

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных
процессов обработки материалов»
очной формы обучения*



Могилев 2022

УДК 620.179.7
ББК 34.474
К55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства»
«18» февраля 2022 г., протокол № 9

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Н. Сеница

Рецензент А. Е. Науменко

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине
«Контроль качества сварных соединений» предназначены для студентов специаль-
ности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов» очной формы обучения.

Учебно-методическое издание

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Практическое занятие № 1. Определение параметров режимов магнитопорошкового контроля.....	5
1.1 Чувствительность и режимы магнитопорошкового контроля	5
1.2 Задания к практическому занятию	9
2 Практическое занятие № 2. Определение параметров режимов радиографического контроля.....	11
2.1 Краткие теоретические сведения о радиографическом неразрушающем контроле.....	11
2.2 Последовательность определения параметров контроля.....	18
2.3 Рекомендации по выбору параметров режимов радиографического контроля	27
2.4 Задания к практическому занятию	27
3 Практическое занятие № 3. Определение параметров режимов акустического контроля.....	30
3.1 Краткие теоретические сведения об акустических волнах.....	30
3.2 Основные параметры контроля и стандартные образцы	36
3.3 Схемы ультразвукового контроля сварных соединений.....	39
3.4 Задания к практическому занятию	42
Список литературы	44
Приложение А. Размеры эталонов чувствительности.....	45
Приложение Б.....	46
Приложение В.	47
Приложение Г. Технические характеристики некоторых рентгеновских аппаратов и гамма-дефектоскопов	48

Введение

Повышение долговечности и надежности сварных металлоконструкций в значительной степени зависит от применяемых методов и средств технического контроля качества сварных швов. Наибольший интерес для промышленности представляют физические методы дефектоскопического контроля качества продукции без разрушения, в том числе с использованием ионизирующего излучения (ИИ), магнитных и акустических полей.

Целью практических занятий является приобретение студентами навыков по практическому применению теоретических знаний, полученных при изучении курса «Контроль качества сварных соединений».

В процессе выполнения практических занятий студенты углубляют свои знания и умения самостоятельно определять технологические режимы магнитопорошкового, радиографического и ультразвукового неразрушающего контроля.

1 Практическое занятие № 1. Определение параметров режимов магнитопорошкового контроля

1.1 Чувствительность и режимы магнитопорошкового контроля

1.1.1 Чувствительность магнитопорошкового контроля.

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля (МПК) основан на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии.

Магнитопорошковым методом контролируют объекты из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40 единиц.

В зависимости от размеров выявляемых дефектов ГОСТ 21105 устанавливает три уровня чувствительности (таблица 1.1), определяемых минимальной шириной и протяженностью условного дефекта. Под условным дефектом понимают поверхностный дефект в форме плоской щели с параллельными стенками с отношением глубины к ширине, равным 10, ориентированный перпендикулярно к контролируемой поверхности и направлению магнитного поля.

Таблица 1.1 – Условные уровни чувствительности при МПК

Условный уровень чувствительности дефекта, мкм	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	Минимальная протяженность условного дефекта, мм
А	2,0	0,5
Б	10,0	
В	25,0	

Условный уровень чувствительности **А** достигается при параметре шероховатости контролируемой поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм, уровни чувствительности **Б** и **В** – при $Ra \leq 10$ мкм.

Чувствительность МПК определяется перечисленными ниже факторами:

- магнитными характеристиками материала объекта контроля: магнитной индукцией насыщения B_s ; напряженностью поля технического насыщения H_s ; остаточной индукцией B_r ; коэрцитивной силой H_c ;

- формой и размером объекта контроля;

- толщиной немагнитного покрытия;

- формой и размером дефекта, а также его местоположением;

- ориентацией вектора намагничивающего поля по отношению к плоскости дефекта;

- свойствами дефектоскопических материалов;

- способом МПК;

- способом нанесения магнитной суспензии на объект контроля;

- освещенностью поверхности объекта контроля;

- напряженностью намагничивающего поля H ;

- шероховатостью поверхности объекта контроля.

Задача инженера-технолога состоит в том, чтобы подобрать технические

средства, дефектоскопические материалы, технологические приемы и режимы, обеспечивающие заданный уровень чувствительности контроля.

Форма и размеры объекта контроля, магнитные характеристики его материала, толщина немагнитного покрытия, тип дефекта, его ориентация в пространстве – это исходные данные для разработки технологии контроля. Остальные факторы, определяющие чувствительность МПК, – режимы контроля.

1.1.2 Способы магнитопорошкового контроля.

При магнитопорошковом методе контроля применяют способ остаточной намагниченности (СОН) и способ приложенного поля (СПП).

При контроле СОН объект контроля предварительно намагничивают, а затем, после снятия намагничивающего поля, на его поверхность наносят дефектоскопический материал. Промежуток времени между указанными выше операциями должен быть не более часа. Осмотр контролируемой поверхности проводят после стекания основной массы суспензии. Под стеканием основной массы суспензии понимают состояние, при котором дальнейшее стекание суспензии не изменяет картины отложения порошка над дефектом, в том числе при повторном включении намагничивающего устройства.

При контроле СПП намагничивание объекта контроля и нанесение суспензии выполняют одновременно. При этом индикаторные рисунки дефектов образуются в процессе намагничивания. Намагничивание прекращают после стекания с контролируемой поверхности основной массы суспензии. Осмотр контролируемой поверхности проводят после прекращения намагничивания.

СОН применяют при контроле объектов из материалов с коэрцитивной силой $H_c > 10$ А/см, с остаточной индукцией $Br \geq 0,5$ Тл. Если указанные условия выполняются, то определяют возможность достижения требуемого уровня чувствительности при контроле способом остаточной намагниченности. При этом используют номограммы, представленные на рисунке 1.1.

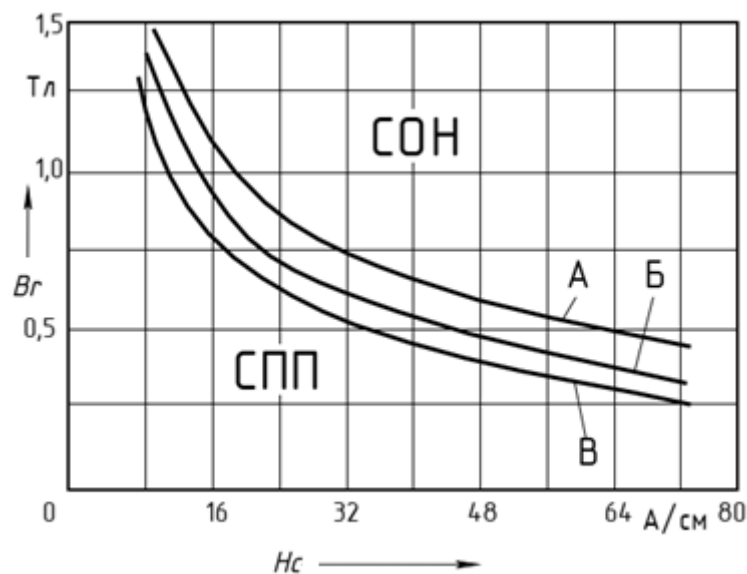


Рисунок 1.1 – Номограммы для определения возможности контроля способом остаточной намагниченности

Контроль СОН возможен, если остаточная индукция материала B_r при заданном значении коэрцитивной силы H_c равна или больше значения B_r , определенной по соответствующей кривой. При несоблюдении этого условия контроль следует проводить способом приложенного поля.

1.1.3 Значение напряженности намагничивающего поля.

Основным технологическим режимом магнитопорошкового контроля является напряженность намагничивающего поля H . Величина H зависит от магнитных характеристик объекта контроля, способа контроля, наличия (отсутствия) немагнитного покрытия.

При контроле СОН величина H равна значению напряженности технического насыщения материала объекта контроля H_s .

При контроле СПП напряженность магнитного поля определяют по коэрцитивной силе H_c материала объекта контроля при помощи номограмм, приведенных на рисунке 1.2, с учетом выбранного уровня чувствительности.

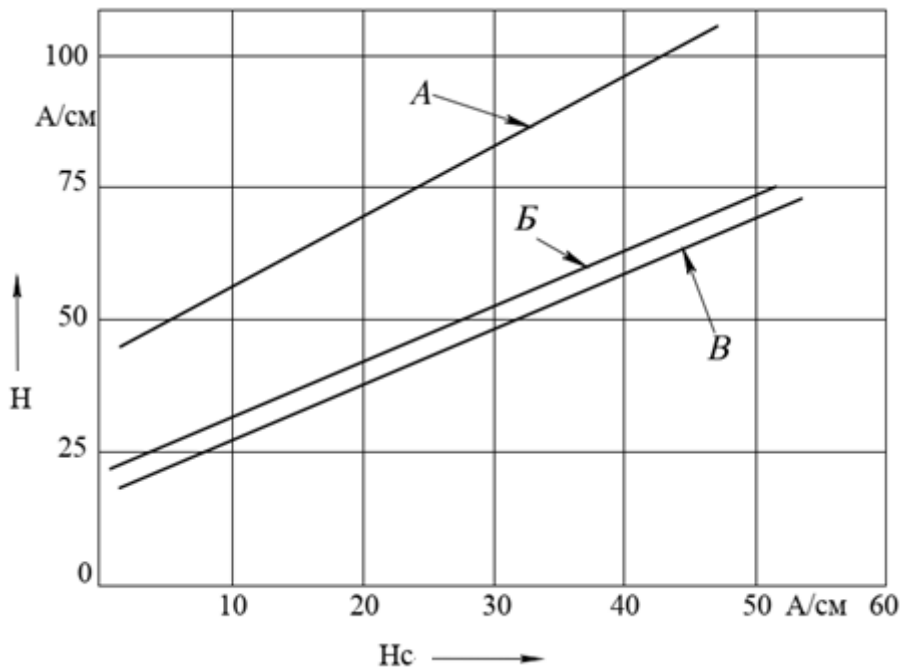


Рисунок 1.2 – Номограммы для выбора требуемого значения напряженности намагничивающего поля

При наличии на поверхности объекта контроля немагнитного покрытия толщиной более 20 мкм контроль выполняют способом приложенного поля. При этом значение напряженности намагничивающего поля H увеличивают в соответствии с данными таблицы 1.2.

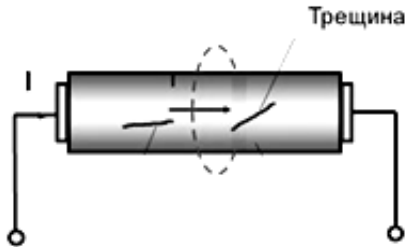
Таблица 1.2 – Значения корректировки величины напряженности намагничивающего поля в зависимости от толщины немагнитного покрытия

Толщина покрытия, мкм	25	50	75	100
Увеличение напряжённости намагничивающего поля от расчётной, %	20	50	125	200

1.1.4 Схемы намагничивания, и расчет намагничивающего тока.

Намагничивание сварного соединения обычно осуществляют по схемам, представленным на рисунке 1.3.

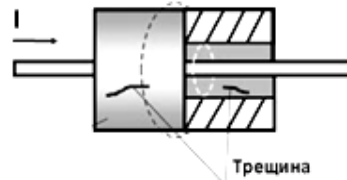
- а) Способ намагничивания пропусканием тока по всему объекту



$$I = 3dH,$$

где d – наружный диаметр объекта контроля

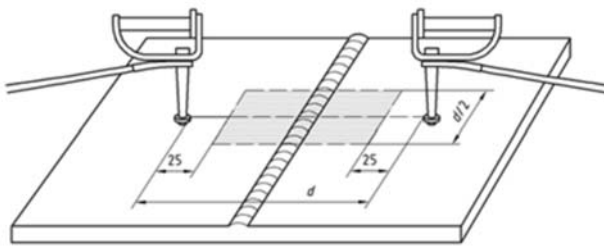
- б) Способ намагничивания пропусканием тока по проводнику, помещенному в сквозное отверстие в объекте



$$I = \pi d'H,$$

где d' – наружный или внутренний диаметр объекта контроля

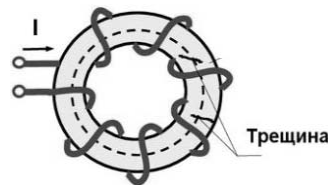
- в) Способ намагничивания пропусканием тока по части объекта



$$I = 1,5H\sqrt{l^2 + c^2},$$

где l – расстояние между токоподводами;
 c – ширина контролируемого участка

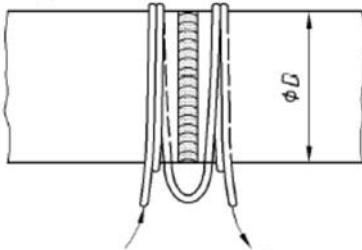
- г) Способ намагничивания пропусканием тока по тороидальной обмотке



$$I = \frac{\pi DH}{n},$$

где D – диаметр объекта контроля;
 n – число витков обмотки

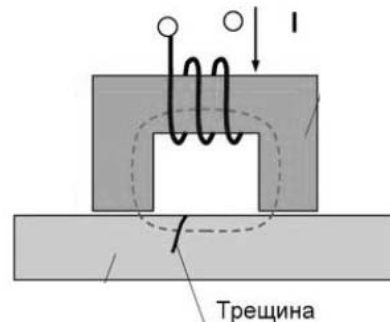
- д) Способ намагничивания при помощи соленоида



$$I = \frac{H\sqrt{L^2 + D^2}}{n}$$

где D – наружный диаметр объекта контроля; n – число витков обмотки соленоида; L – длина соленоида

- е) Способ намагничивания при помощи электромагнита или постоянного магнита



Значение силы намагничивающего тока электромагнита определяется экспериментально

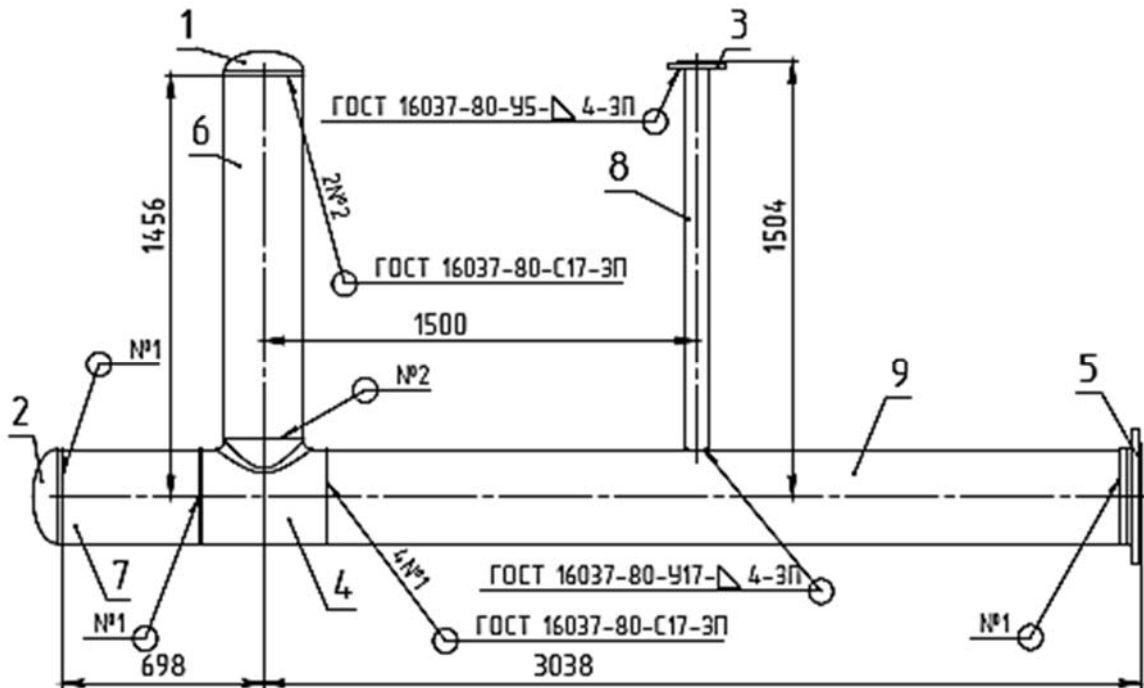
Рисунок 1.3 – Способы, схемы намагничивания и формулы для расчета силы намагничивающего тока I

Схемы, представленные на рисунке 1.3, *a–г* относят к циркулярному виду намагничивания, а схемы на рисунке 1.3, *д–е* – к продольному (полюсному) виду намагничивания.

Формула для способа намагничивания при помощи соленоида (см. рисунок 1.3, *e*) справедлива только для соленоида без ферромагнетика. Указанную формулу можно использовать только в первом приближении. Значение тока намагничивания должно быть уточнено экспериментально для конкретного объекта контроля.

1.2 Задания к практическому занятию

На практическом занятии студент должен определить режимы МПК сварных узлов с различными типами соединений, а также машиностроительных деталей. Пример такого сварного узла трубопровода представлен на рисунке 1.4.



Поз.	Наименование	Ду	Длина, мм	К-ВД
1	Заглушка 273х7 Сталь 20 ГОСТ 1739-2001	250		1
2	Заглушка 325х10 Сталь 20 ГОСТ 1739-2001	300		1
3	Фланец 80-16-01-1-В-ВСтЗсп-I ГОСТ 33259-2015	80		1
4	Тройник 325х8-273х7 Сталь 20 ГОСТ 17376-2001	300х250		1
5	Фланец 300-10-11-1-В-ВСтЗсп-I ГОСТ 33259-2015	300		1
6	Труба 273х6 ГОСТ 10704-91 ВСтЗсп	250	1254	1
7	Труба 325х7 ГОСТ 10704-91 ВСтЗсп	300	476	1
8	Труба 89х3,5 ГОСТ 10704-91 ВСтЗсп	80	1338	1
9	Труба 325х7 ГОСТ 10704-91 ВСтЗсп	300	2744	1

Рисунок 1.4 – Эскиз сварного узла

При выполнении задания должны учитываться варианты магнитных свойств материалов объектов контроля в соответствии с данными таблицы 1.3.

Таблица 1.3 – Магнитные характеристики материала объекта контроля

Но- мер вари- анта	Объект контроля	Магнитная характеристика материала		
		Остаточная индукция B_r , Тл	Коэрцитивная сила H_c , А/см	Напряженность технического насы- щения $H_{нас}$, А/см
1	Сварной узел (см. рисунок 1.4) Уровень чувствительности – В	0,9	9,6	250
2	Сварной узел (см. рисунок 1.4) Уровень чувствительности – Б	0,53	4,5	240
3	Сварной узел (см. рисунок 1.4) Уровень чувствительности – В	0,6	10,0	80

В результате выполнения практического занятия студент должен:

- выбрать способ контроля (СОН или СПП);
- выбрать дефектоскопические материалы (черный или люминесцентный магнитный порошок);
- выбрать материал жидкой основы магнитной суспензии (вода, керосин) и указать значение концентрации магнитного порошка в суспензии;
- выбрать способ нанесения магнитной суспензии на контролируемую поверхность;
- установить значение шероховатости контролируемой поверхности;
- установить значение освещенности при выполнении контроля;
- выбрать способ и схему намагничивания (схему намагничивания следует нарисовать);
- определить значение напряженности намагничивающего поля H ;
- рассчитать значение намагничивающего тока I .

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение термина «магнитопорошковый метод неразрушающего контроля».
- 2 Описать условные уровни чувствительности МПК.
- 3 Назвать факторы, определяющие чувствительность МПК.
- 4 Перечислить исходные данные для разработки технологии МПК.
- 5 Перечислить технологические режимы МПК.
- 6 Дать определение способа остаточной намагниченности (СОН).
- 7 Дать определение способа приложенного поля (СПП).
- 8 Дать определение термина «стекание основной массы суспензии».
- 9 При каких условиях допустимо применять способы остаточной намагниченности (СОН) и приложенного поля (СПП)?
- 10 Как определяется значение напряженности намагничивающего поля H при СОН и СПП?
- 11 Как корректируется значение напряженности намагничивающего поля H при наличии на поверхности объекта контроля немагнитного покрытия?
- 12 Назовите способы и схемы намагничивания, используемые при МПК.

13 Назовите формулы для расчета силы намагничивающего тока I при циркулярном намагничивании.

14 Назовите формулы для расчета силы намагничивающего тока I при продольном (полюсном) намагничивании.

15 Дать определение термина «условный дефект».

16 Что такое магнитная индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r , напряжённость поля технического насыщения H_s , коэрцитивная сила H_c ?

17 Как называется механическая сила, притягивающая частицы магнитного порошка к дефекту?

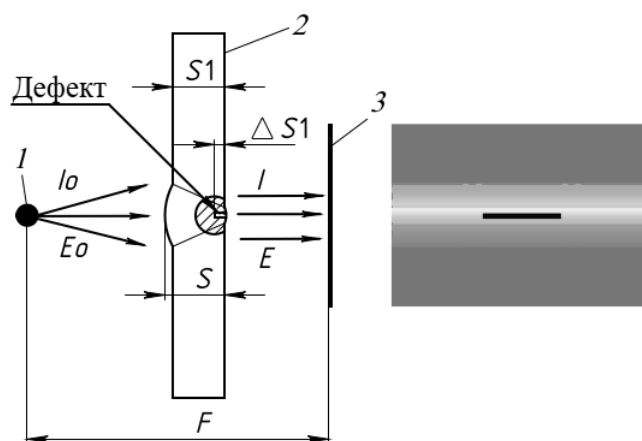
2 Практическое занятие № 2. Определение параметров режимов радиографического контроля

2.1 Краткие теоретические сведения о радиографическом неразрушающем контроле

2.1.1 Сущность радиографического контроля.

Радиографический метод неразрушающего контроля основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или записи этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. В зависимости от природы ионизирующего излучения (ИИ) различают рентгенографический и гаммаграфический методы контроля.

При прохождении ИИ через вещество происходит его ослабление. Степень ослабления зависит от толщин S , S_1 , плотности ρ контролируемого материала, а также энергии E и интенсивности излучения I (рисунок 2.1).



I – источник излучения; 2 – объект контроля (сварное соединение); 3 – детектор излучения; E – энергия излучения; S_1 – толщина материала; I_0, I – интенсивность падающего и прошедшего излучений соответственно; ΔS_1 – характеристический размер дефекта; F – фокусное расстояние; S – радиационная толщина

Рисунок 2.1 – Общая схема радиографического контроля

Наличие в материале изделия внутренних несплошностей размером ΔS , отличающихся по плотности от основного материала, приводит к резкому изменению значений E_0 и I_0 излучения, что регистрируют детектором ионизирующего излучения (радиографической плёнкой).

2.1.2 Основные сведения о рентгеновском излучении и γ -излучении.

Тормозное рентгеновское излучение и γ -кванты представляют собой разновидность электромагнитных колебаний, которые по аналогии с видимым светом и ультрафиолетовым излучением имеют волновые свойства. Длина волны для видимого света $\lambda = (4 \dots 7) \cdot 10^{-7}$ м; для ультрафиолетового излучения $\lambda = 10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-7}$ м; для рентгеновского излучения $\lambda = 6 \cdot 10^{-13} \dots 10^{-9}$ м; для γ -квантов $\lambda = 10^{-13} \dots 4 \cdot 10^{-12}$ м.

Собственная частота колебаний ν , а следовательно, и длина волны λ определяют свойства того или иного вида излучения, распространяющегося в пространстве со скоростью света c :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

С уменьшением длины волны λ увеличивается энергия E излучения. В связи с этим над волновыми свойствами начинают преобладать корпускулярные свойства частиц и проникающая способность излучения увеличивается.

Рентгеновское излучение (R -излучение) генерируется при торможении на аноде рентгеновской трубки электронов, испускаемых катодом. В результате возникают характеристическое и тормозное излучения, имеющие линейчатый и непрерывный спектры соответственно.

Характеристическое излучение используют при рентгеноспектральном и рентгеноструктурном анализе состава вещества. Тормозное излучение с непрерывным (сплошным) спектром возникает в результате «постепенного» торможения в материале анода электронов разных энергий, испускаемых катодом.

Кинетическая энергия E электрона у поверхности анода определяется как $E = e \cdot U$, где e – заряд электрона ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); U – анодное напряжение рентгеновской трубки, В. Проникая на различную глубину анода, электроны постепенно теряют скорость. Поэтому в рентгеновском спектре излучения, генерируемого трубкой, присутствуют кванты со всевозможными энергиями. Полный переход кинетической энергии электронов E в максимальную энергию рентгеновского излучения E_{\max} происходит при минимальной длине волны λ_0 , т. е.

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU} = \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{U},$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж/с.

Из последнего соотношения следует, что с увеличением анодного напряжения U длина волны λ_0 уменьшается, что приводит к изменению спектрального состава и повышению максимальной энергии непрерывного спектра.

При изменении тока i трубки спектральный состав непрерывного спектра не изменяется, однако его интенсивность изменяется пропорционально значению тока. Произведение тока трубки i и времени просвечивания t называют экспозицией рентгеновского излучения T_R : $T_R = i \cdot t$.

Гамма-излучение возникает в изотопах при их распаде. Одновременно с γ -квантами образуются α -частицы (ядра гелия ${}^4_2\text{He}$) и β -частицы (электроны ${}^0_{-1}\beta$).

Пробег α -частиц в веществе мал. Они полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 1 мм. Проникающая способность β -частиц больше. Для их полного поглощения необходим слой алюминия толщиной 2...5 мм. В то же время γ -кванты обладают существенно большей проникающей способностью по сравнению с α - и β -частицами. Вследствие этого γ -излучение широко используется при контроле качества сварных соединений.

Гамма-излучение возникает в результате естественного радиоактивного распада радионуклидов. Радионуклиды имеют активность. Активностью радионуклида A называют величину, равную отношению количества распавшихся атомов ΔN к промежутку времени Δt , в течение которого происходит распад:

$$A = \Delta N / \Delta t.$$

Активность радионуклидов в системе единиц СИ измеряют в беккерелях (Бк): 1 Бк = 1 распад/с. В практической системе единиц активность радионуклидов измеряют в кюри (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Общее количество излучения, испускаемое источником ИИ, зависит от его активности A (в кюри) и от времени экспозиции t . Это произведение часто называют гамма-экспозицией $T_\gamma = A \cdot t$ и задают в кюри-секундах.

Отношение числа распавшихся за единицу времени атомов к их общему числу – величина постоянная, называемая вероятностью распада ω . Зависимость изменения активности изотопа во времени носит экспоненциальный характер:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\omega t},$$

где $N(t)$, N_0 – число атомов в данный момент t и при $t = 0$ соответственно.

Постоянная распада является мерой неустойчивости атомов радиоактивного вещества. Характеристикой этого на практике служит период полураспада $T_{1/2}$ – время, в течение которого распадается половина атомов данного изотопа.

Активность радиоактивных источников с течением времени изменяется по экспоненциальному закону:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t},$$

где A_t , A_0 – активность радиоактивного источника в момент времени t и в первоначальный момент времени соответственно.

Период полураспада $T_{1/2}$ определяет периодичность замены источников гамма-излучения и затраты на их приобретение и захоронение.

Для характеристики радиоактивных веществ по создаваемой ими экспозиционной дозе излучения вводят величину, называемую ионизационной постоянной, или гамма-постоянной (обозначается как K_γ), которая показывает, какую мощность экспозиционной дозы γ -излучения создает точечный источник ИИ активностью 1 мКи на расстоянии 1 см в 1 ч. Гамма-постоянная K_γ выражается в единицах $\text{P} \cdot \text{см}^2 / (\text{мКи} \cdot \text{ч})$. Для препарата радия, находящегося в равновесии, $K_\gamma = 8,4 \text{ P} \cdot \text{см}^2 / (\text{мКи} \cdot \text{ч})$.

Для сравнения различных радиоактивных источников γ -излучения используют понятие радиевого гамма-эквивалента изотопа с единицей измерения миллиграмм-эквивалент радия (мг-экв Ra) или грамм-эквивалент радия (г-экв Ra).

Миллиграмм-эквивалент радия есть гамма-эквивалент радиоактивного изотопа, γ -излучение которого при тождественных условиях измерения создаёт такую же мощность дозы, что и γ -излучение 1 мг радия. В тех случаях, когда ионизационная постоянная изотопа известна, для перехода от активности, выраженной в милликюри, к радиевому гамма-эквиваленту препарата в миллиграмм-эквивалентах радия используют следующую формулу:

$$M = \frac{K_\gamma}{8,4},$$

где M – радиевый гамма-эквивалент препарата, мг-экв Ra (г-экв Ra);

A – активность, мКи (Ки);

K_γ – гамма-постоянная изотопа.

2.1.3 Взаимодействие γ - и R-излучения с материалом объекта контроля.

При прохождении рентгеновского и γ -излучения через вещество их интенсивность убывает не только за счет поглощения, но и за счет рассеяния излучения в материале объекта. Общей количественной характеристикой взаимодействия рентгеновских и γ -квантов со структурами вещества служит линейный коэффициент взаимодействия. Он определяет изменение интенсивности излучения в результате его прохождения через вещество.

Линейный коэффициент ослабления μ , см^{-1} , представляет собой сумму линейных коэффициентов взаимодействия, определяемых фотоэффектом, комптоновским рассеянием и процессом образования пар. При этом μ характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения после прохождения им поглотителя толщиной 1 см. Величина, обратная μ , называется длиной свободного пробега квантов в веществе. Значение μ снижается с ростом энергии излучения.

Поглощенное излучение при его прохождении через тонкий слой вещества зависит от толщины этого слоя δ и линейного коэффициента ослабления излучения μ . Аналогично закону радиоактивного распада можно записать

$$I_n = I_0 \cdot e^{-\mu\delta},$$

где I_0 и I_n – интенсивности узкого пучка излучения, падающего и прошедшего через вещество соответственно.

Если точечный источник ИИ удаляется от детектора на расстояние F , то интенсивность излучения, прошедшего через вещество, уменьшается обратно пропорционально квадрату этого расстояния:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{F_2^2}{F_1^2},$$

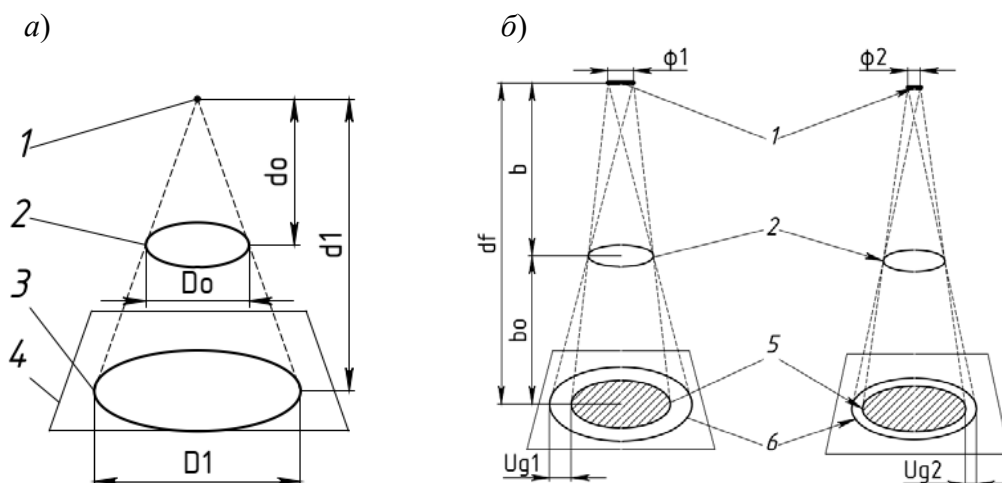
где I_1 и I_2 – интенсивности излучения на расстояниях F_1 и F_2 соответственно.

2.1.4 Виды нерезкостей радиационного изображения.

Для светового и для ионизирующего излучения действуют одни и те же законы геометрической оптики при образовании тени, полутени. Тень, формируемая некоторым элементом объекта, дает несколько увеличенное и размытое изображение, поскольку объект не находится в контакте с радиационным изображением.

Проекционным увеличением называют отношение линейного размера элемента теневого изображения, сформированного точечным источником излучения, к размеру соответствующего элемента объекта. Проекционное увеличение M можно вычислить по следующим отношениям (рисунок 2.2, а):

$$M = \frac{D_1}{D_0} = \frac{d_1}{d_0}.$$



1 – точечный источник ИИ (а) и источники с размерами $\phi_1 > \phi_2$ (б); 2 – элементы объекта; 3 – элемент теневого изображения; 4 – радиационный детектор; 5 – области тени радиационных изображений; 6 – области полутени радиационных изображений (геометрической нерезкости ($U_{g1} > U_{g2}$))

Рисунок 2.2 – Формирование проекционного увеличения (а) и геометрической нерезкости радиационного изображения (б)

Степень резкости любой тени зависит от размеров источника излучения, а также от положения объекта между источником и радиационным изображением. Если источник излучения не точечный, а имеет некоторую площадь, формируемая тень неидеально четкая (рисунок 2.2, б). Каждый небольшой элемент источника будет формировать свою тень от элемента объекта, и каждая из этих теней слегка смещена по отношению к остальным, что и дает расплывчатое изображение. Ширину «размытой» границы тени называют геометрической нерезкостью U_g . Эта величина возрастает с увеличением размера фокусного пятна ϕ , фокусного расстояния F и уменьшением расстоянием от дефекта до пленки. Геометрическая нерезкость значительно влияет на качество изображений:

$$U_g = \phi \cdot \frac{b_0}{F - b_0},$$

где b_0 – расстояние до дефекта от поверхности пленки;

ϕ – размер фокусного пятна;

F – фокусное расстояние.

Основным параметром, влияющим на величину геометрической нерезкости U_g , является фокусное расстояние F . Чем оно больше, тем меньше значение U_g .

Стремление сократить фокусное расстояние и тем самым поднять производительность радиографического контроля за счет сокращения времени экспозиции приводит к увеличению нерезкости.

2.1.5 Чувствительность радиографического контроля.

Согласно СТБ 1428 чувствительность контроля – это наименьший диаметр выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона, наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки канавочного эталона, наименьшая толщина пластинчатого эталона, при которой на снимке выявляется отверстие с диаметром, равным удвоенной толщине эталона. Эскизы эталонов чувствительности представлены на рисунке А1.

Чувствительность контроля K определяется классом чувствительности и не должна превышать значений, указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Предельные значения требуемой чувствительности радиографического контроля

В миллиметрах

Контролируемая толщина	Класс чувствительности		
	I	II	III
До 5 вкл.	0,10	0,10	0,20
Св. 5 до 9 вкл.	0,20	0,20	0,30
Св. 9 до 12 вкл.	0,20	0,30	0,40
Св. 12 до 20 вкл.	0,30	0,40	0,50
Св. 20 до 30 вкл.	0,40	0,50	0,60

Класс чувствительности указывается в технической документации либо определяется по ГОСТ 23055 в соответствии с классом контролируемых сварных соединений [5]:

- 1-му классу сварных соединений соответствует класс чувствительности I;
- 2–4-му классам сварных соединений соответствует класс чувствительности II;
- 5–7-му классам сварных соединений соответствует класс чувствительности III.

Для определения чувствительности контроля следует применять проволочные, канавочные или пластинчатые эталоны. Форма и размеры указанных эталонов представлены на рисунке А.1 и в таблицах А.1 – А.3.

Эталон чувствительности изготавливают из металла или сплава, основа которого по плотности и химическому составу аналогична основе контролируемого сварного соединения.

Чувствительность радиографического контроля определяется наименьшим размером имитатора дефекта в эталоне, выявляемого на снимке.

2.1.6 Радиографическая пленка как детектор ионизирующего излучения.

Главная часть рентгеновской пленки – эмульсионный слой, представляющий собой желатиновую матрицу со взвешенными в ней мельчайшими кристалликами чувствительного к излучению бромистого серебра с небольшой примесью йодистого. Прозрачная подложка пленки покрыта эмульсией с обеих сторон. Эмульсия пленки реагирует на прошедшее через объект излучение, изменяя параметры своего серебряного слоя и тем самым обеспечивая регистрацию проходящего потока излучения.

Пленка, имеющая плотность почернения D и рассматриваемая в падающем на нее свете яркостью L_0 , ослабляет этот свет, вследствие чего яркость прошедшего света становится меньше L_0 и равной L_n . Фотографическая плотность почернения пленки D определяется как

$$D = \lg \frac{L_0}{L_n}.$$

Так, например, если радиографическая пленка, рассматриваемая на негатоскопе, имеющем яркость свечения экрана $L_0 = 100$ кд/м², ослабляет яркость до $L_n = 1$ кд/м², то плотность почернения такой пленки $D = 2$.

Пленки, пропускающие 1/10, 1/100 или 1/1000 падающего света, обладают оптической плотностью почернения 1, 2 и 3 соответственно.

Одна из важнейших характеристик радиографических пленок – разрешающая способность, которая характеризуется количеством отдельно различимых штриховых линий одинаковой толщины на длине 1 мм (мм⁻¹).

Важным параметром пленки является ее чувствительность, которую определяют как величину, обратную экспозиционной дозе, необходимой для получения оптической плотности $D = 0,85$. Одна и та же экспозиция может быть значи-

тельной для одной пленки и недостаточной для другой. Единица измерения чувствительности пленки – P^{-1} .

В настоящее время в качестве критерия чувствительности выбирается более высокая оптическая плотность почернения, например, $D = 1,5$ и даже $D = 2,5$.

Важной характеристикой пленки является ее контрастность. Она характеризует увеличение плотности почернения конкретной плёнки при одинаковых значениях приращениях экспозиционной дозы.

Контрастность пленки, её чувствительность и гранулярность взаимосвязаны между собой. Высокочувствительные пленки имеют крупные зерна и низкий предел разрешения, а низкочувствительные – мелкие зерна и высокий предел разрешения. Поэтому, хотя и желательно, чтобы время экспонирования пленки было как можно короче, использование высокочувствительной пленки ограничивается её зернистостью, которая в значительной мере определяет качество изображения мелких дефектов.

В зависимости от зернистости, контрастности и чувствительности рентгенографические плёнки производства РФ подразделяют на четыре класса.

Класс I. Особо мелкозернистые, высококонтрастные безэкранные пленки (типа РТ-5).

Класс II. Мелкозернистые, высококонтрастные безэкранные плёнки (типа РТ-4М, РТ-СШ, РНТМ-1). Эти плёнки в 2–4 раза более чувствительны к излучению по сравнению с плёнками I класса.

Класс III. Высокочувствительные безэкранные пленки типа РТ-1. Их чувствительность в 5–10 раз выше, чем пленок I класса.

Класс IV. Высокочувствительные к излучению экранные пленки типа РТ-2.

Согласно Европейскому стандарту EN-584-1, пленки подразделяют на классы, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Качественная классификация рентгенографических пленок по EN-584-1

Класс EN 584-1	Тип зернистости	Качество снимка	Тип чувствительности	Плёнка AGFA Structurix
C1; C2	Очень мелкозернистая	Очень высокое	Очень низкая	D2; D3
C3; C4	Мелкозернистая	Высокое	Низкая	D4; D5
C5	Средняя	Среднее	Средняя	D7
C6	Крупнозернистая	Низкое	Высокая	D8

2.2 Последовательность определения параметров контроля

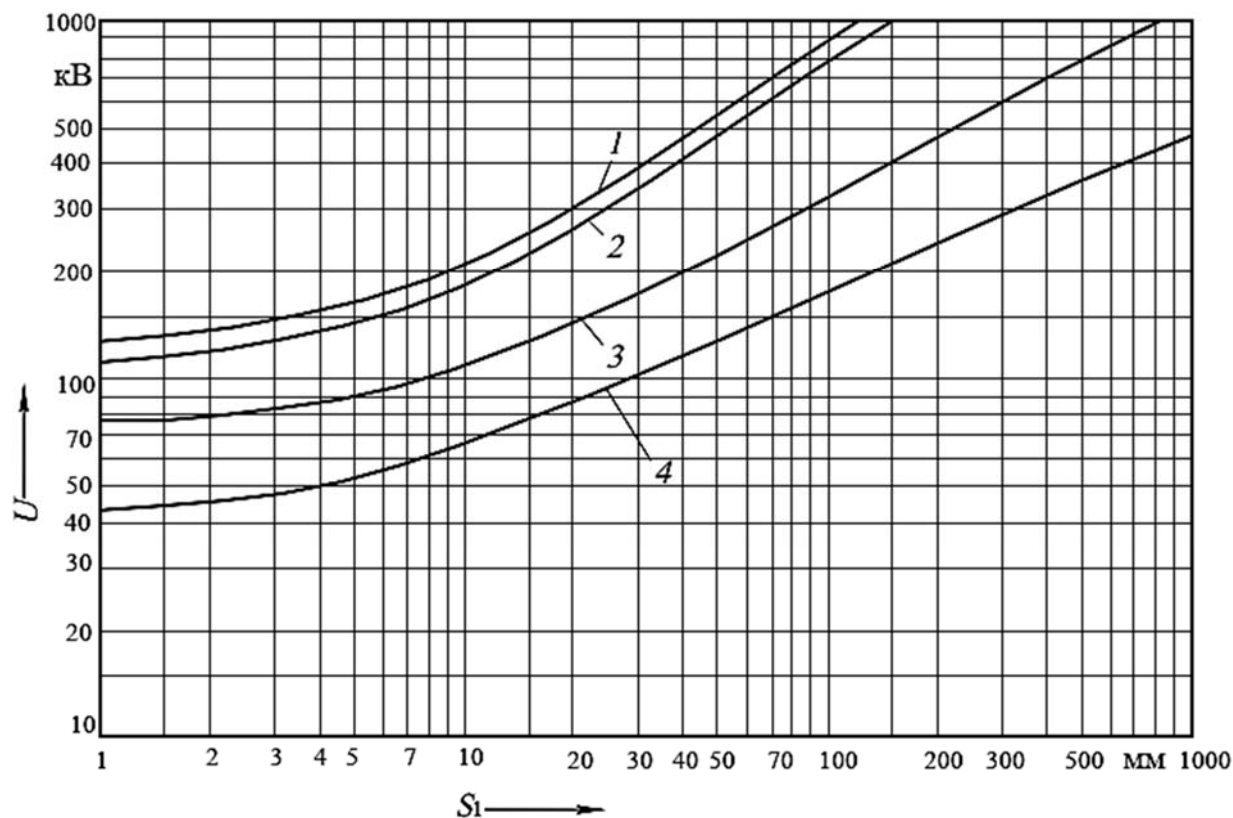
При выполнении практического занятия студент должен определить следующие параметры радиографического контроля:

- класс чувствительности контроля и значение чувствительности контроля;
- эталон чувствительности (тип эталона, его номер, указать номер имитатора дефекта, выявляемого на снимке);
- значение допустимой геометрической нерезкости;
- выбор рентгеновского дефектоскопа или γ -дефектоскопа;

- тип рентгеновской пленки;
- способ зарядки пленок в кассеты с усиливающими экранами и толщину экранов;
- схему контроля (привести эскиз);
- минимальное значение расстояния f от источника до наиболее удаленной от пленки точки контролируемого участка, а также фокусное расстояние f ;
- количество контролируемых участков n для объекта с криволинейной поверхностью или длина l контролируемых за одно экспонирование участков при контроле прямолинейных сварных соединений;
- напряжение на рентгеновской трубке или значение активности источника γ -излучения с учётом времени, прошедшего после зарядки дефектоскопа;
- время экспозиции.

2.2.1. Выбор напряжения на рентгеновской трубке и выбор источника гамма-излучения.

Для обеспечения высокой чувствительности контроля напряжение на рентгеновской трубке рекомендуется устанавливать по возможности более низким. Максимальные значения напряжения на рентгеновской трубке в зависимости от просвечиваемой толщины приведены на рисунке 2.3.



1 – медь, никель и сплавы на их основе; 2 – сталь; 3 – титан и сплавы на их основе; 4 – алюминий и сплавы на его основе

Рисунок 2.3 – Максимальное напряжение U на рентгеновской трубке в зависимости от просвечиваемой толщины $2S_1$ и материала

У гамма-дефектоскопов энергия фотонов не регулируется. Верхний предел по толщине определяется плотностью потока энергии фотонов в рабочем пучке излучения, нижний – уменьшением чувствительности радиационного контроля.

В таблице 2.3 приведены данные применимости источников γ -излучения в зависимости от радиационной толщины стальных объектов контроля.

Таблица 2.3 – Рекомендуемые источники γ -излучения стальных деталей в зависимости от радиационной толщины

Радиационная толщина, мм	Источник излучения
До 5 включ.	Тулий-170
Свыше 5 до 20 включ.	Тулий-170 (до 15 мм); селен-75; иридий-192; цезий-137 (от 10 мм)
Свыше 20 до 40 включ.	Селен-75 (до 30 мм включ.); иридий-192; цезий-137
Свыше 40 до 80 включ.	Цезий-137; кобальт-60

2.2.2 Схемы контроля и определение параметров контроля.

2.2.2.1 Сварные соединения следует контролировать по схемам, приведенным на рисунках 2.4–2.22; при этом во всех случаях (кроме рисунка 2.14) центральный луч пучка излучения должен проходить через середину участка, контролируемого за одно экспонирование [6; 7].

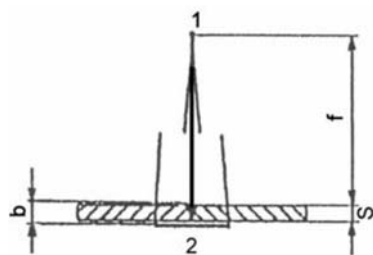


Рисунок 2.4

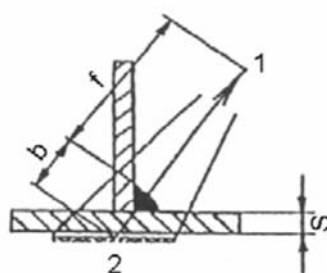


Рисунок 2.5

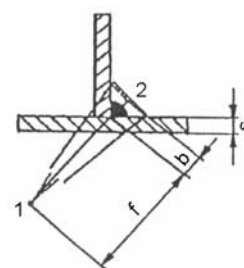


Рисунок 2.6

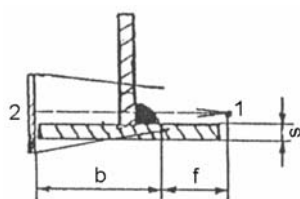


Рисунок 2.7

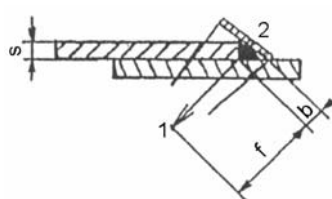


Рисунок 2.8

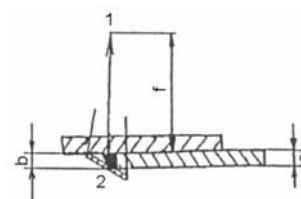


Рисунок 2.9

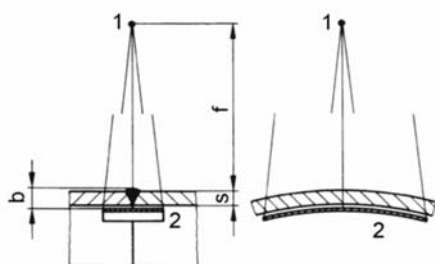


Рисунок 2.10

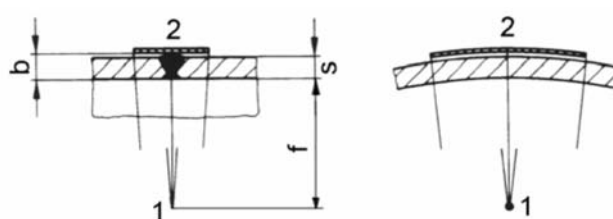


Рисунок 2.11

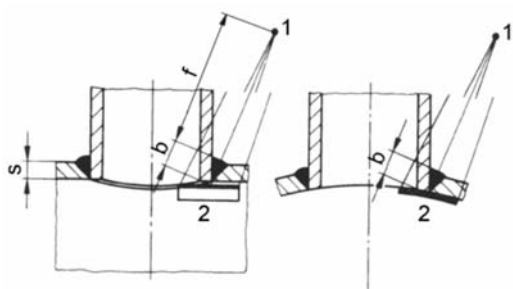


Рисунок 2.12

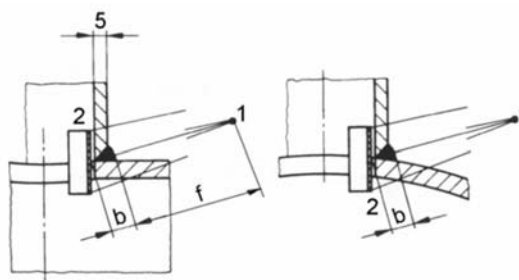


Рисунок 2.13

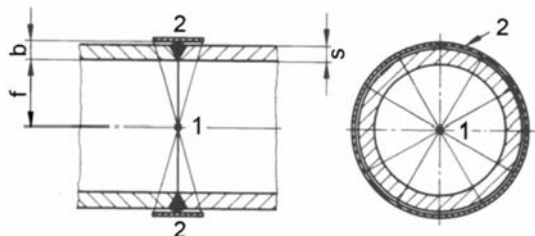


Рисунок 2.14

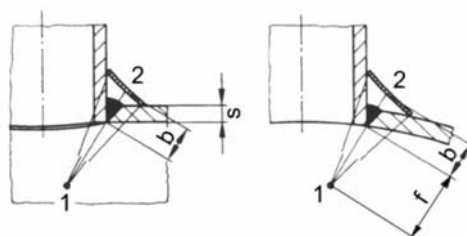


Рисунок 2.15

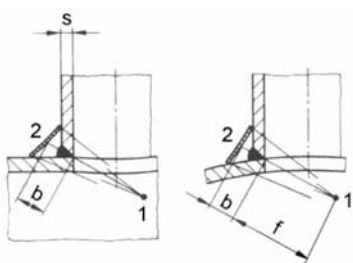


Рисунок 2.16

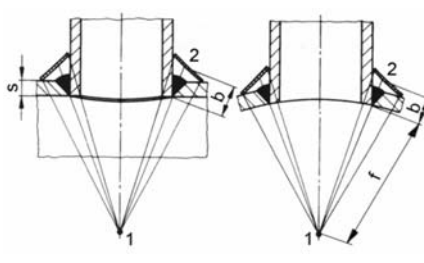


Рисунок 2.17

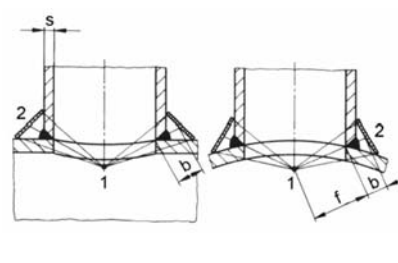


Рисунок 2.18

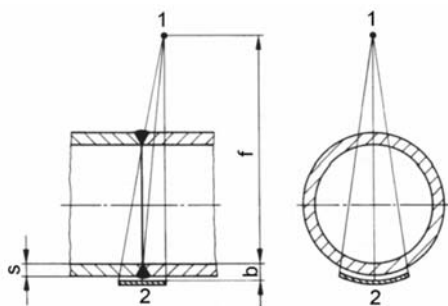


Рисунок 2.19

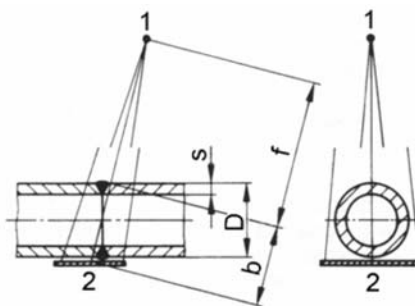


Рисунок 2.20

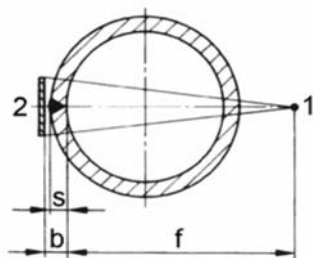


Рисунок 2.21

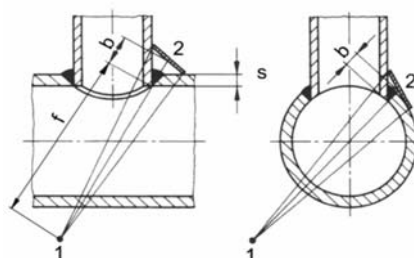


Рисунок 2.22

На рисунках 2.4–2.22 приняты следующие обозначения: 1 – источник излучения; 2 – кассета с пленкой; b – расстояние от наиболее удаленной от пленки точки контролируемого участка до пленки; s – контролируемая толщина; f – расстояние от источника ИИ до наиболее удаленной от пленки точки контролируемого участка.

2.2.2.2 При ограниченной ширине привариваемого элемента допускается проводить контроль тавровых сварных соединений с направлением излучения по образующей этого элемента в соответствии с рисунком 2.7.

2.2.2.3 При выборе схемы и направления излучения следует учитывать, что расстояние от контролируемого сварного соединения до радиографической плёнки должно быть минимальным и в любом случае не превышать 150 мм; угол между направлением излучения и нормалью к радиографической плёнке в пределах контролируемого за одно экспонирование участка сварного соединения должен быть минимальным и в любом случае не превышать 45° .

2.2.2.4 Расстояние от источника ИИ до ближайшей к источнику поверхности контролируемого участка (или до наиболее удалённой от плёнки точки контролируемого участка) и размеры контролируемых за одно экспонирование участков для всех схем просвечивания (кроме рисунка 2.14) следует выбирать такими, чтобы при просвечивании выполнялись следующие требования:

– геометрическая нерезкость изображений дефектов на снимках при расположении плёнки вплотную к контролируемому сварному соединению не должна превышать половины требуемой чувствительности контроля при чувствительности до 2 мм и 1 мм при чувствительности более 2 мм;

– относительное увеличение размеров изображений дефектов, расположенных со стороны источника излучения (по отношению к дефектам, расположенным со стороны плёнки), не должно превышать 1,25;

– уменьшение оптической плотности изображения сварного соединения на любом участке этого изображения по отношению к оптической плотности в месте установки проволоочного эталона чувствительности или по отношению к оптической плотности изображения канавочного или пластинчатого эталона чувствительности не должно превышать 1,0.

2.2.2.5 Расстояние f от источника до наиболее удалённой от пленки точки контролируемого участка определяется для прямолинейных сварных соединений по формуле

$$f > C \cdot S,$$

где $C = 2\phi / K$, при $\phi / K \geq 2$;

$C = 4$ при $\phi / K \leq 2$;

S – контролируемая толщина, мм;

ϕ – максимальный размер фокусного пятна источника излучения, мм;

K – требуемая чувствительность контроля, мм.

Для криволинейных сварных соединений f определяется из соотношения:

– для III класса чувствительности контроля

$$f / \phi > 7,5 \cdot b^{2/3};$$

– для I и II класса чувствительности контроля

$$f / \phi > 15 \cdot b^{2/3},$$

где b – расстояние от наиболее удаленной от кассеты с пленкой точки контролируемого участка до кассеты с пленкой, мм.

2.2.2.6 Зависимость f/ϕ от b приведена на рисунке 2.23, по которому определяется требуемое минимальное значение f с учётом класса чувствительности контроля.

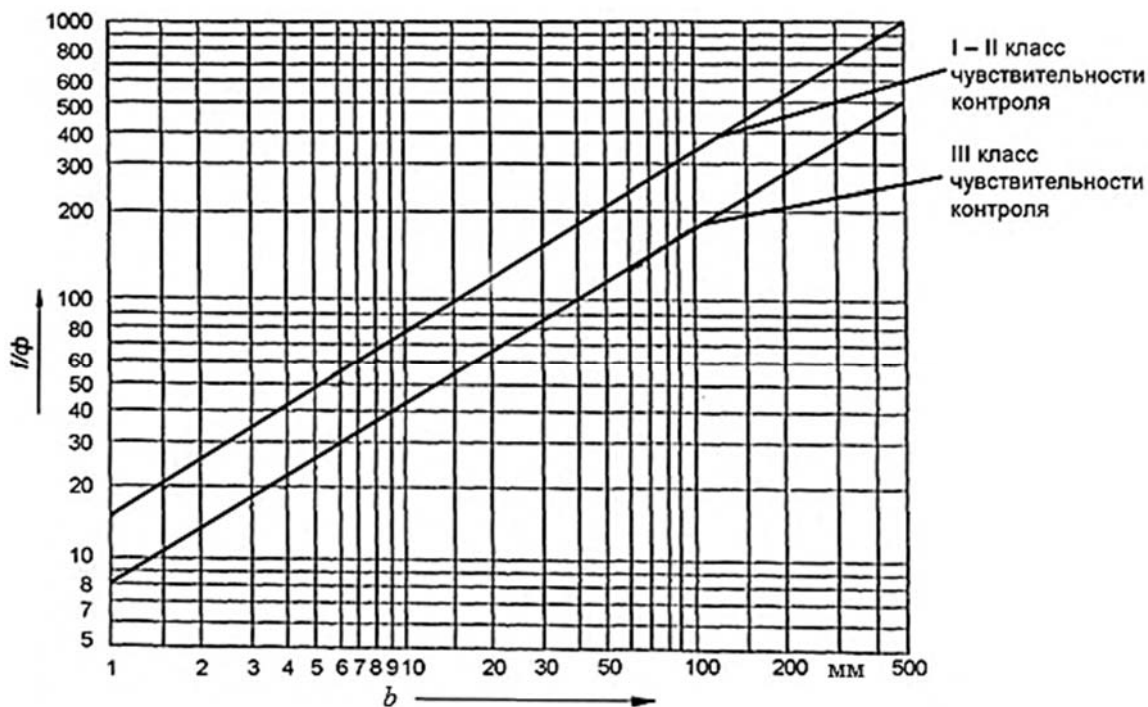


Рисунок 2.23 – Номограммы для определения требуемого минимального значения f с учетом класса чувствительности контроля

2.2.2.7 При контроле кольцевых сварных соединений цилиндрических и сферических пустотелых изделий следует использовать схемы просвечивания через одну стенку (см. рисунки 2.10–2.18). При этом рекомендуется применять схемы с расположением источника ИИ внутри контролируемого изделия.

2.2.2.8 При контроле сварных соединений по рисунку 2.14 (панорамное просвечивание) отношение внутреннего диаметра d к внешнему диаметру D контролируемого соединения не должно быть менее 0,8, а максимальный размер фокусного пятна ϕ источника излучения должен удовлетворять соотношению

$$\phi \leq \frac{K \cdot d}{2(D - d)}$$

где K – чувствительность контроля.

2.2.2.9 При отсутствии источника ИИ, удовлетворяющего формуле подпункта 2.2.2.8, допускается при контроле по схеме рисунка 2.14 использовать источники излучения с максимальным размером фокусного пятна, удовлетворяющим соотношению

$$\phi \leq \frac{K \cdot d}{(D - d)}$$

В этом случае эталон чувствительности должен устанавливаться на сварном соединении только со стороны источника излучения.

2.2.2.10 В тех случаях, когда размеры дефектов не определяются (например, дефекты не допускаются независимо от их размеров), соотношение $\frac{d}{D} \geq 0,8$ между внутренним и внешним диаметрами может не соблюдаться.

2.2.2.11 Схема, приведенная на рисунке 2.19, рекомендуется для просвечивания кольцевых сварных соединений любого диаметра, если невозможен или нецелесообразен контроль по схемам просвечивания через одну стенку.

2.2.2.12 Схема, приведенная на рисунке 2.20, рекомендуется для просвечивания сварных соединений трубопроводов диаметром до 100 мм, только если просвечивание по рисунку 2.19 невозможно. Сварное соединение (рисунок 2.20) контролируется за два экспонирования; при этом источник излучения устанавливается так, чтобы центральные лучи пучков излучения при экспонированиях были взаимно перпендикулярны.

2.2.2.13 При контроле сварных соединений по рисункам 2.19, 2.20 направление излучения следует выбирать таким, чтобы изображения противоположных участков сварного шва на снимке не накладывались друг на друга. При этом угол между направлением излучения и плоскостью сварного шва должен быть минимальным и в любом случае не превышать 45° .

2.2.2.14 Продольные стыковые соединения цилиндрических изделий следует контролировать по рисунку 2.21.

2.2.2.15 Длина L контролируемых за одно экспонирование участков при контроле прямолинейных сварных соединений должна составлять не более 80 % от расстояния f .

2.2.2.16 Минимальное количество экспонирований (количество участков) N для криволинейных сварных соединений определяется по рисункам 2.24 и 2.25.

2.2.2.17 Расстояние от источника излучения до контролируемого участка и длина контролируемых за одно экспонирование участков при контроле кольцевых швов цилиндрических и сферических пустотелых изделий с диаметром более 2 м определяются так же, как и для прямолинейных сварных соединений.

2.2.2.18 Длина снимков должна обеспечивать перекрытие изображений смежных участков сварных соединений: при длине контролируемого участка до 100 мм – не менее 0,2 длины участка, при длине контролируемого участка свыше 100 мм – не менее 20 мм.

2.2.2.19 Ширина снимков должна обеспечивать получение изображений сварного шва, эталонов чувствительности, маркировочных знаков и околошовных зон шириной:

– для стыковых и нахлесточных соединений:

а) не менее 5 мм – при толщине свариваемых кромок до 5 мм;

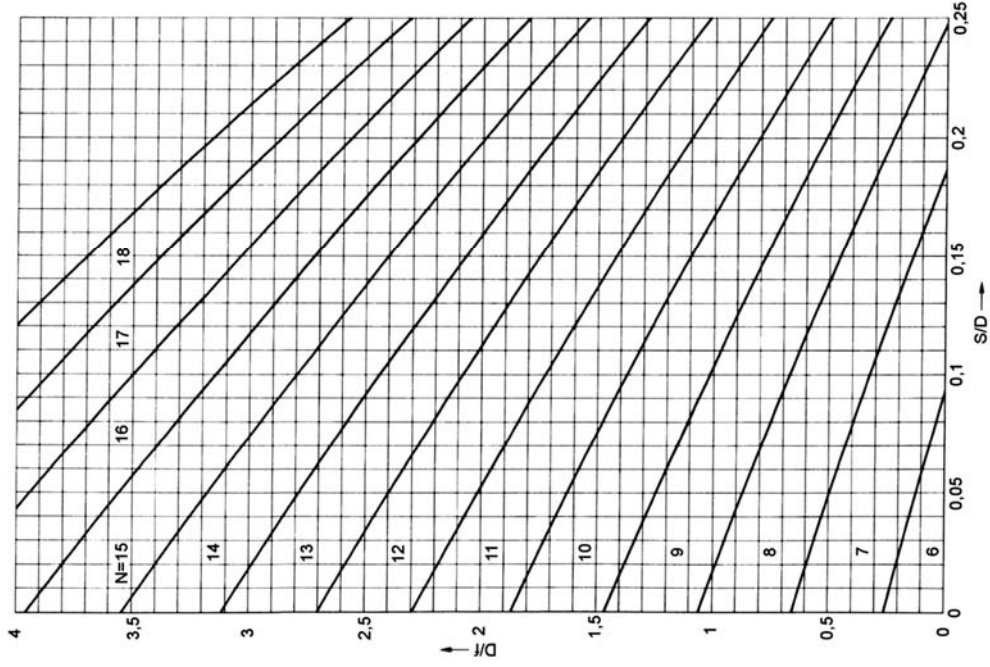
б) не менее толщины свариваемых кромок – при толщине свариваемых кромок от 5 до 20 мм;

в) не менее 20 мм – при толщине свариваемых кромок свыше 20 мм;

– для тавровых и угловых соединений:

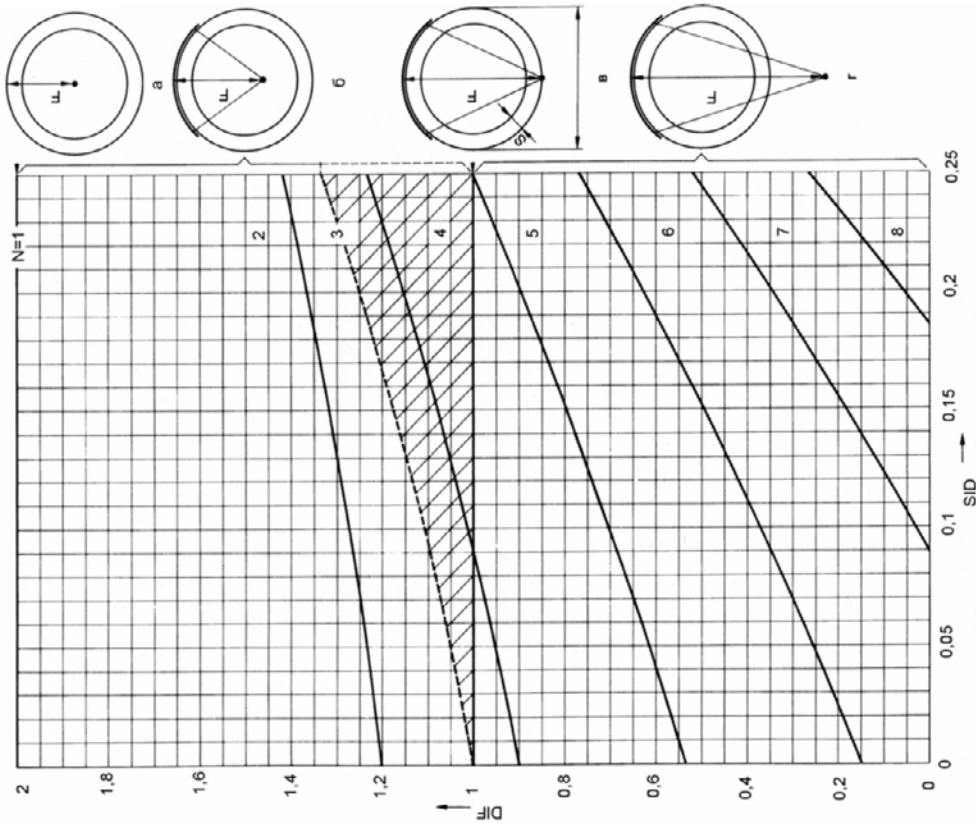
а) устанавливается технической документацией на контроль или приёмку этих соединений.

2.2.2.20 Тип рентгеновской пленки выбирается по таблице 2.4.



D – наружный диаметр; S – контролируемая толщина;
 f – расстояние от источника до наиболее удаленной от плёнки точки контролируемого участка

Рисунок 2.25 – Номограмма для определения количества контролируемых участков N



D – наружный диаметр; S – контролируемая толщина;
 F – фокусное расстояние (расстояние от источника до кассеты с пленкой)

Рисунок 2.24 – Номограмма для определения количества контролируемых участков N

Таблица 2.4 – Выбор рентгеновской плёнки в зависимости от радиационной толщины и источника излучения

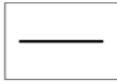
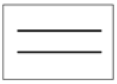
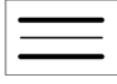

Радиационная толщина	Источник получения	Плёнка AGFA
До 5 мм включ.	Рентгеновский аппарат Иттербий-169 Тулий-170	D2 D3 D4; D5
Св. 5 до 20 мм включ.	Рентгеновский аппарат Тулий-170 Селен-75 Иридий-192	D3 D4 D5 D7
Св. 20 до 50 мм включ.	Рентгеновский аппарат Иридий-192	D4 D5; D7
Св. 50 до 100 мм включ.	Иридий-192 Кобальт-60	D5 D7; D8

2.2.2.21 Толщина усиливающих экранов выбирается по таблице 2.5, а способы зарядки пленок в кассеты – по таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Толщина свинцовых усиливающих экранов

Источник излучения		Толщина экранов, мм	
		переднего	заднего
Рентгеновский аппарат с напряжением на рентгеновской трубке, кВ	До 100	0,02	0,02
	Св. 100 до 300	0,05	0,09
	Св. 300	0,09	0,09
Тулий-170		0,09	0,09
Селен-75		0,09	0,20
Иридий-192		0,09	0,20
Кобальт-60		0,30	0,50

Таблица 2.6 – Способы зарядки пленок в кассеты с усиливающими экранами

Способ зарядки	Наличие пленок в кассете	
	одна	две
Без экранов		
С усиливающими металлическими экранами		

2.2.2.22 Время экспозиции при использовании источника γ -излучения рассчитывается по формуле

$$t_{\text{эксн}} = \frac{T \cdot k_F}{A},$$

где T – экспозиция, определяемая по рисунку В.1;

A – активность источника;

k_F – коэффициент, учитывающий отличие фокусного расстояния F_0 (см. рисунок В.1) от фокусного расстояния F контроля.

Коэффициент k_F определяется по следующей формуле:

$$k_F = \frac{F^2}{F_0^2}.$$

2.2.2.23 При использовании в качестве источника излучения рентгеновского аппарата непрерывного действия экспозиция T определяется как произведение анодного тока трубки рентгеновского аппарата i на величину времени экспозиции $t_{\text{экс}}$ и выбирается по рисунку Б.1. Тогда время экспозиции определяют как

$$t_{\text{экс}} = \frac{T \cdot k_F}{i}.$$

2.3 Рекомендации по выбору параметров режимов радиографического контроля

1 Чем выше максимальное напряжение рентгеновского аппарата, тем большую толщину можно просветить.

2 Чем ниже напряжение и выше ток рентгеновской трубки при заданной экспозиции, тем выше контраст и качество получаемого изображения.

3 Чем меньше размер фокусного пятна источника ИИ, тем более высокое разрешение можно получить, используя геометрическое увеличение.

4 Чем меньше размер фокусного пятна рентгеновской трубки, тем меньше её удельная мощность и ток, соответственно, меньше возможный контраст получаемого изображения.

5 Чем ближе находится плёнка к исследуемой детали и чем больше расстояние от источника излучения до детали, тем выше качество изображения и меньше сказывается размер фокусного пятна источника.

6 Чем меньше расстояние между источником ИИ и пленкой, тем больше экспозиционная доза. Доза обратно пропорциональна квадрату расстояния, т. е. при уменьшении расстояния в два раза время экспозиции можно уменьшить в четыре раза.

7 Чем ниже чувствительность рентгеновской плёнки, тем выше качество изображения, но больше экспозиция.

2.4 Задания к практическому занятию

На практическом занятии студентам предлагается определить следующие режимы радиографического контроля сварного узла.

- класс чувствительности контроля;
- значение чувствительности контроля;
- эталон чувствительности (тип эталона, его номер, номер имитатора дефекта, выявляемого на снимке);
- значение допустимой геометрической нерезкости;
- марку рентгеновского дефектоскопа или γ -дефектоскопа;
- тип рентгеновской плёнки;

- способ зарядки пленок в кассеты с усиливающими экранами;
- толщину усиливающих экранов;
- схему контроля (привести эскиз);
- минимальное значение расстояния f от источника до наиболее удаленной от пленки точки контролируемого участка;
- значение фокусного расстояния F ;
- количество контролируемых участков N для объекта с криволинейной поверхностью или длина L контролируемых за одно экспонирование участков при контроле прямолинейных сварных соединений;
- напряжение на рентгеновской трубке или значение активности источника γ -излучения с учетом периода полураспада и времени, прошедшего после зарядки дефектоскопа;
- время экспозиции.

Варианты исходных данных представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Варианты исходных данных для расчёта режимов радиографического контроля сварного узла

Номер варианта	Форма узла	Сварной шов	Толщина металла, мм	Класс сварного соединения по ГОСТ 23055	Ионизирующее излучение	Количество суток после зарядки источника ИИ
1	Труба Ø 32 м	Кольцевой	5	1	Рентгеновское	
2	Труба Ø 32 м	Кольцевой	5	2	γ -излучение	7
3	Труба Ø 89 мм	Кольцевой	5	1	Рентгеновское	
4	Труба Ø 89 мм	Кольцевой	5	2	γ -излучение	9
5	Труба Ø 219 мм	Кольцевой	8	1	Рентгеновское	
6	Труба Ø 219 мм	Кольцевой	14	2	γ -излучение	13
7	Труба Ø 1020 мм	Кольцевой	12	1	Рентгеновское	
8	Труба Ø 1020 мм	Кольцевой	18	2	γ -излучение	23
9	Труба Ø 1420 мм	Кольцевой	14	1	Рентгеновское	
10	Труба Ø 1420 мм	Кольцевой	20	2	γ -излучение	25
11	Труба Ø 630 мм	Продольный	7	2	Рентгеновское	
12	Труба Ø 720 мм	Продольный	14	2	γ -излучение	27
13	Труба Ø 820 мм	Продольный	9	2	Рентгеновское	
14	Труба Ø 920 мм	Продольный	14	2	γ -излучение	29
15	Труба Ø 1420 мм	Продольный	18	2	γ -излучение	33
16	Тавровое соединение		10	1	Рентгеновское	
17	Тавровое соединение		15	1	γ -излучение	35
18	Нахлесточное соединение		8	1	Рентгеновское	
19	Нахлесточное соединение		14	1	γ -излучение	37

Размеры эталонов чувствительности представлены в таблицах А.1–А.2.

Номограммы для определения экспозиции при использовании рентгеновского и γ -излучения представлены на рисунках В.1 и Б.1 соответственно.

Основные технические характеристики некоторых источников ионизирующего излучения представлены в таблицах Г.1 и Г.2.

Контрольные вопросы

1 Дать определение термина «радиографический метод неразрушающего контроля».

2 От чего зависит степень ослабления ионизирующего излучения при прохождении через вещество?

3 Описать схему получения рентгеновского излучения.

4 Как изменяются длина волны и энергия рентгеновского излучения с увеличением анодного напряжения рентгеновской трубки?

5 Что происходит при увеличении силы тока i рентгеновской трубки?

6 Что такое активность радионуклида?

7 Что такое экспозиция рентгеновского излучения T_R и γ -экспозиция T_γ ?

8 Что такое вероятность распада ω , период полураспада $T_{1/2}$?

9 По какому закону изменяется активность радиоактивных источников с течением времени?

10 Что такое гамма-постоянная и радиевый гамма-эквивалент?

11 Что такое линейный коэффициент ослабления μ ?

12 По какому закону изменяется интенсивность ионизирующего излучения, прошедшего через вещество?

13 Как изменяется интенсивность ионизирующего излучения с увеличением расстояния от источника излучения?

14 Что такое проекционное увеличение радиационного изображения и от чего оно зависит?

15 Что такое геометрическая нерезкость U_g и от чего она зависит?

16 Что такое чувствительность радиографического контроля, класс чувствительности?

17 Какие эталоны чувствительности используют при радиографии?

18 Какие факторы влияют на чувствительность радиографии?

19 Что такое фотографическая плотность почернения пленки?

20 Что такое чувствительность, контрастность и разрешающая способность радиографических пленок? От чего они зависят и как связаны между собой?

21 Перечислить параметры радиографического контроля.

22 Как осуществляется выбор напряжения на рентгеновской трубке и выбор источника гамма-излучения?

23 Привести схемы контроля стыковых и угловых сварных швов.

24 Привести схемы контроля сварных швов контроля трубопроводов.

25 Каково минимальное расстояние от контролируемого сварного соединения до радиографической пленки?

26 Каково минимальное значение угла между направлением излучения

и нормалью к радиографической пленке?

27 Перечислить требования к выбору расстояния от источника излучения до ближайшей к источнику поверхности контролируемого участка и размерам контролируемых за одно экспонирование участков.

28 Перечислить требования к выбору расстояния f от источника до наиболее удаленной от плёнки точки контролируемого участка.

29 Что такое панорамное просвечивание и каковы при его использовании требования к размерам трубы и размеру фокусного пятна ϕ источника ИИ?

30 Особенности применения схем, приведенных на рисунках 2.19, 2.20.

31 Как определяется длина L контролируемых за одно экспонирование участков при контроле прямолинейных и криволинейных сварных соединений?

32 Каково значение перекрытия изображений смежных участков сварных соединений?

33 Перечислить требования к ширине радиографических снимков.

34 Как выбирается толщина усиливающих экранов?

35 Как определяется время экспозиции t при использовании источника рентгеновского и γ -излучения?

3 Практическое занятие № 3. Определение параметров режимов акустического контроля

Акустический неразрушающий контроль основан на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. При использовании упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический».

3.1 Краткие теоретические сведения об акустических волнах

3.1.1 Природа ультразвуковых колебаний.

Упругие механические колебания, распространяющиеся в воздухе, воспринимают обычно как звуки. Это акустические колебания. Если их частота более 20 кГц, т. е. выше порога слышимости для человеческого уха, то такие колебания называют ультразвуковыми (УЗК). В дефектоскопии наиболее часто используют диапазон частот 0,5...10 МГц.

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

Процесс распространения ультразвука в пространстве является волновым. Граница, отделяющая колеблющиеся частицы среды от частиц, ещё не начавших колебаться, называется фронтом волны. Упругие волны характеризуются скоростью распространения C , длиной волны λ и частотой колебаний f . При этом под

длиной волны понимается расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися одинаковым образом (в одинаковой фазе). Число волн, проходящих через данную точку пространства в каждую секунду, определяет частоту УЗ-колебаний. Длина волны связана со скоростью её распространения соотношением

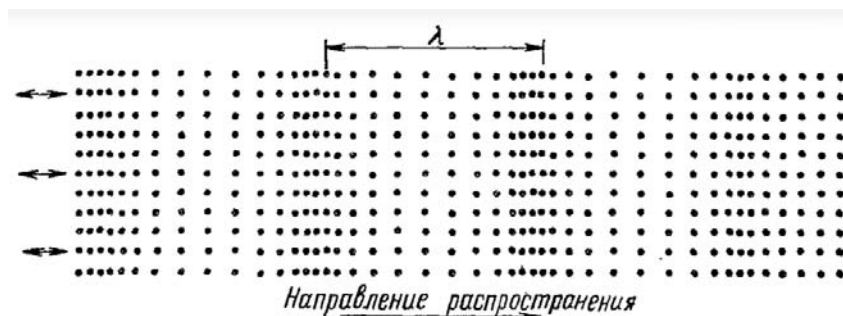
$$\lambda = C / f.$$

Следует отличать скорость волны C от скорости колебания частиц. Скорость C – физическая константа среды и зависит от её свойств. Поэтому важно помнить, что нельзя изменить скорость волны C за счёт частоты f (или длины волны λ). Длину волны λ в любой среде можно изменить только путём изменения частоты f возбуждаемых колебаний.

3.1.2 Типы и скорость ультразвуковых волн.

В зависимости от направления колебания частиц различают несколько типов волн. Если частицы среды колеблются вдоль распространения волны, то такие волны (рисунок 3.1, *a*) называются продольными (волнами растяжения-сжатия). В случае, если частицы среды колеблются перпендикулярно к направлению распространения волны, то это волны (рисунок 3.1, *б*) поперечные (волны сдвига). Поперечные волны могут возникать лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвига. Поэтому в жидкой и газообразной средах образуются только продольные волны. В твердой среде могут возникать как продольные, так и поперечные волны.

a)



б)

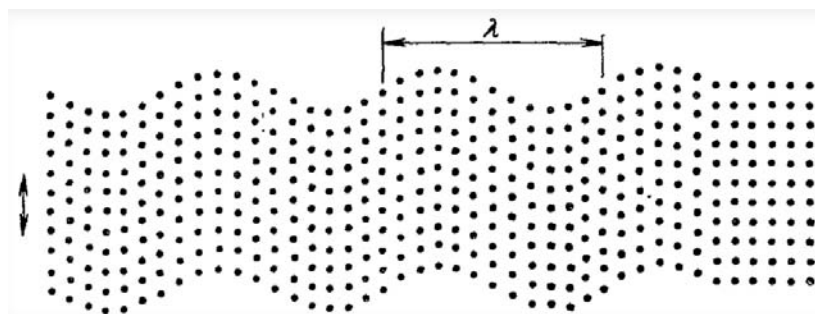


Рисунок 3.1 – Продольные (*a*) и поперечные (*б*) упругие волны

Скорость C_l продольных волн в среде плотностью ρ определяется модулем нормальной упругости E и коэффициентом Пуассона μ :

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (3.1)$$

Скорость C_t поперечных волн в среде плотностью ρ определяется модулем сдвига G :

$$C_t = \sqrt{G/\rho}. \quad (3.2)$$

Учитывая, что $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, из уравнений (3.1) и (3.2) можно определить соотношение скоростей поперечных и продольных волн:

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

Поскольку в металлах $\mu \approx 0,3$, то между продольной и поперечной волной существует соотношение $C_t / C_l \approx 0,55$.

Кроме поперечных и продольных волн, в твёрдых телах могут быть возбуждены волны других типов. Вдоль поверхности тела могут распространяться поверхностные волны (волны Рэлея). Они являются комбинацией поперечных и продольных волн. Плоскость поляризации (плоскость, в которой колеблются частицы среды) у них перпендикулярна к поверхности. Глубина распространения этих волн примерно равна длине волны, а скорость составляет $0,9C_t$.

В изделиях, толщина которых соизмерима с длиной волны, распространяются пластиночные волны (волны Лэмба). Они занимают всю толщину листа.

В плакирующих слоях биметаллических листов могут распространяться поверхностные волны с горизонтальной поляризацией (волны Лява).

3.1.3 Распространение ультразвука.

Пространство, в котором распространяются УЗ-волны, называют ультразвуковым полем. УЗ-волна в направлении своего движения несёт определённую энергию. Количество энергии, переносимое УЗ-волной за 1 с через 1 см^2 площади, перпендикулярной к направлению распространения, называется интенсивностью ультразвука I . Для плоской волны при амплитуде смещения A .

$$I = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho C.$$

Произведение скорости C ультразвука на плотность ρ среды называется удельным акустическим сопротивлением $Z = \rho C$.

Затухание УЗ-колебаний происходит по экспоненциальному закону

$$A = A_0 e^{-\delta \gamma}, \quad (3.3)$$

где A_0 – амплитуда зондирующего импульса;

δ – коэффициент затухания, см^{-1} .

Поскольку интенсивность ультразвука равна квадрату амплитуды, то снижение интенсивности вследствие затухания описывается формулой

$$I = I_0 e^{-2\delta\gamma}$$

На практике нет необходимости определять амплитуду A или интенсивность волны I в абсолютных единицах, а достаточно найти величину их относительного ослабления. Тогда для выражения относительной величины $I/I_0 = A^2 / A_0^2$ используют специальные единицы – децибелы (дБ).

Число децибел

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{A}{A_0}.$$

Такой подход удобен тем, что в дефектоскопической практике амплитуды могут изменяться на 1–3 порядка – в 10, 100 и 1000 раз, а в децибелах это составит соответственно 20, 40 и 60 дБ, т. е. значения одного порядка.

3.1.4 Свойства ультразвука.

При излучении пьезоэлементом ультразвукового импульса в среде возникает УЗ-поле, которое имеет вполне определенные пространственные границы (рисунок 3.2, а). Угол расхождения φ_p зависит от соотношения длины волны и диаметра излучателя $2a$: $\varphi_p = 0,61 C / (af) = 1,22 \lambda / (2a)$. Таким образом направленность УЗ-поля тем выше (угол φ_p меньше), чем больше произведение af .

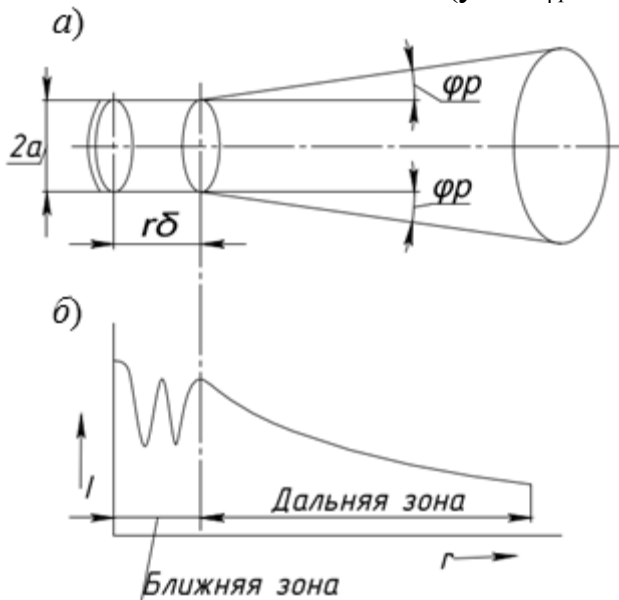


Рисунок 3.2 – Структура ультразвукового поля излучателя

Изложенное выше об угле расхождения φ_p справедливо для дальней зоны, или зоны Фраунгофера. В ближней зоне (зоне Френеля), в пределах которой отсутствует расхождение УЗ-поля, амплитуда колебаний изменяется как вдоль оси (рисунок 3.2, б), так и по сечению пучка, а УЗ-волна при этом распространяется почти без расхождения.

Протяженность ближней зоны r_0 для цилиндрического излучателя

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

Из последней формулы видно, что увеличение диаметра излучателя, сужая направленность пучка, увеличивает ближнюю зону преобразователя.

3.1.5 Отражение УЗ-волн от несплошностей.

Способность УЗ-волн на границе раздела сред с различными скоростями волн C и плотностью материала ρ служит основой для их использования в эхо-импульсном методе контроля. При падении волны на поверхность раздела двух сред часть энергии проходит во вторую среду, а часть отражается в первую. Если УЗ-волна перпендикулярна к границе сред, то проходящая и отраженная волны будут такого же типа, что и падающая. Коэффициент отражения R как отношение интенсивностей отраженной и падающей волн зависит от соотношения удельных акустических сопротивлений $Z_1 = \rho_1 C_1$ и $Z_2 = \rho_2 C_2$ первой и второй сред:

$$R = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2.$$

Чем больше разница в акустических сопротивлениях Z_1 и Z_2 , тем больше интенсивность отражённой волны.

Если на пути распространения ультразвука находится несплошность с поперечным размером меньшим, чем длина УЗ-волны, то из-за явления дифракции существенных отражений на границе раздела сред не будет. По этой причине для выявления мелких дефектов применяют УЗК с частотой более 2,5 МГц.

3.1.6 Затухание ультразвука.

Коэффициент затухания δ в формулах (3.3) и (3.4) возрастает с увеличением частоты не линейно, а в повышенной степени. Причем коэффициент затухания различен для разных материалов и складывается из коэффициентов поглощения δ_n и рассеяния δ_p : $\delta = \delta_n + \delta_p$.

Поглощённая звуковая энергия переходит в теплоту. Рассеянная энергия остаётся по форме звуковой, но уходит из направленного пучка, отражаясь от неоднородной среды. В однородных средах (пластмасса, стекло) затухание определяется главным образом поглощением ультразвука: $\delta_n > \delta_p$. Причем δ_n пропорционально либо f (стекло), либо f^2 (пластмассы).

В металлах рассеяние преобладает над поглощением: $\delta_n \gg \delta_p$. Причём δ_n пропорционально f , а δ_p пропорционально f^2 или f^4 . Коэффициент рассеяния в металлах зависит от соотношения средней величины зёрен \bar{D} и длины ультразвуковой волны. Увеличение размера зёрен приводит к росту затухания УЗК, при этом $\delta_p = \bar{D}^3 f^4$.

Так как с ростом частоты коэффициент затухания увеличивается, то при контроле объектов большой толщины используют низкие частоты (0,5...1,8 МГц). Так же поступают и при контроле крупнозернистых металлов.

Коэффициент затухания выражают либо в децибелах на метр (дБ/м), либо в неперах на метр (Нп/м). Затухание 1 Нп/м означает, что на расстоянии 1 м амплитуда волны уменьшается в e раз ($e = 2,718$ – основание натуральных логарифмов, или число Непера). Эти единицы связаны соотношением 1 Нп/м = 8,68 дБ/м.

В практике УЗ-дефектоскопии коэффициент затухания часто измеряют в неперах на сантиметр (Нп/см) или сантиметров в минус первой степени (см^{-1}).

3.1.7 Трансформация ультразвука.

При контроле сварных швов применяют, как правило, наклонные преобразователи с вводом УЗК под некоторым углом к вертикали. В общем случае при падении продольной волны наклонно под углом β к границе двух твердых сред происходит трансформация (расщепление) этой волны (рисунок 3.3, а).

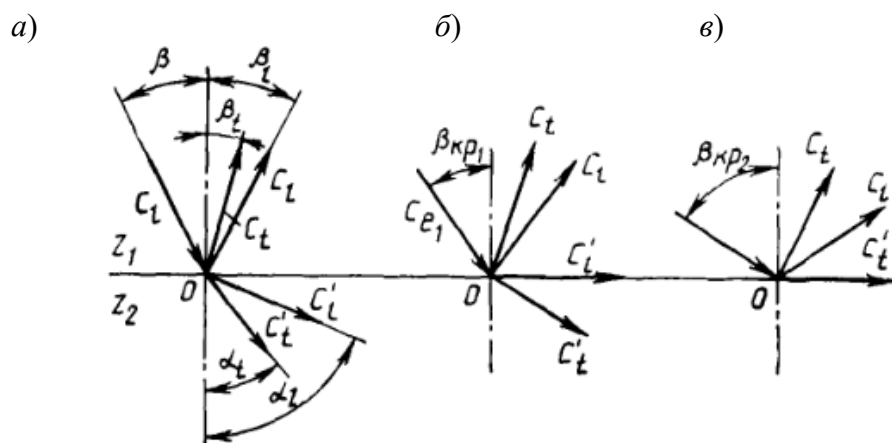


Рисунок 3.3 – Отражение и преломление продольной волны на границе раздела двух твёрдых сред

Возникают две преломлённые волны (продольная C'_l и поперечная C'_t) и две отраженные C_l и C_t . Углы преломления и отражения зависят от скоростей соответствующих волн в данных средах. Эту зависимость называют законом Снеллиуса. Записанный только для преломления волн этот закон имеет следующий вид:

$$\frac{\sin \beta}{C_l} = \frac{\sin \alpha_l}{C'_l} = \frac{\sin \alpha_t}{C'_t}.$$

При увеличении угла падения β , который соответствует углу призмы ПЭП в наклонных преобразователях, углы ввода УЗК α_l и α_t также меняются. Диаграмма как бы поворачивается против часовой стрелки вокруг точки 0 (рисунок 3.3, б, в). При этом сначала возможно исчезновение луча C'_l , а потом – луча C'_t . Углы β , при которых наблюдается исчезновение продольной, а затем поперечной волн в металле, называют первым и вторым критическими углами соответственно. Значению $\beta_{кр1}$ отвечает угол $\alpha_l = 90^\circ$, а значению $\beta_{кр2}$ – угол $\alpha_t = 90^\circ$.

При УЗ-дефектоскопии сварных швов во многих случаях целесообразно вводить в металл только поперечную волну. Поэтому угол призмы наклонных преобразователей выбирают обычно в интервале между двумя найденными выше критическими значениями: $(\beta_{кр1} + 3^\circ) < \beta < (\beta_{кр2} - 3^\circ)$.

Поправку на $2^\circ \dots 5^\circ$ вводят для большей помехозащищённости контроля. В первом случае от продольной, а во втором – от поверхностной волны.

3.2 Основные параметры контроля и стандартные образцы

Основные параметры ультразвукового контроля перечислены далее.

1 Длина волны или частота ультразвуковых колебаний.

2 Чувствительность (предельная и условная).

Предельная чувствительность контроля эхо-методом характеризуется минимальной эквивалентной площадью (в квадратных миллиметрах) отражателя, который ещё обнаруживается на заданной глубине в изделии при данной настройке аппаратуры.

Условная чувствительность характеризуется размерами и глубиной залегания выявляемых искусственных отражателей, выполненных в образце из материала с определёнными акустическими свойствами.

3 Положение точки выхода луча (стрела преобразователя).

Под стрелой преобразователя понимают расстояние от точки выхода наклонного преобразователя до его передней грани (рисунок 3.4).

В свою очередь точкой выхода называют точку пересечения акустической оси преобразователя с его рабочей поверхностью, а акустической осью – линию, соединяющую точки максимальной интенсивности акустического поля в дальней зоне преобразователя и её продолжения в ближней зоне.

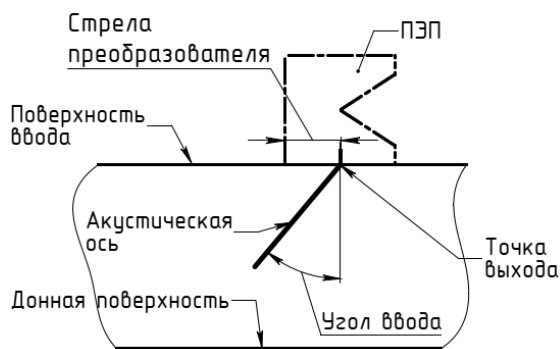


Рисунок 3.4 – Схема УЗ-контроля

4 Угол ввода ультразвукового луча в металл (рисунок 3.4).

Под углом ввода понимают угол между нормалью к поверхности ввода и линией, соединяющей центр цилиндрического отражателя с точкой выхода при установке преобразователя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отражателя наибольшая.

5 Погрешность глубиномера (погрешность измерения расстояния до отражателя).

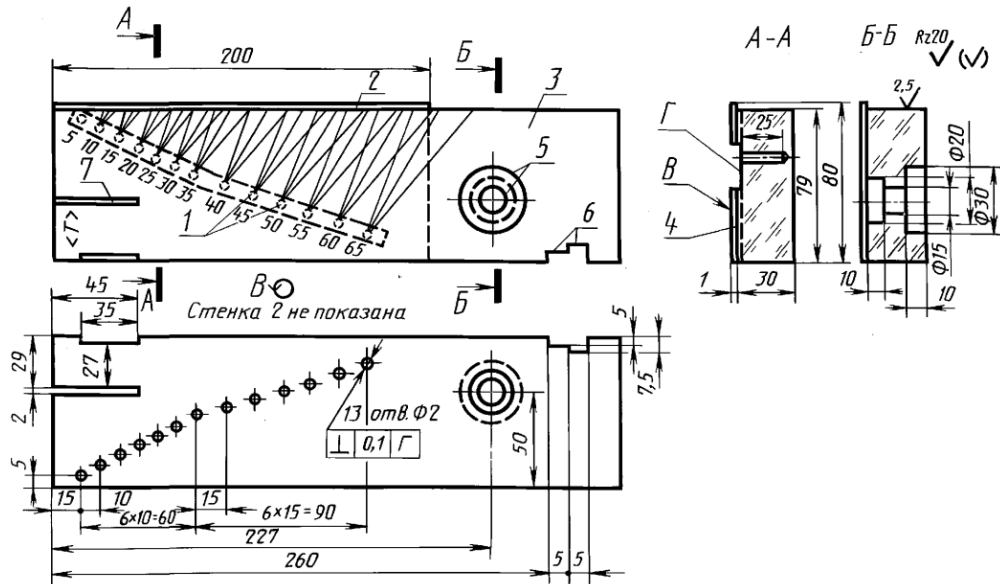
6 Мертвая зона. Под мертвой зоной понимают неконтролируемую зону, прилегающую к поверхности ввода и (или) донной поверхности.

7 Разрешающая способность по дальности (лучевая) и (или) по фронту.

Под лучевой разрешающей способностью понимают способность акустического дефектоскопа разделять два дефекта, расположенных по акустической оси ПЭП или вблизи неё на близких глубинах залегания.

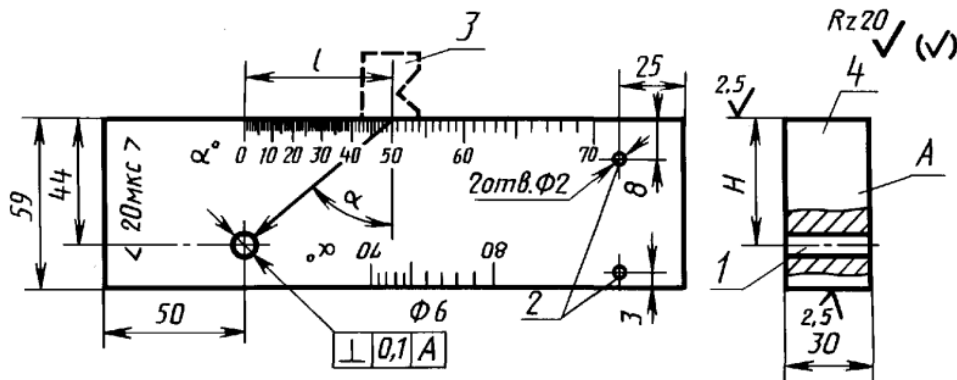
Под фронтальной разрешающей способностью понимают способность акустического дефектоскопа разделять два дефекта, расположенных близко друг к другу на одной глубине залегания.

Параметры перечислений 1–6 следует проверять по стандартным образцам СО-1 (рисунок 3.5), СО-2 (рисунок 3.6), СО-3 (рисунок 3.7).



1 – отверстия для определения условной чувствительности; 2 – стенка; 3 – основание; 4 – защитная прокладка; 5 – отверстия для определения разрешающей способности; 6 – пазы для определения разрешающей способности; 7 – паз для определения погрешности глубиномера; T – время, измеренное до целых значений микросекунд

Рисунок 3.5 – Стандартный образец СО-1



1 – отверстие для определения угла ввода луча, ширины основного лепестка диаграммы направленности, условной и предельной чувствительности; 2 – отверстие для проверки мёртвой зоны; 3 – преобразователь; 4 – блок из стали марки 20 или стали марки Ст3

Рисунок 3.6 – Стандартный образец СО-2

Образец СО-1 применяют для определения условной чувствительности, проверки разрешающей способности и погрешности глубиномера дефектоскопа.

Условную чувствительность по стандартному образцу СО-1 выражают наибольшей глубиной (в миллиметрах) расположения цилиндрического отражателя, фиксируемого индикаторами дефектоскопа.

Образец СО-2 применяют для определения условной чувствительности, мёртвой зоны, погрешности глубиномера, угла ввода луча, ширины основного

лестка диаграммы направленности, импульсного коэффициента преобразования при контроле соединений из малоуглеродистой и низколегированной сталей, а также для определения предельной чувствительности.

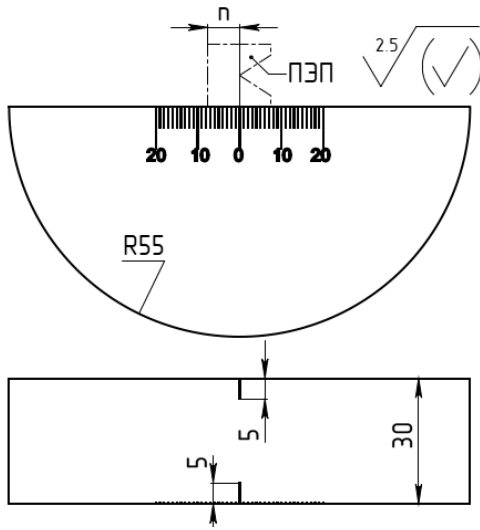


Рисунок 3.7 – Стандартный образец СО-3

Условную чувствительность по стандартному образцу СО-2 выражают разностью в децибелах между показанием аттенюатора при данной настройке дефектоскопа и показанием, соответствующим максимальному ослаблению, при котором цилиндрическое отверстие диаметром 6 мм на глубине 44 мм фиксируется индикаторами дефектоскопа

Стандартный образец СО-3 следует применять для определения точки выхода ультразвукового луча и стрелы преобразователя *n*.

Кроме стандартных образцов СО-1 и СО-2, для определения чувствительности контроля используют тест-образцы с имитаторами дефектов (рисунок 3.8).

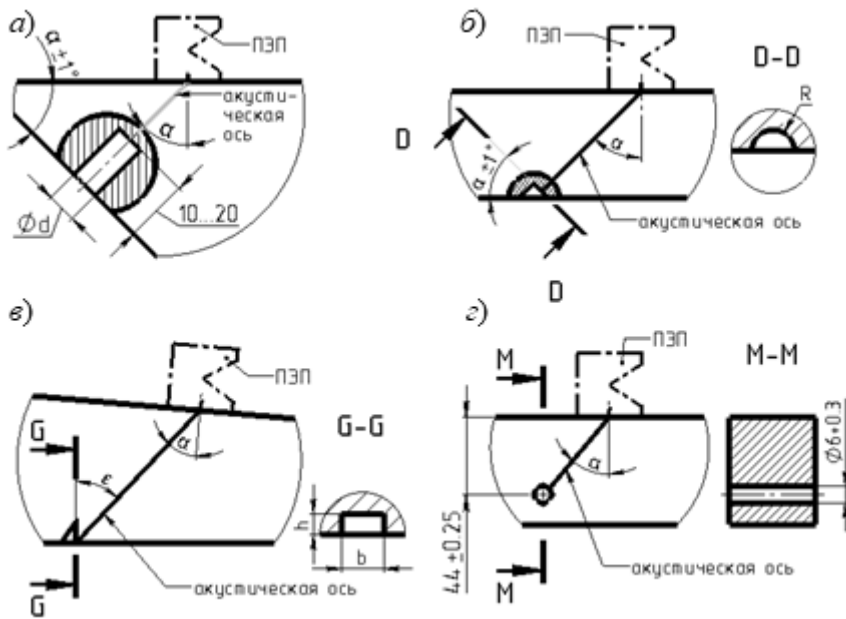


Рисунок 3.8 – Тест-образцы с эталонными отражателями

Тест-образцы изготавливаются той же толщины, кривизны и из материала той же марки, что и контролируемое изделие. На тест-образце не ближе 20 мм от краев изготавливают искусственные эталонные отражатели, по эквивалентной площади соответствующие требуемому уровню чувствительности.

На практике нашли применение четыре типа эталонных отражателей (см. рисунок 3.8): плоскдонное отверстие (*a*); сегментный (*б*); угловой, или зарубка (*в*); боковое сверление (*г*).

3.3 Схемы ультразвукового контроля сварных соединений

3.3.1 Контроль стыковых соединений.

Стыковые сварные соединения контролируют эхо-методом наклонным ПЭП с двух сторон шва и по одной поверхности стыка (рисунок 3.9). При этом применяют прямой ($m = 0$) и однократно отражённый лучи ($m = 1$).

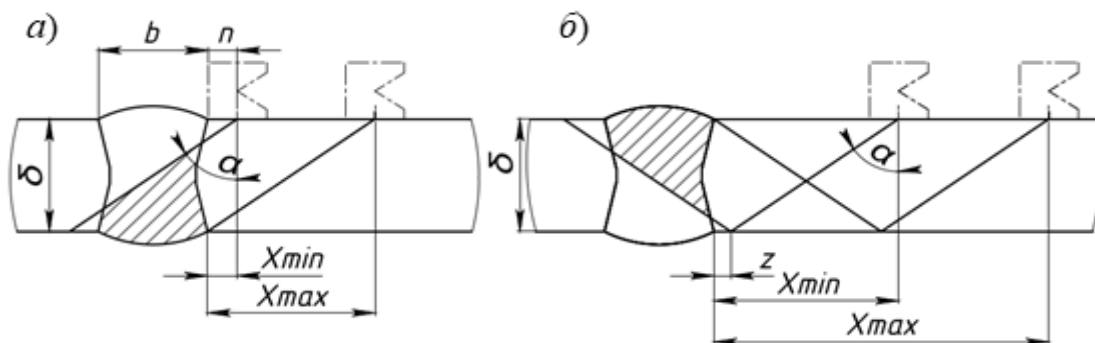


Рисунок 3.9 – Схемы контроля стыковых сварных соединений прямым (а) и однократно отражённым (б) лучом

Пределы поперечного перемещения X преобразователя рассчитывают по формулам:

$$X_{\min} = n; X_{\max} = \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha \text{ при } m = 0;$$

$$X_{\min} = z + \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha; X_{\max} = 2\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha \text{ при } m = 1.$$

Угол ввода луча α при любом значении m выбирают из условия пересечения оси симметрии шва акустической осью ПЭП на глубине $0,5\delta$. При этом угол ввода ПЭП определяют по следующим формулам:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2n) / \delta \text{ при } m = 0;$$

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2z) / \delta \text{ при } m = 1.$$

3.3.2 Контроль тавровых и угловых соединений.

При контроле угловых швов с К-образной разделкой или без неё, но с полным проплавлением стенки возможно применение трех схем (рисунок 3.10). В зависимости от доступа к швам контроль ведут наклонными (схемы I и II на рисунке 3.10), а также прямыми (схема III на рисунке 3.10) преобразователями.

Одним из основных условий, обеспечивающих выявление дефектов по сечению шва, является правильный выбор угла ввода УЗ-луча α .

Целесообразно использовать ПЭП с такими углами α и стрелой преобразователя n , при которых обеспечивается контроль нижней части шва прямым, а верхней – однократно отраженным лучом. Это возможно, если центральный луч преобразователя при расположении его вплотную к шву проходит через середину шва или выше её (при толщинах шва менее 10 мм допускается прохождение центрального луча ниже середины сечения шва не более чем на 1 мм).

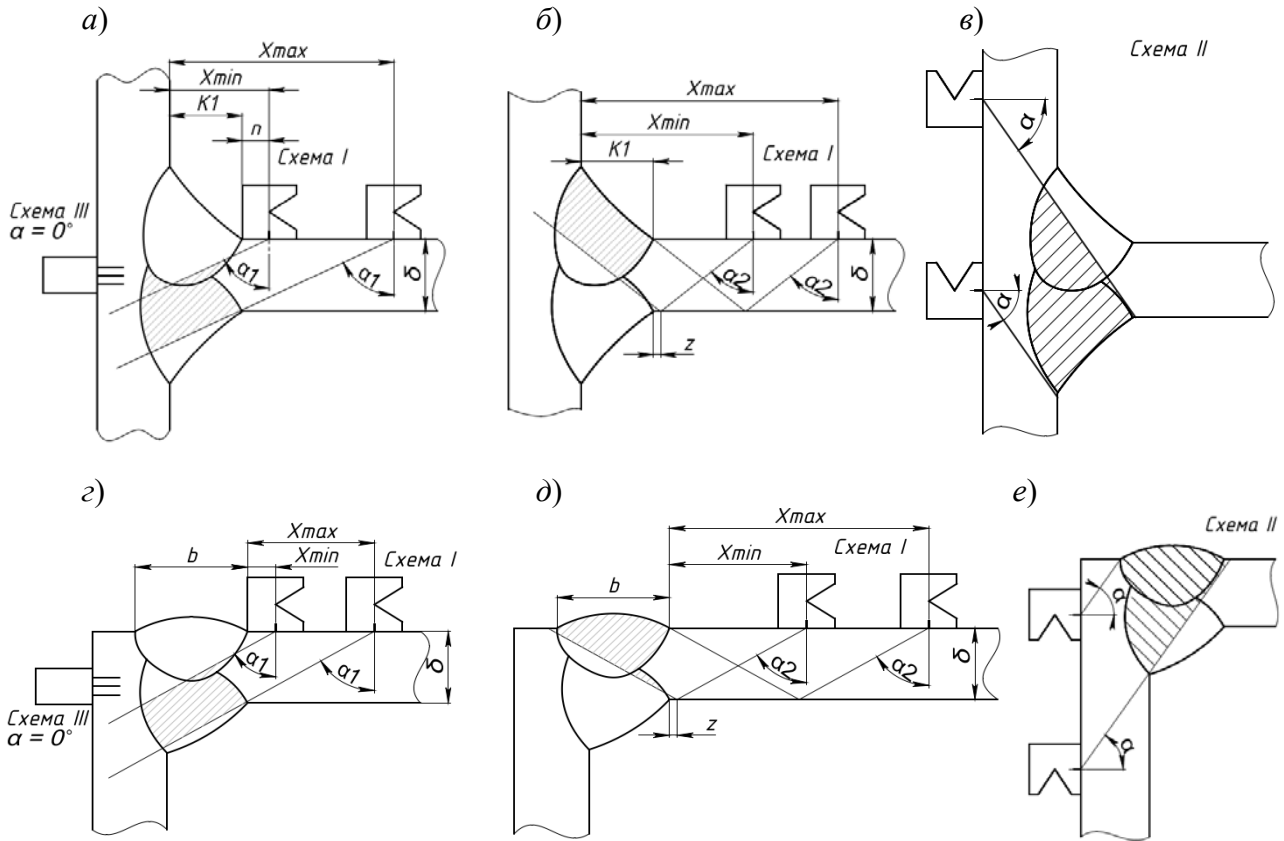


Рисунок 3.10 – Схемы контроля тавровых (а, б, в) и угловых (з, д, е) сварных соединений

При контроле нижней части шва (см. рисунок 3.10, а, з) это условие может быть проверено для таврового соединения по формуле

$$\alpha_1 \geq \arctg \frac{2K_1 + 2n}{\delta},$$

а для углового соединения – по формуле

$$\alpha_1 \geq \arctg \frac{b + 2n}{\delta}.$$

При контроле верхней части шва (см. рисунок 3.10, б, д) значения углов ввода ПЭП выбирают для таврового соединения по формуле

$$\alpha_2 \geq \arctg \frac{2K_1 + 2z}{\delta},$$

а для углового соединения – по формуле.

$$\alpha_2 \geq \arctg \frac{b + 2z}{\delta}.$$

Наилучшее выявление подповерхностных дефектов при контроле верхней части шва таврового соединения достигается в случае если

$$\alpha_2 \geq 90 - \left[\operatorname{arctg} \frac{K_2}{K_1} + 7 \right].$$

Если контроль прямым и однократно отражённым лучом невозможен, то необходимо увеличить угол ввода или производить контроль однократно и двукратно отражённым лучом.

После нахождения оптимальных углов ввода рассчитывают пределы перемещения преобразователя от X_{\min} до X_{\max} .

При контроле таврового соединения прямым и однократно отражённым лучом $X_{\min} = K_1 + n_0$, $X_{\max} = 2\delta \operatorname{tg} \alpha_2 + K_1$.

При контроле углового соединения $X_{\min} = n_0$, $X_{\max} = 2\delta \operatorname{tg} \alpha_2$.

3.3.3 Контроль нахлесточных соединений.

УЗ-контроль соединений, сваренных внахлестку, производится наклонными преобразователями на частоту 2,5...5 МГц, как правило, со стороны нижнего листа однократно отраженным лучом (рисунок 3.11, а).

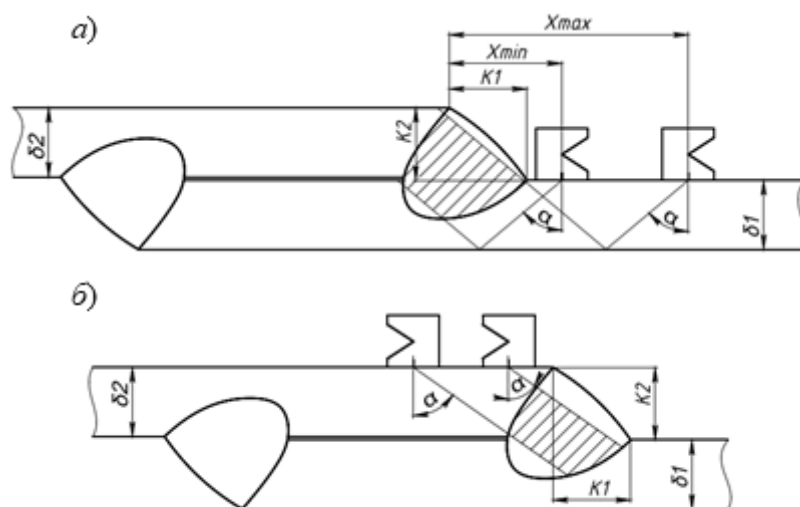


Рисунок 3.11 – Схемы контроля нахлесточных соединений со стороны нижнего (а) и верхнего (б) листов

Угол ввода луча выбирают из соотношений:

- если $K_1/K_2 < 1$, то $\beta = 30^\circ$;
- если $1 < K_1/K_2 < 1,5$, то $\beta = 40^\circ$;
- если $K_1/K_2 > 1$, то $\beta = 50^\circ$.

В случае ограниченной протяженности основного листа контроль следует вести преобразователем с максимально возможным углом ввода, определяемым по выражению

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max} = \frac{X_{\max} + 20}{2\delta_1}.$$

Для обеспечения прозвучивания всего сечения шва преобразователь перемещают в следующих пределах:

$$X_{\min} = 2\delta_1 + \operatorname{tg} \alpha;$$

$$X_{\max} = 2\delta_1 \operatorname{tg} \alpha + K_1.$$

Для лучшего обнаружения дефектов, залегающих в зоне кромки нижнего пояса, рекомендуется дополнительное прозвучивание со стороны верхнего листа (рисунок 3.11, б) ПЭП с углом призмы 30° с частотой от 2,5 до 5 МГц.

3.4 Задания к практическому занятию

На практическом занятии студентам предлагается решить задачи, касающиеся природы УК-волн, а также определить параметры ультразвукового контроля стыковых, тавровых и нахлесточных сварных соединений. Примеры заданий приведены ниже.

Задание 1

Определить скорость УЗК в стали. Для стали $E = 20,4 \cdot 10^{10}$ Па; $G = 8 \cdot 10^{10}$ Па; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Задание 2

Определить приближённо длину УЗ-волн в стали при частоте $f = 2,5$ МГц, принимая $C_l \approx 6$ мм/мкс и $C_t \approx 3,3$ мм/мкс.

Задание 3

Определить критические углы для пары плексиглас – сталь (контактный вариант контроля) и вода – сталь (иммерсионный вариант). При расчете принять следующие значения скоростей УЗК:

для стали $C_l^{cm} = 5,9$ мм/мкс, $C_t^{cm} = 3,3$ мм/мкс;

для плексигласа $C_t^{nl} = 2,7$ мм/мкс;

для воды $C_l^6 = 1,5$ мм/мкс.

Задание 4

Контролируется стыковое сварное соединение С17 по ГОСТ 14771-76 с размерами, указанными на рисунке 3.12, а. Материал – сталь 20. Используется ПЭП с частотой $f = 5$ МГц и стрелой преобразователя $n_0 = 5$ мм.

Выбрать схему прозвучивания и определить значения угла ввода, а также пределов поперечного перемещения X_{\min} , X_{\max} преобразователя.

Задание 5

Контролируется угловое соединение У9 по ГОСТ 14771-76 с размерами, указанными на рисунке 3.12, б. Материал – сталь 20. Используется ПЭП с частотой $f = 5$ МГц и стрелой преобразователя $n_0 = 5$ мм.

Выбрать схему прозвучивания и определить значения угла ввода, а также пределов поперечного перемещения X_{\min} , X_{\max} преобразователя.

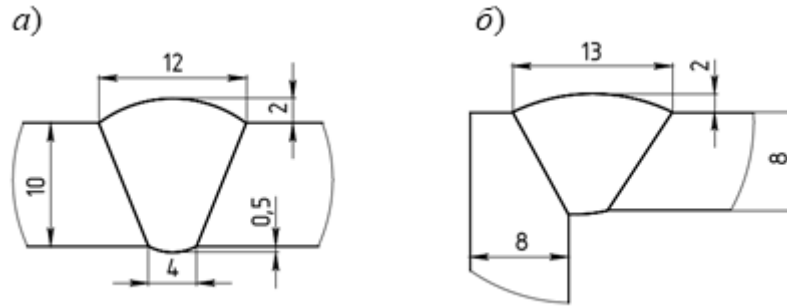


Рисунок 3.12 – Сварные соединения по ГОСТ 14771–76; тип С17 (а) и тип У9 (б)

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение термина «акустический неразрушающий контроль».
- 2 Какие частоты колебаний характерны для ультразвуковых волн?
- 3 Как связаны между собой длина волны λ и частота УЗ-колебаний f ?
- 4 Что такое фронт волны?
- 5 В каких средах (материалах) могут распространяться продольные волны, а в каких – поперечные?
- 6 Что определяет скорости продольной и поперечной волны?
- 7 Укажите значение соотношения скоростей поперечной и продольной волн.
- 8 Охарактеризуйте волны Рэлея, волны Лэмба, волны Лява.
- 9 Что такое интенсивностью ультразвука I и от чего она зависит?
- 10 Что такое удельное акустическое сопротивление Z от чего оно зависит?
- 11 Что такое коэффициент затухания ультразвука и как он изменяется с ростом частоты? Записать формулы затухания амплитуды и интенсивности ультразвука.
- 12 Как определяется величина относительного ослабления амплитуды и интенсивности ультразвука?
- 13 Во сколько раз уменьшилась амплитуда, если волна ослабла на 6 дБ?
- 14 Чем обусловлено затухание УЗК в углеродистых сталях?
- 15 Что такое угол расхождения φ_p ультразвукового поля и от чего он зависит? Как определяется протяжённость r_0 ближней зоны ультразвукового поля для цилиндрического излучателя?
- 16 Что такое коэффициент отражения R и от чего оно зависит?
- 17 Что такое дифракция ультразвука и как она влияет на выявление мелких дефектов?
- 18 Как изменится угол преломления прошедшей волны при увеличении угла падения волны на границу двух сред? Что называют первым и вторым критическими углами $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$?
- 19 Дать определение терминов «предельная чувствительность» и «условная чувствительность».

- 20 Дать определение терминов «стрела преобразователя», «точка выхода преобразователя», «акустическая ось преобразователя».
- 21 Дать определение терминов «угол ввода ультразвукового луча в металл», «мертвая зона», «разрешающая способность по дальности (лучевая) и по фронту».
- 22 Какие параметры следует проверять по стандартному образцу СО-1?
- 23 Какие параметры следует проверять по стандартному образцу СО-2?
- 24 Какие параметры следует проверять по стандартному образцу СО-3?
- 25 Для чего используют тест-образцы с искусственными эталонными отражателями? Укажите типы таких эталонных отражателей.
- 26 Приведите схемы УЗ-контроля стыковых соединений и формулы для определения поперечного перемещения ПЭП и угла ввода.
- 27 Приведите схемы УЗ-контроля тавровых, угловых соединений и приведите формулы для определения поперечного перемещения ПЭП и угла ввода.
- 28 Приведите схемы УЗ-контроля нахлесточных соединений и формулы для определения поперечного перемещения ПЭП и угла ввода.

Список литературы

- 1 **ГОСТ 21105–89.** Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Москва: Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.
- 2 **ГОСТ ISO 17638–2018.** Неразрушающий контроль сварных соединений. Магнитопорошковый контроль. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 17 с.
- 3 **ГОСТ 23055–78.** Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля. – Москва: Госстандарт России, 1991. – 8 с.
- 4 **СТБ 1428–2003.** Соединения сварные трубопроводов и металлоконструкций. Радиографический метод. – Минск: БелГИСС, 2004. – 34 с.
- 5 **ГОСТ ISO 17636–1–2017.** Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Ч. 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением плёнки. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 36 с.
- 6 **СТБ ЕН 1712–2004.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Границы допустимости. – Минск: Госстандарт, 2004. – 10 с.
- 7 **ГОСТ 14782–86.** Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 27 с.

Приложение А (справочное)

Размеры эталонов чувствительности

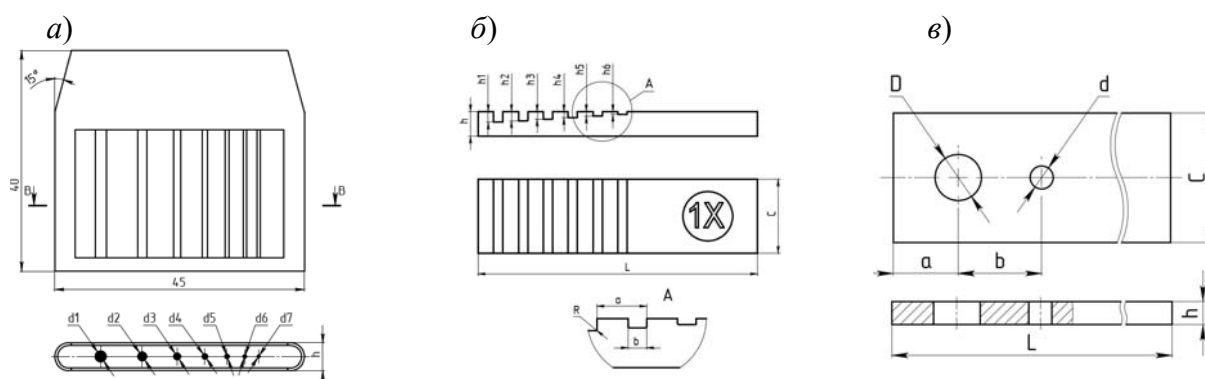


Рисунок А.1 – Эскизы проволочного (а), канавочного (б) и пластинчатого (в) эталонов чувствительности

Таблица А.1 – Размеры проволочного эталона чувствительности

В миллиметрах

Номер эталона	$d1$	$d2$	$d3$	$d4$	$d5$	$d6$	$d7$	h
1	0,200	0,160	0,125	0,100	0,080	0,063	0,050	1,200
2	0,400	0,320	0,250	0,200	0,160	0,125	0,100	1,400
3	1,250	1,000	0,800	0,630	0,500	0,400	0,320	2,200
4	4,000	3,200	2,500	2,000	1,600	1,250	1,000	5,000

Таблица А.2 – Размеры канавочного эталона чувствительности

В миллиметрах

Номер эталона	$h1$	$h2$	$h3$	$h4$	$h5$	$h6$	h	R	a	b	c	L
1	0,60	0,5	0,40	0,3	0,20	0,10	2	0,1	2,5	0,5	10	30
2	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,50	4	0,2	4,0	1,5	12	45
3	4,00	3,5	3,00	2,5	2,00	1,50	6	0,3	6,0	3,0	14	60

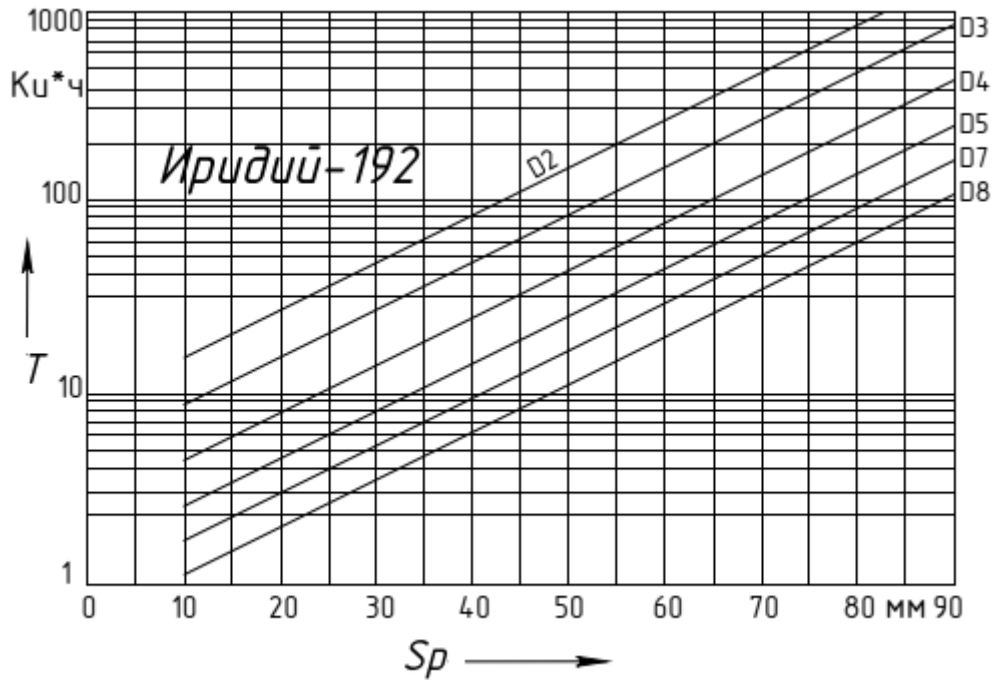
Таблица А.3 – Размеры пластинчатого эталона чувствительности

В миллиметрах

Номер эталона	h	D	d	a	b	C	L
1	0,1	0,2	0,1	5	5	10	25
2	0,2	0,4	0,2				
3	0,3	0,6	0,3				
4	0,4	0,8	0,4				
5	0,5	1,0	0,5				
6	0,60	1,2	0,60	6	7	12	35
7	0,75	1,5	0,75				
8	1,00	2,0	1,00				
9	1,25	2,5	1,25				
10	1,5	3,0	1,5	7	9	14	45
11	2,0	4,0	2,0				
12	2,5	5,0	2,5				

Приложение Б (справочное)

а)



б)

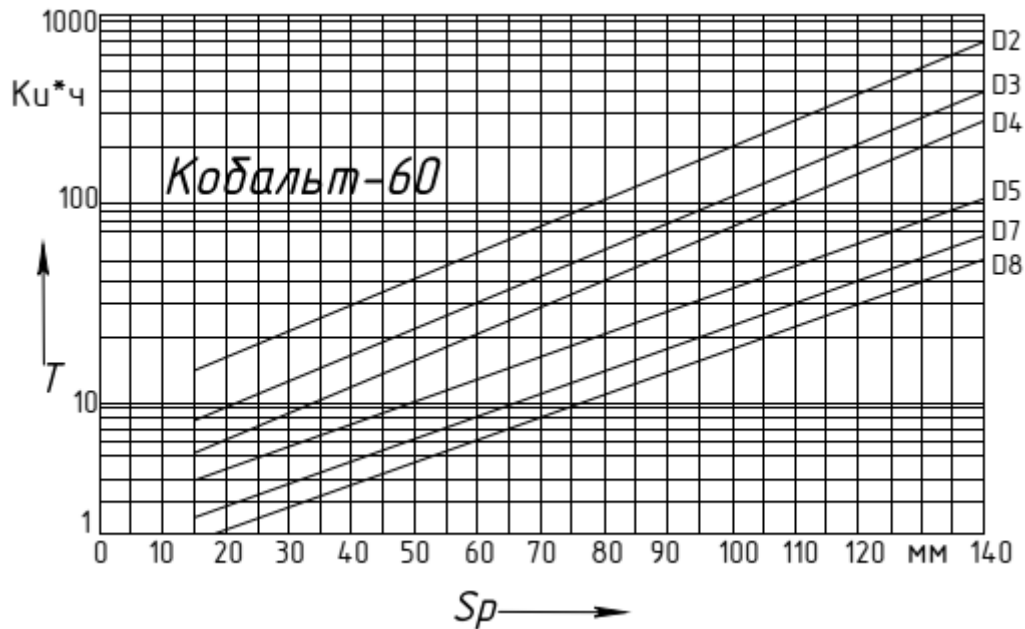


Рисунок Б.1 – Номограммы для определения экспозиции T в зависимости от радиационной толщины Sp при использовании плёнки AGFA Structurix, а в качестве источника излучения – радиоизотопов иридия-192 (а) и кобальта-60 (б)

Условия экспонирования: плёнка AGFA Structurix, свинцовые экраны; фокусное расстояние – $F = 1$ м; оптическая плотность $D = 2,0$.

Приложение В (справочное)

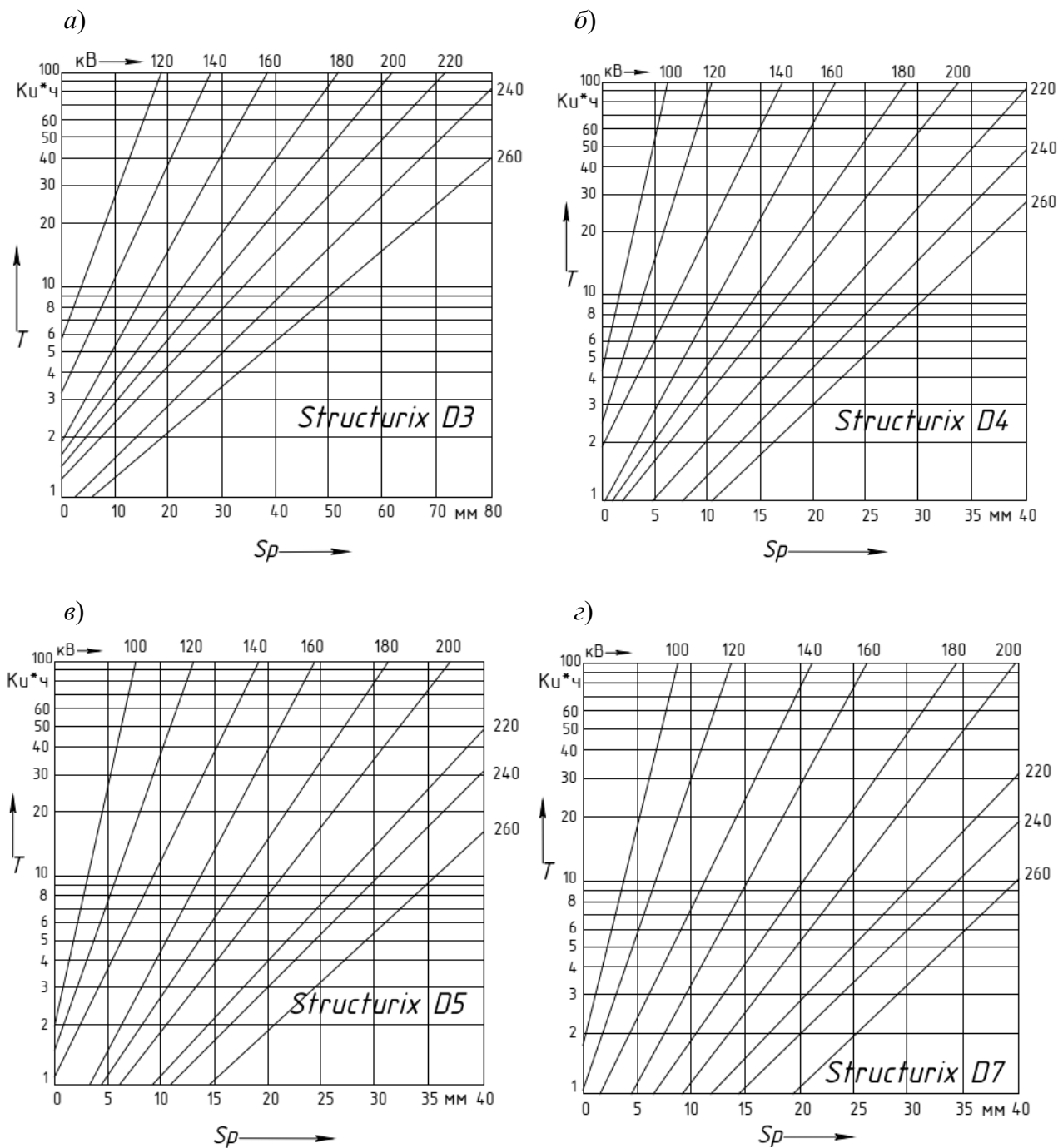


Рисунок В.1 – Номограммы для определения экспозиции T в зависимости от радиационной толщины Sp при использовании рентгеновского излучения и плёнки AGFA Structurix

Условия экспонирования: плёнка AGFA Structurix, свинцовые экраны; фокусное расстояние – $F = 1$ м; оптическая плотность $D = 2,0$.

Приложение Г (справочное)

Технические характеристики некоторых рентгеновских аппаратов и гамма-дефектоскопов

Таблица Г1 – Основные технические характеристики рентгеновских аппаратов

Тип аппарата	Диапазон напряжения, кВ	Максимальный анодный ток, мА	Размер фокусного пятна, мм	Размер рентгеновского излучателя, мм
РУП-120-5-1	50...20	5	2 × 2	300 × 250 × 540
РАП-160-6П	50...160	6	1,2 × 3,5	Ø 300 × 805
РУП-200-5-2	70...200	5	2 × 2,5	270 × 450 × 750
РАП-300-5Н	100...300	5	3 × 3	Ø 300 × 1250
РАП-150-7	20...150	7	1,5 × 1,5	Ø 135 × 500
	35...150	10	Ø 5	Ø 270 × 880
РУП-150/300-1	32...150	2	Ø 0,3...1,4	Ø 270 × 900
	70...250	10	4 × 4	195 × 340 × 720

Таблица Г2 – Технические характеристики некоторых гамма-дефектоскопов

Дефектоскоп	Источник излучения		Период полураспада	Активность		Гамма-постоянная, Р · см ² / (мКи · ч)	Диаметр активной части ф, мм	Масса радиационной головки, кг	Толщина просвечиваемого металла, мм
	Изотоп	Тип источника		ГБк	Ки				
Стапель-5М	Ir-192	ГИИД-1	74,5 сут	44	1,2	4,7	0,5	8	6...60
		ГИИД-2		140	3,9		1,0		
		ГИИД-3		430	11,6		1,5		
Гамма-рид-170/400	Tm-179	ИГИ-Ту-3	129 сут	16000	432	0,3	9,0	8	1...40
Гамма-рид-17/400	Cs-137	ГИД-Ц-1	30,2 года	64	1,74	3,2	3,5	8	1...40
Гамма-рид-60/40	Co-60	ГИК-2-6	5,7 года	1200	33,4	2,4950	4	145	30...200