота кадров

$$F_k = \frac{F_c}{n_k} = \frac{1,77}{7} = 0,25 \text{ гц};$$

время контроля (период кадра)

$$T_k = \frac{1}{F_k} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ сек.}$$

Разрешающая способность при контроле (т. е. минимальное расстояние между двумя дефектами, отдельно различаемыми на экране) несколько больше диаметра пьезоэлектрической пластины.



## 1. ПРОЗВУЧИВАНИЕ СТЫКОВЫХ ШВОВ

Стыковой шов может быть полностью прозвучен с одной стороны листа (рис. 117, б, г) или с двух сторон (рис. 117, а, в). Прозвучивание соединений листов толщиной более 20 мм ведется по схемам, приведенным на рис. 117, а, б. Контроль швов листов меньших толщин осуществляется по схемам, показанным на рис. 117, в, г.

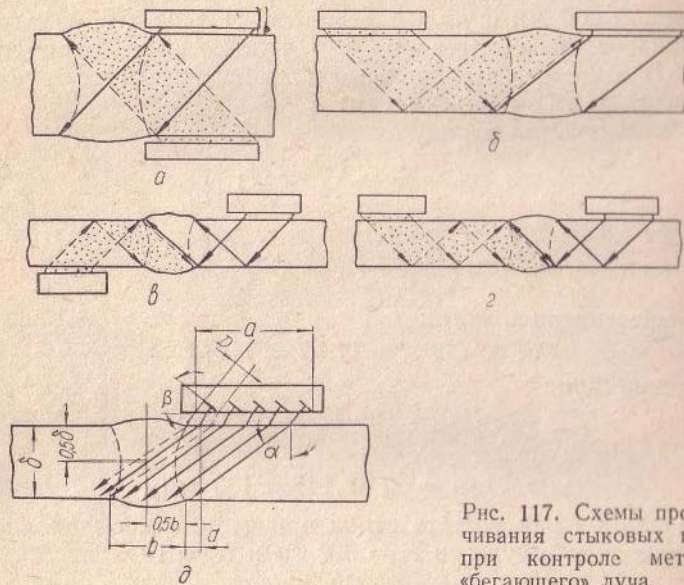


Рис. 117. Схемы прозвучивания стыковых швов при контроле методом «бегающего» луча.

При контроле через слой воды оказывается возможным существенно сократить расстояние  $d$  от валика «усиления» до точки ввода луча (рис. 117, д), которое при непосредственном контакте определяется расстоянием точки ввода луча от передней грани щупа. Расстояние  $d$  при контроле через слой жидкости зависит от ширины ультразвукового луча и приблизительно равно

$$d \approx \frac{0,5D}{\cos \beta},$$

где  $D$  — диаметр пьезоэлектрической пластины;  
 $\beta$  — угол призмы щупа.

Ширина  $a$  щупа связана с углом ввода луча и толщиной металла выражением

$$a = \delta \operatorname{tg} \alpha + \frac{0,5D}{\cos \beta},$$

а количество рядов в щупе — выражением

$$n_k = \frac{a \cos \beta}{D}$$

или

$$n_k = \frac{\delta}{D} \operatorname{tg} \alpha \cos \beta + 0,5.$$

## 2. ПРОЗВУЧИВАНИЕ УГЛОВЫХ ШВОВ

Для прозвучивания углового шва при толщине примыкаемого листа 10—20 мм может быть применен щуп с двумя рядами пластин. Первый ряд пластин излучает колебания в металл под углом  $\alpha_1$  и предназначается для выявления дефектов в части шва, прилегающей к поверхности валика. Второй ряд, излучающий колебания под углом  $\alpha_2$ , предназначается для выявления дефектов в корне шва.

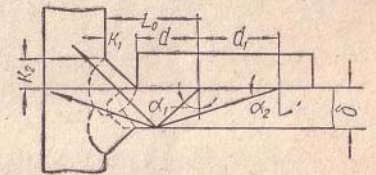


Рис. 118. Схема прозвучивания углового шва при контроле методом «бегающего» луча.

Углы ввода луча  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  могут быть определены путем решения следующих уравнений, вытекающих из рис. 118:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{K_1}{K_2} \approx 1; \quad (63)$$

$$L_0 = (2\delta + 0,5K_2) \operatorname{tg} \alpha_1 = 2\delta + 0,5K_2; \quad (64)$$

$$1,5\delta \operatorname{tg} \alpha_2 = L_0 + d_1. \quad (65)$$

Из уравнений (64) и (65) следует, что

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \left( 1,33 + \frac{0,5K_2 + d_1}{1,5\delta} \right). \quad (66)$$

По конструктивным соображениям расстояние  $d_1$  между пластинами трудно сделать менее 25 мм. При расстоя-



нии  $d_1 = 25$  мм и толщине стенки  $\delta = 10 \div 20$  мм величина угла ввода луча  $\alpha_2$ , рассчитанного по формуле (66), лежит в пределах от  $67$  до  $73^\circ$ .

Очевидно, что с практически достаточной точностью можно применить для прозвучивания угловых швов при толщине стенки  $\delta = 10 \div 20$  мм один щуп с двумя рядами пластин, излучающих в сталь колебания под углами  $\alpha_1 = 45^\circ$  и  $\alpha_2 = 70^\circ$ .

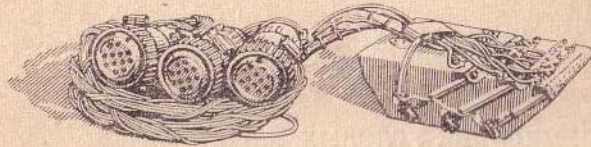


Рис. 119. Экспериментальный щуп для контроля сварных соединений методом «бегающего» луча.

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. При этом длительность  $t_c$  селектирующего импульса и время  $T$  его задержки по отношению к зондирующему должны быть соответственно равны:

$$t_c \approx 0,87 (0,5\delta + K_2);$$

$$T \approx 1,7\delta,$$

где  $\delta$  — толщина стенки.

### 3. АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ШВОВ

Первая экспериментальная установка для контроля швов методом «бегающего» луча была сконструирована в 1956 г. в НИИМостов. Установка состоит из:

- 1) щупа;
- 2) блока построчного прозвучивания;
- 3) ультразвукового дефектоскопа типа НИИМ-2;
- 4) индикаторного блока (устройство наблюдения);
- 5) блока питания (выпрямитель);
- 6) малогабаритного фотоаппарата типа «Зоркий» (устройство регистрации).

Щуп (рис. 119) выполнен в виде призмы из органического стекла, в которой установлены три ряда пьезоэлек-

трических пластин из титаната бария по 7 шт. в каждом ряду. Все пластины электрически изолированы друг от друга и могут излучать ультразвук в металл под одним и тем же углом; при исследованиях использовались щупы с углами ввода луча  $45$  и  $70^\circ$ .

Блок построчного 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 ультразвукового луча в шве. При этом на экране трубки воспроизводится развертка типа *C*. Длина строк соответствует длине щупа, а высота кадра — ширине щупа.

Яркость луча может меняться изменением 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 в щупе, обнаружившей дефект.

Таким образом, размеры кадра на экране соответствуют размерам контролируемого участка, а темные места на кадре — местам обнаружения дефектов.

Для получения более качественного изображения каждого ряду пьезоэлектрических пластин соответствует 13 строк в кадре, для чего в блоке синхронизации применяется червячная передача от механизма строчной развертки к механизму кадровой 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. 120, 121 приведены ультразвукограммы плиты и сварного соединения, полученные при контроле методом «бегающего» луча.



В 1962 г. в НИИмостов сконструирована ультразвуковая установка УЗУ-1Б для контроля швов методом «бегающего» луча (рис. 122).

Усилитель высокой частоты, генератор, селектирующая система собраны по схемам, рассмотренным в гл. III. Модуляция яркости развертки производится напряжением, снимаемым с выхода пикового детектора, включенного в цепь управляющей сетки трубки.

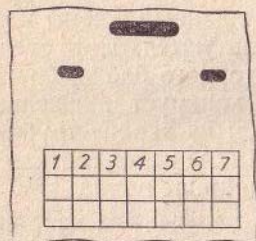


Рис. 120. Схема контроля (а) и ультразвукограмма (б) стальной плиты толщиной 40 мм с искусственными дефектами в виде пазов глубиной и шириной 4 мм.

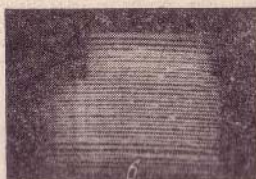
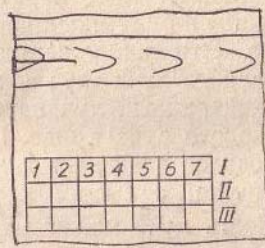


Рис. 121. Схема контроля (а) и ультразвукограмма (б) стыкового сварного шва с частичным непроваром; толщина металла 20 мм.

На вход пикового детектора подаются предварительно нормализованные по амплитуде и длительности видеосигналы, возникающие на выходе каскада совпадений только при обнаружении дефектов.

Щуп со 119 пьезоэлектрическими элементами подключается к прибору восьмизажильным кабелем. В процессе работы щуп присасывается к металлу с помощью электромагнитов. Акустический контакт создается заполнением водой пространства между щупом и металлом. Контроль за качеством акустического контакта осуществляется с

помощью электродов, размещенных в щупе и блокирующих при отсутствии воды возможность включения установки.

Установка позволяет вести контроль стыковых швов толщиной до 60 мм и угловых швов в соединениях длиной 250 мм и более. Время контроля участка шва длиной 250 мм составляет 20 сек (без учета времени подготовительных работ).

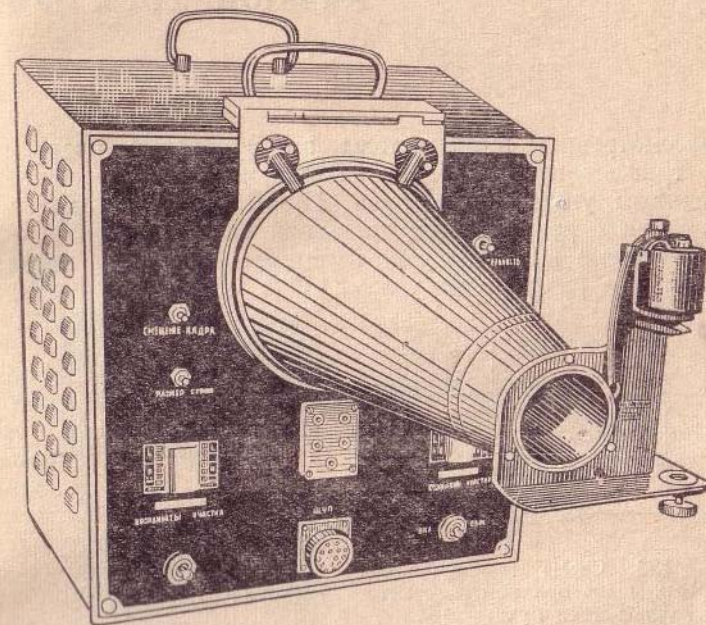


Рис. 122. Экспериментальная ультразвуковая установка УЗУ-1Б (НИИМ) для контроля швов методом «бегающего» луча.

Включение установки производится нажатием кнопки, расположенной на щупе. При этом включается реле, подающее напряжение на автоспуск 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.



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ШВОВ МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕГОСЯ ЛУЧА

Рассмотренные выше методы прозвучивания предусматривают использование искательных систем с фиксированным углом ввода луча. Применение этих методов контроля ограничивается толщиной сварных соединений.

Стыковые швы большой толщины необходимо прозвучивать под различными углами. При этом ручной процесс контроля сводится к последовательному прозвучиванию контролируемого объекта с помощью щупов, имеющих различные углы ввода луча, что усложняет процесс дефектоскопии. Естественно, что прозвучивание швов при автоматическом контроле с помощью щупов с различными углами ввода луча значительно усложнило бы процесс

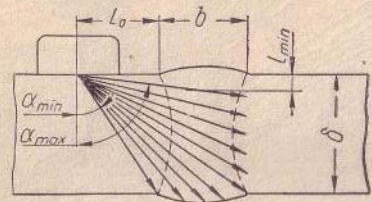


Рис. 123. Схема прозвучивания сварных швов при контроле методом качающегося луча.

контроля и снизило его надежность.

Более рациональным является метод контроля ряда изделий, в частности стыковых сварных швов большой толщины, с помощью щупа (рис. 123), излучающего ультразвуковой луч под непрерывно и автоматически меняющимся углом (метод качающегося луча). Сущность применения этого метода для автоматического контроля швов заключается в следующем. Щуп, излучающий качающийся ультразвуковой луч, перемещается вдоль шва. Качание луча и перемещение щупа осуществляется специальным механизмом таким образом, что обеспечивается полное прозвучивание всего контролируемого объема шва (рис. 124).

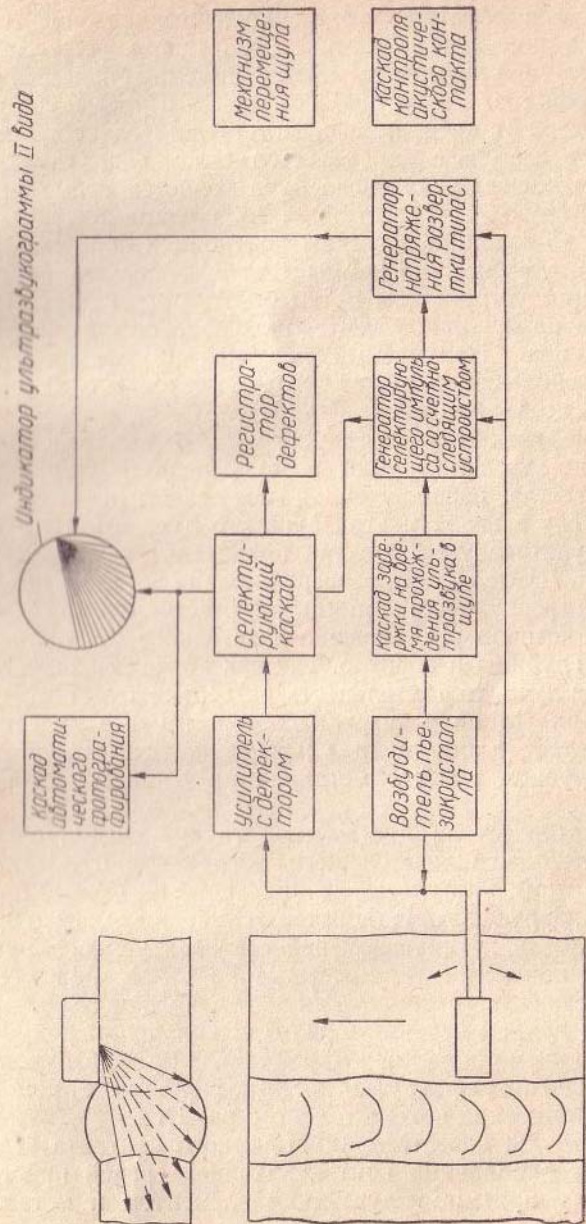


Рис. 124. Функциональная схема установки для автоматического контроля качества швов методом качающегося луча.



Регистрирующее устройство, копирующее движение щупа 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 состояния на бумажной ленте, находящейся в покое относительно шва. 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  $\alpha$  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 (ультраузвукограммы II вида) экран трубки фотографируется с помощью автомата, описание которого дано в гл. IX.

Контроль за качеством акустического контакта ведется по уровню заполнения контактирующей средой пространства между приемно-излучающим элементом и металлом.

При отсутствии необходимого количества контактирующей среды останавливается механизм перемещения щупа и подается аварийный сигнал.

## 1. ИСКАТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕГОСЯ ЛУЧА

Для контроля сварных соединений методом качающегося луча должны быть применены специальные искательные головки (щупы), 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 щупа и время пробега ультразвукового импульса в щупе.

Поставленным требованиям удовлетворяет щуп с непрерывно и автоматически меняющимся углом ввода луча, схема которого приведена на рис. 13, д [25].

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. Величина угла  $\alpha_{\min}$  зависит только от соотношения скоростей распространения поперечной и продольной волн в контролируемом металле и может быть вычислена по формуле

$$\alpha_{\min} = \arcsin \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{пр}}},$$

где  $C_{\text{п}}$  и  $C_{\text{пр}}$  — скорости распространения соответственно поперечной и продольной ультразвуковых волн в контролируемом металле.

При контроле изделий из стали  $\alpha_{\min} \approx 34^\circ$ .

## 2. СПЕЦИФИКА РАБОТЫ ПРИЕМНО-СИГНАЛИЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЕФЕКТОСКОПА

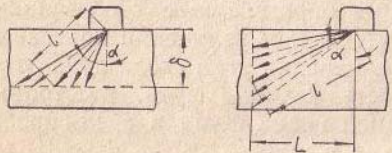
В функции приемно-сигнализирующего устройства входят усиление сигналов, поступающих на щуп, и выделение с помощью временного селектора эхо-сигналов от дефектов. В данном дефектоскопе временная селекция поступающих на вход усилителя сигналов применена для того, чтобы на индикаторы не проникали зондирующий 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 щуп, до заданной глубины контроля  $\delta$  (или до заданного расстояния от центра излучения щупа  $L$ ) и обратно.

Рис. 125. Схема контроля щупом, излучающим качающийся луч.

При этом (рис. 125):

$$t_c = \frac{2l}{C_n} = \frac{2\delta}{C_n} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = K \delta \sec \alpha$$

или

$$t_c = \frac{2l}{C_n} = \frac{2L}{C_n} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} = KL \operatorname{cosec} \alpha,$$

где  $C_n$  — скорость распространения поперечной ультразвуковой волны в контролируемом металле;

$K$  — коэффициент, равный  $\frac{2}{C_n}$ ; для стали  $K \approx 0,61 \text{ мксек/мм}$ .

Ввиду того что угол  $\alpha$  ввода луча непрерывно и автоматически изменяется в определенных пределах, 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  $\delta$  или протяженностью  $L$  контролируемого участка [26].

Выполнение пункта «а» обеспечивается применением каскада задержки начального импульса со временем задержки  $t_{щ}$ , равным времени прохождения импульса в щупе:

$$t_{щ} = \frac{2l_{щ}}{C_{щ}},$$

где  $l_{щ}$  — путь импульса в щупе;

$C_{щ}$  — скорость распространения продольной волны в материале щупа.

Каскад задержки может быть выполнен в виде линии задержки, мультивибратора, фантастрона и т. п.

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  $\alpha$  ввода луча. Генератор селективирующего импульса может быть собран по схеме любого ждущего генератора прямоугольных импульсов с плавной регулировкой длительности.

Счетно-следящее устройство в генераторе связывает угол  $\alpha$  ввода луча с длительностью  $t_c$  селективирующего импульса через промежуточный параметр (напряжение, емкость, сопротивление), определяющий длительность генерируемого импульса, и выполняет функции:

1) постоянного наблюдения за изменением угла ввода луча  $\alpha$  и непрерывной подачи значения угла  $\alpha$  в решающее устройство;

2) постоянного решения функции  $K\delta \sec \alpha$  или  $KL \times \operatorname{cosec} \alpha$  для заданных значений  $C_n$ ,  $\delta$ ,  $L$ ,  $\Delta \alpha$  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  $\delta$  или протяженности  $L$ ).

### 3. ПРОЗВУЧИВАНИЕ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

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 качающееся (маятниковое) движение.

Минимальное расстояние  $L_0$  от щупа до шва определяет- ся минимальным углом ввода луча (см. рис. 123):

$$L_0 = \delta \operatorname{tg} \alpha_{\min},$$

где  $\delta$  — 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 щупа от валика «усиления».

Принимая для стали  $\alpha_{\min} = 34^\circ$ , получаем

$$L_0 \approx 0,675\delta;$$

$$l_{\min} \approx (0,675\delta + 0,5b) \operatorname{ctg} \alpha_{\max}.$$

#### 4. СКОРОСТЬ КОНТРОЛЯ

Скорость контроля определяется скоростью перемещения искательной системы вдоль шва. Продольное перемещение искательной системы сопровождается маятниковым движением щупа.

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

т. е.

$$\frac{1}{2n} N_c = \frac{D_s}{v_k},$$

$$v_k \leq \frac{2D_s n}{N_c},$$

где  $v_k$  — скорость контроля, мм/мин;  
 $D_s$  — эффективный диаметр ультразвукового луча, мм;  
 $n$  — скорость вращения кулачка, об/мин;  
 $\frac{N_c}{2n}$  — время, необходимое для  $N_c$  качаний луча;  
 $\frac{D_s}{v_k}$  — время прохождения искательной системой расстояния  $D_s$  вдоль шва.

Следует отметить, что максимальная скорость качания, т. е. скорость вращения кулачка  $n$ , обуславливается частотой  $F$  следования ультразвуковых импульсов и тем ко-

личеством  $N$  импульсов, которыми предполагается озвучить каждую точку сечения шва при каждом качании луча.

Максимальная скорость вращения кулачка определяется уравнением

$$n \leq 57 \frac{D_s F}{Nl}.$$

Так, например, если  $D_s = 5$  мм,  $F = 300$  гц,  $N = N_c = 10$ ,  $l = 100$  мм, то  $n \leq 85,5$  об/мин и  $v_k \leq 10$  м/ч.

#### 5. ГЕНЕРАТОР СЕЛЕКТИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ СО СЧЕТНО-СЛЕДЯЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Назначение генератора селективирующих импульсов — выработать импульс прямоугольной формы.

Длительность генерируемого импульса должна изменяться по определенному закону при изменении угла ввода луча. Так, при прозвучивании стальных изделий на глубину  $\delta$  длительность импульса  $t_c$  должна изменяться при изменении угла ввода луча  $\alpha$  по закону

$$t_c = 0,61\delta \sec \alpha. \quad (67)$$

Естественно, что при прозвучивании изделий различной толщины  $\delta$  длительность импульса  $t_c$  будет изменяться с изменением угла ввода луча  $\alpha$  в различных пределах (рис. 126). Для постоянного изменения длительности селективирующего импульса по закону, описываемому формулой (67), в генераторе следует предусмотреть счетно-сле-

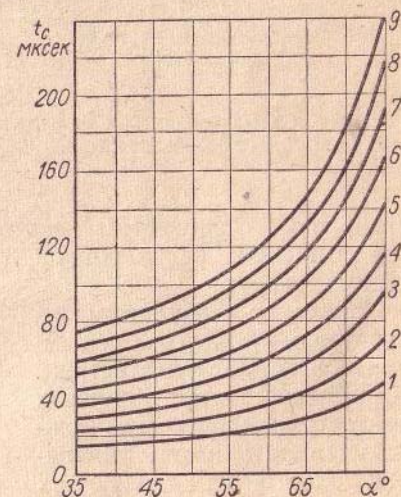


Рис. 126. Зависимость длительности  $t_c$  селективирующего импульса от угла ввода луча  $\alpha$  при различных глубинах контроля:  
 1—9 — глубина контроля соответственно равна 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100 мм.

дующее устройство. Счетно-следающее устройство может связывать длительность  $t_c$  импульса с углом ввода луча  $\alpha$  через промежуточный параметр (напряжение, емкость, сопротив-



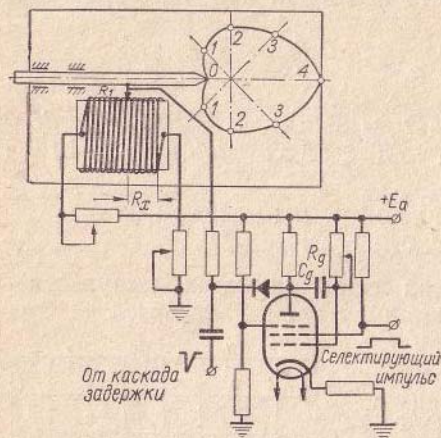
ление), определяющий длительность генерируемого импульса. Если упомянутый параметр линейно связан с длительностью генерируемого импульса, то величина  $A$  этого параметра должна изменяться по закону

$$A = 0,61 \sec \alpha. \quad (68)$$

Естественно, что в генераторе необходимо иметь ручку регулировки пределов изменения длительности селективирующего импульса в зависимости от глубины участка, выбранного для контроля.

Генератор селективирующих импульсов может быть собран по

Рис. 127. Схема генератора селективирующих импульсов со счетно-следящим устройством.



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 одного из следующих параметров (рис. 127):

- а) напряжения на аноде фантастрона, определяемого положением движка потенциометра  $R_1$ , т. е. величиной сопротивления  $R_x$ ;
- б) емкости  $C_g$ ;
- в) сопротивления  $R_g$ .

Длительность генерируемого фантастроном импульса линейно связана с величинами  $R_x$ ,  $C_g$  и  $R_g$ .

Изменение длительности импульса пропорционально значению  $\sec \alpha$  может быть осуществлено путем изменения параметра  $R_x$  по закону

$$R_x = K \cdot 0,61 \sec \alpha, \quad (69)$$

что легко выполнить с помощью кулачкового механизма, изображенного на рис. 127. Профиль кулачка выполняется таким, чтобы расстояние  $x$ , а следовательно, и сопротивление  $R_x$  изменялось по закону, описываемому уравнением (69).

Регулировка пределов изменения длительности селективирующего импульса в зависимости от толщины  $\delta$  контролируемого слоя может осуществляться с помощью потенциометра  $R_g$  или емкости  $C_g$ . На рис. 128 приведены в виде графика результаты измерений длительности селективирующего импульса, генерируемого по схеме, изображенной на рис. 127, при настройке генератора на глубину контроля  $\delta = 50$  мм, в зависимости от угла ввода луча.

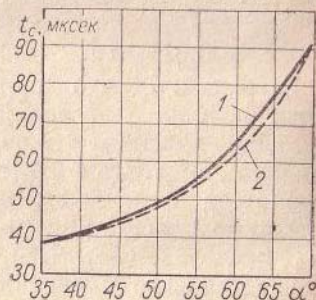


Рис. 128. Зависимость длительности  $t_c$  селективирующего импульса, генерируемого фантастроном от угла ввода луча  $\alpha$ :

1 — по данным эксперимента; 2 — по данным теоретического расчета.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Анникеев А. Ф., Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов тонкостенных труб, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
2. Бабкин Н. В., Конструкция искательных головок к ультразвуковым дефектоскопам, Применение ультразвука в промышленности, М., МДНТП, 1959.
3. Балазовский М. Я., Ультразвуковая дефектоскопия, М., Машгиз, 1959.
4. Бидуля В. И., Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений, «Технология машиностроения», Сб., М., ЦНИИТМАШ, 1961, № 6.
5. Богословский Ю. В., Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-7Н, М., «Советское радио», 1957.
6. Бондин Н. И., Контроль качества сварных соединений, Л., Судпромгиз, 1962.
7. Босько В. А., Ультразвуковая дефектоскопия стыковых сварных швов толщиной 6—15 мм, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
8. Глухоедова В. Н. и др., Неразрушающие методы контроля ответственных узлов электровозов, М., ЦИТЭИН, 1961.
9. Голубев А. С., Отражающие свойства эталонных дефектов различной формы, М., ЦИТЭИН, 1961.
10. Голубев А. С., Меркулов Л. Г. и Щукин В. А., К вопросу о достижении наивысшей чувствительности при эхо-методе ультразвуковой дефектоскопии, «Заводская лаборатория», 1962, № 2.
11. Гольдрин А. А., Интерференционные искажения результатов ультразвуковой дефектоскопии, Производственно-технический бюллетень № 7, М., МДТ, 1960.
12. Гофман Ю. М., Опыт контроля качества сварки труб ультразвуком, «Сварочное производство», 1959, № 9.
13. Грейль Е. А., Оценка качества электроконтактной сварки рельсов по результатам осмотра поверхности излома, М., Трансжелдориздат, 1958.
14. Губанова М. Р., Пушкин В. П., Ультразвуковой контроль аустенитных сварных стыков паропроводов, М., ЦИТЭИН, 1957.
15. Гурвич А. К., Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений, Л., ЛДНТП, 1955.
16. Гурвич А. К., Контроль качества угловых швов ультразвуком, «Автоматическая сварка», 1956, № 5.
17. Гурвич А. К., Перлис И. Л., Экспериментальное исследование дефектоскопии сварных угловых швов, М., Трансжелдориздат, 1956.
18. Гурвич А. К., Исследования по ультразвуковому контролю качества стыковых сварных соединений из алюминиевого сплава АМг-6, «Автоматическая сварка», 1962, № 4.
19. Гурвич А. К., Фадеев С. И., Контроль качества контактной сварки рельсов без их разрушения, «Бюллетень организации содружества железных дорог», Варшава, 1962, № 2.
20. Гурвич А. К., Аппаратура для ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений, «Заводская лаборатория», 1959, № 7.
21. Гурвич А. К., Глубиномер — приставка к импульсным ультразвуковым дефектоскопам, Л., ЛДНТП, 1956.
22. Гурвич А. К., Портативный ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-3, М., Трансжелдориздат, 1957.
23. 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.
24. Гурвич А. К., Возможные методы автоматического контроля качества сварных швов методом ультразвуковой дефектоскопии, М., МДНТП, 1957.
25. Гурвич А. К., Кукли А. С., Щуп для ультразвукового дефектоскопа, Авторское свидетельство № 107280, 1956.
26. Гурвич А. К., Импульсный ультразвуковой дефектоскоп, Авторское свидетельство № 106990, 1956.
27. Дианов Д. Б., К вопросу о переходе ультразвуковых волн через границу раздела двух твердых сред, Труды семинара, Л., ЛЭТИ, 1958.
28. Елин Р. М., Ханонин А. А. и Харин Г. Г., Ультразвуковой контроль сварных швов по двухщуповой параллельной схеме, «Заводская лаборатория», 1962, № 4.
29. Ермолов И. Н., Выбор оптимальной частоты ультразвука для контроля массивных сварных соединений, «Заводская лаборатория», 1960, № 4.
30. Ермолов И. Н., Контроль качества массивных сварных соединений различных типов ультразвуковым методом, Методы контроля качества сварных швов и конструкций, Кн. 50, Л., НТОМашпром, 1958.
31. Ермолов И. Н., Чувствительность контроля и точность измерения координат дефектов при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений большой толщины, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
32. Ермолов И. Н., Эталонирование чувствительности при ультразвуковом контроле сварных соединений, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
33. Жуков О. Н., Комплексный контроль качества сварных соединений толстостенных резервуаров, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
34. Иванов В. Е., Ультразвуковой дефектоскоп-структурометр УЗДС-18, М., ЦИТЭИН, 1961.
35. Иванов В. Е., Меркулов Л. Г. и Яковлев Л. А., Исследование демпфированного преобразователя ультразвукового дефектоскопа, «Заводская лаборатория», 1962, № 12.
36. Кузьмина Л. И., Ультразвуковой контроль стыков электроконтактной сварки рельсов, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
37. Кузнецов Л. Г., «Заводская лаборатория», 1954, № 2.
38. Кукли А. С., Координатная линейка, Л., ЛДНТП, 1957.



39. Кукли А. С., Общие положения и рекомендации по методике прозвучивания стыковых и угловых швов, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений». Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
40. Лопатко И. Ф., Дианов С. В., Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов аустенитной стали, Л., ЛДНТП, 1957.
41. Лысенко М. Д., Пихтовникова Л. Р., Методика определения ультразвуком характера дефектов в сварных соединениях труб и литых деталей паропроводов, «Заводская лаборатория», 1959, № 7.
42. Машарский Б. Н., Оценка характера дефектов, выявленных ультразвуковым дефектоскопом, Труды семинара, Л., ЛЭТИ, 1958.
43. Меркулов Л. Г., Исследование рассеяния ультразвука в металлах, ЖТФ, 1956, стр. 26.
44. Назаров С. Т., Методы контроля качества сварных соединений, М., Машгиз, 1961.
45. Назаров С. Т., Панов Ю. Н., Методика ультразвукового контроля сварных швов, «Заводская лаборатория», 1957, № 3.
46. Огрызков Р. С., Ультразвуковой контроль сварных соединений на электрозаклепках, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
47. Петров Б. М., Сафонов А. И. и Заславский Ф. Я., Ультразвуковой контроль качества сварных швов корпусных конструкций, «Заводская лаборатория», 1960, № 11.
48. Райхман А. З., Контроль термообработки сварных стыков паропроводов ультразвуковым методом, «Заводская лаборатория», 1962, № 8.
49. Райхман А. З., Исследование методов определения размеров дефектов при ультразвуковом контроле сварных соединений, «Ультразвуковая дефектоскопия и сочетание ее с методами просвечивания при контроле качества сварных соединений», Сб. докладов, М., ГОСИНТИ, 1963.
50. Розенберг Л. Д., Звуковые фокусирующие системы, М.—Л., Гостехиздат, 1949.
51. Соколов В. С., Дефектоскопия металлов, М., Госэнергоиздат, 1957.
52. Соколова Е. С., Турубаров В. И., Новые малогабаритные ультразвуковые дефектоскопы УЗД-16 и УЗД-17, М., ЦИТЭИН, 1961.
53. Таран Ю. М., Ультразвуковая установка для непрерывного контроля качества швов сварных конструкций, «Автоматическая сварка», 1959, № 9.
54. Ультразвуковая аппаратура «Аутосоникс», «Машиностроение», 1958, № 3.
55. Химченко Н. В., Влияние некоторых факторов на чувствительность ультразвукового контроля сварных швов, выполненных электрошлаковым способом, Методы контроля сварных швов и конструкций, Кн. 50, Л., НТОМашпром, 1958.
56. Химченко Н. В., Есилевский В. П., Цечаль В. А., Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов, выполненных электрошлаковым способом, Новые методы контроля и дефектоскопии, К., Гостехиздат УССР, 1958.
57. Цечаль В. А., Ультразвуковой контроль швов на стали 34ХМ, выполненных электрошлаковой сваркой, «Автоматическая сварка», 1962, № 8.
58. Цечаль В. А., Ультразвуковой контроль сварных швов пылеуловителей, Информационное письмо 6/220, К., Ин-т электро-сварки им. Е. О. Патона, 1961.
59. Цечаль В. А., Макара А. М. и Жовницкий И. П., Определение характера развития холодных трещин в сварных соединениях с применением ультразвуковой дефектоскопии, «Автоматическая сварка», 1961, № 5.
60. Цечаль В. А., Ультразвуковой контроль качества электрошлаковой сварки, «Машиностроение», 1960, № 5.
61. Шантер Ю. А., Ткалич Н. Б., Ультразвуковой контроль сварных швов, «Заводская лаборатория», 1959, № 7.
62. Шрайбер Д. С., Дефектоскопия металлов, М., Оборонгиз, 1959.
63. Шрайбер Д. С., Современное состояние и проблемы в области развития средств дефектоскопии, «Приборостроение и измерительная техника», М., 1960.
64. Штейн Ф. С., Орлова Л. М., Контроль угловых и тавровых сварных швов ультразвуком, «Вестник совнархоза», Воронеж, 1958, № 10—11.
65. Яблоник Л. М., Применение ультразвуковой дефектоскопии для контроля изделий из серого чугуна по необработанной поверхности, Л., ЛДНТП, 1960.
66. Bobbin John E., Ultrasonic weld inspection at work, «Welding Journal», 1960, № 1.
67. Brioni Angelo, Progressi e nuovi metodi nel campo dei controlli di saldature con ultrasuoni, «Rivista italiana della saldatura», 1961, № 5.
68. Emploi des blocs d'etalonnage destines an controle des appareils d'examen par les ultrasons, «Soudage et techniques connexes», 1959, № 3—4.
69. Gibson Glenn J., Nondistructive Testing is key to Future of Welding, «Welding Journal», 1961, № 3.
70. Hornung R., Ultrasonic weld testing made easier, «Engineering», 1959, Vol. 188.
71. Hornung R., Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen, «Technick Rundschau Sulzer», 1959, № 1.
72. Krantkramer Dr. J., Ultrasonic Weld Testing in Europe, and the Attitude of Technical Control Authorities, «Nondistructive testing», 1962, № 5.
73. Ludvik S., Overovani ultrazvukovych indikaci ajejich dokumentace, «Zvaranie», 1961, № 5.
74. Papke W. H., Schweißnahtprüfung mit ultrashall, «Schweissen und Schneiden», 1961, № 10.
75. Sterke A., Ultrasoon onderzoekin de ketelbouw, «Lastechnick», 1961, № 7L.
76. Tiljander J., Försök att bestämma inträngningen i källsvetsar med ultraljud, «Svetsen», 1959, № 3.
77. Trommler H., Sonovisor 2., «Feingerätetechnik», 1961, № 4.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
<i>Глава I. Общие сведения об ультразвуковых волнах</i>	
1. Типы ультразвуковых волн и скорость их распространения . . .	5
2. Интенсивность ультразвука и затухание его в металлах . . .	8
3. Распространение ультразвука . . . . .	11
4. Возбуждение и регистрация ультразвуковых колебаний в металлах . . . . .	17
<i>Глава II. Общие положения ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений</i>	
1. Методы ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений . . .	20
2. Искательные головки для контроля качества сварных соединений . . . . .	23
3. Определение координат отражающей поверхности (дефекта) при контроле сварных соединений . . . . .	31
4. Способы прозвучивания сварных соединений . . . . .	41
5. Прозвучивание металла шва . . . . .	44
6. Выявляемость дефектов и определение их размеров и характера . . . . .	47
7. Оценка качества сварного соединения по результатам ультразвукового контроля . . . . .	53
8. Сочетание метода ультразвуковой дефектоскопии с методами просвечивания при контроле сварных соединений . . . . .	55
9. Достоверность и организация ультразвукового контроля . . . . .	57
<i>Глава III. Ультразвуковая аппаратура для контроля качества сварных соединений</i>	
1. Технические характеристики ультразвуковых дефектоскопов для контроля качества сварки . . . . .	61
2. Функциональная схема ультразвуковых дефектоскопов . . . . .	69
3. Основные узлы ультразвуковых дефектоскопов . . . . .	72
4. Ультразвуковые дефектоскопы . . . . .	95
5. Вспомогательные приспособления для контроля сварных соединений . . . . .	103
6. Стандартизация метода ультразвуковой дефектоскопии. . . . .	105

## Глава IV. Ультразвуковая дефектоскопия стыковых сварных соединений

1. Контроль стыковых сварных швов пролетных строений . . . . .	121
2. Контроль стыковых соединений в паропроводах и котлах . . . . .	125
3. Контроль стыковых соединений большой толщины . . . . .	126
4. Контроль стыковых сварных соединений из алюминиевых сплавов . . . . .	128
5. Специфика ультразвуковой дефектоскопии стыковых швов листов малой толщины . . . . .	130

## Глава V. Ультразвуковая дефектоскопия угловых сварных швов

1. Контроль угловых швов соединений со сквозным проплавлением . . . . .	135
2. Контроль угловых швов с несквозным проплавлением примыкаемого листа . . . . .	138
3. Контроль швов соединений внахлестку . . . . .	140

## Глава VI. Ультразвуковая дефектоскопия швов контактной сварки

1. Контроль сварных стыков рельсов . . . . .	144
2. Контроль сварных стыков режущего инструмента . . . . .	148
3. Контроль сварных точек и сварных заклепок . . . . .	149

## Глава VII. Методы автоматического контроля качества сварных соединений с помощью ультразвука

1. Функциональная схема процесса импульсной ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений . . . . .	153
2. Методы прозвучивания швов . . . . .	157
3. Система регистрации результатов автоматического ультразвукового контроля швов . . . . .	158
4. Техника ввода ультразвуковых колебаний и контроль за акустическим контактом . . . . .	160
5. Дешифратор качества сварного соединения . . . . .	167
6. Особенности временной селекции эхо-сигналов при автоматическом ультразвуковом контроле . . . . .	171
7. Скорость сканирования при автоматическом ультразвуковом контроле . . . . .	173

## Глава VIII. Автоматический ультразвуковой контроль сварных швов методами продольного и поперечного перемещения щупа

1. Аппаратура для контроля швов методом продольного перемещения щупа . . . . .	179
2. Установка УРДА-1 (НИИМ) для контроля качества рельсов на рельсосварочных предприятиях . . . . .	182

## Глава IX. Автоматический ультразвуковой контроль сварных швов методом продольно-поперечного перемещения щупа

1. Разрешающая способность и искажения в изображениях дефектов на ультразвукограмме I вида . . . . .	186
2. Разрешающая способность и искажения в изображениях дефектов на ультразвукограмме II вида . . . . .	187



=  
  
  
0  
П  
1.  
2.  
3.  
4.  
  
Г  
  
1.  
2.  
  
3.  
4.  
5.  
6.  
7.  
8.  
9.  
  
1.  
2.  
3.  
4.  
5.  
6.  
22

3. Получение фотографий изображения сечения шва . . . . . 193  
4. Прозвучивание стыковых швов . . . . . 194  
5. Скорость контроля . . . . . 196

*Глава X. Автоматический ультразвуковой контроль швов методом «бегающего» луча*

1. Прозвучивание стыковых швов . . . . . 206  
2. Прозвучивание угловых швов . . . . . 207  
3. Аппаратура для контроля качества швов . . . . . 208

*Глава XI. Автоматический ультразвуковой контроль швов методом качающегося луча*

1. Искательная головка для контроля сварных соединений методом качающегося луча . . . . . 215  
2. Специфика работы приемно-сигнализирующего устройства дефектоскопа . . . . . 215  
3. Прозвучивание стыковых сварных соединений . . . . . 217  
4. Скорость контроля . . . . . 218  
5. Генератор селективирующих импульсов со счетно-следящим устройством . . . . . 219  
Литература . . . . . 222

*Анатолий Константинович Гурвич*  
(инженер)

**Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений**

Редактор издательства *А. М. Новик*

Художник *Габович С. М.* Художественный редактор *Б. В. Валуенко*  
Технический редактор *В. Н. Березовый* Корректор *Е. И. Коваль*

Сдано к набору 24.IV 1963 г. Подписано к печати 21.VIII. 1963 г.  
Формат бумаги 84×108/32. Объем: 7<sup>1</sup>/<sub>8</sub> физич. лист.; 11,68 условн.  
лист.; 12,2 учетно-изд. лист. Тираж 1800. БФ 03159.  
Цена 81 коп.

Государственное издательство технической литературы УССР  
Киев, 4, Пушкинская, 28.

Отпечатано с матриц Книжной фабрики им. Фрунзе Главполиграф-  
издата Министерства культуры УССР, Харьков, Донец-Захаржев-  
ская, 6/8, в типографии «Коммунист» Главполиграфиздата Министер-  
ства культуры УССР, Харьков, Пушкинская, 29. Зак. 0111.