

Круглова Екатерина Владимировна

**Разработка и исследование
методов радиографического контроля
глубины дефектов сварных соединений**

**Специальность 05.02.11 –
«Методы контроля и диагностики в машиностроении»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2006

Работа выполнена в ОАО «Уралмашзавод» и на кафедре физических методов и приборов контроля качества Уральского государственного технического университета – УПИ

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
В.С. Кортюв

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.К. Кулешов
кандидат технических наук, доцент
В.И. Шумяков

Ведущее предприятие: Институт машиноведения УрО РАН

Защита состоится «26» февраля 2006 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при Институте физики металлов УрО РАН по адресу:
620041, г. Екатеринбург, ГСП-170, ул. С. Ковалевской, 18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики металлов УрО РАН

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физ.-мат. наук



Н.Н. Лошкарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

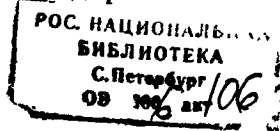
Актуальность работы. Среди продукции предприятий машиностроения большой объем занимают сварные металлоконструкции, в том числе для изготовления машин, работающих в тяжелых и опасных условиях. Такие машины подлежат особому контролю Госгортехнадзора России, Госатомнадзора России и других государственных органов, как на стадии изготовления, так и при эксплуатации. Неисправность этих машин может привести к серьезным авариям и техногенным катастрофам, в том числе с человеческими жертвами.

В этой связи все материалы, части и механизмы ответственных изделий подвергаются контролю и испытаниям. Одним из важнейших видов контроля, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации, является неразрушающий. В промышленности широко используются акустические, магнитные, радиационные, капиллярные, вихретоковые методы контроля. В их числе распространенный и традиционный метод неразрушающего контроля – радиографический. Он основан на регистрации на рентгеновскую пленку ионизирующего излучения после его взаимодействия с объектом контроля и анализе полученного изображения.

Радиографический контроль уже давно стал применяться в промышленности (первая рентгеновская лаборатория, предназначенная исключительно для промышленных исследований, была организована в 1925 г.) и до настоящего времени является неотъемлемой частью производственного процесса.

Один из существенных недостатков радиографического контроля заключается в том, что на снимке получается плоскостное изображение дефекта, и, как следствие, невозможно определить размер выявленного дефекта в плоскости, перпендикулярной снимку. Знание этого параметра позволило бы получить полную информацию о дефекте, помогло бы в принятии решения о допуске изделия с данным дефектом в дальнейшее производство или эксплуатацию. При недопустимости дефекта или необходимости его исправления глубина дефекта является одним из главных факторов, определяющих выбор способа и объем работ по исправлению дефекта.

Ранее предлагались разные способы решения этой проблемы. Одним из широко применимых в промышленности методов было визуальное сравнение плотностей почернения дефекта и канавок эталона чувствительности.



Однако с развитием метрологического обеспечения способов измерения этот метод был запрещен как субъективный и дающий большую погрешность. Несмотря на то, что из нормативных документов на изготовление различных видов продукции глубина дефекта как показатель его допустимости была исключена, задача по ее определению осталась актуальной.

Существующая система оценки допустимости такого дефекта сварного шва, как непровар, только по одному параметру (длине его изображения на рентгеновском снимке) спорна, т.к. очень глубокие непровары могут допускаться без исправления, и, наоборот, очень неглубокие непровары бракуют, исправляют и снова просвечивают. По мнению конструкторов сварных металлоконструкций непровары глубиной 5-15 % от свариваемой толщины для некоторых категорий сварных швов вполне допустимы и не снижают работоспособности сварной конструкции.

Успехи, достигнутые в последние годы в развитии таких областей, как электроника и вычислительная техника, оказали глубокое воздействие на системы радиационного неразрушающего контроля и, как следствие, привели к увеличению возможностей получения количественных характеристик дефектности материалов и изделий. Это дало новый толчок к решению проблемы определения основных характеристик, выявляемых при радиографическом контроле дефектов.

Цель работы – разработать, исследовать и апробировать метод определения размера дефекта в направлении просвечивания при радиографическом контроле крупногабаритных сварных металлоконструкций в тяжелом машиностроении.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен и обоснован новый способ определения по радиографическому снимку глубины дефектов сварного шва с учетом их геометрических параметров (ширины и ориентации) и характеристик их изображения на пленке (контраст и нерезкость).
2. Изучен и применен эффект уменьшения контраста изображения для дефектов, у которых ширина меньше или равна нерезкости изображения.
3. Разработаны компьютерные программы Weld.exe и Welding.exe для расчета характеристик непровара в корне и по сечению шва соответственно.
4. Предложен новый метод определения по радиографическому снимку глубины залегания малоконтрастных дефектов типа шлаковых включений.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный и апробированный радиографический метод определения глубины дефектов сварного шва.
2. Обоснование выбора двух типов непровара сварного шва (в корне и по сечению шва) в качестве моделей дефектов.
3. Анализ вклада рассеянного излучения в формирование радиационного изображения и его влияние на погрешность расчета глубины дефекта.
4. Результаты экспериментального исследования глубины залегания дефекта как одного из факторов, влияющих на точность расчета глубины дефекта по радиографическому снимку.

Достоверность результатов подтверждается многократным проведением экспериментов на различных образцах с искусственными и реальными дефектами, воспроизводимостью экспериментальных данных, подтверждением данных, приведенных в литературе, использованием при анализе полученных результатов современных представлений в области радиографического контроля.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования предложенного метода расчета глубины дефекта сварного шва при радиографическом контроле сварных конструкций любой конфигурации и любого назначения. В ОАО «Уралмашзавод» разработанный способ внедрен при радиографическом контроле сварных соединений ковшей и стрел шагающих экскаваторов, цилиндров дробильного оборудования и других изделий.

Результаты исследований, изложенных в диссертации, использованы в учебном курсе «Радиационный контроль», читаемом в Уральском государственном техническом университете – УПИ для студентов специальности 19.02.00 «Методы и приборы контроля качества и диагностики»

Личный вклад. Автор принимал участие в обсуждении результатов работы и написании статей. При непосредственном участии Кругловой Е.В. получена основная часть экспериментального материала. Кроме того, при непосредственном участии автора созданы имитаторы дефектов, разработан алгоритм обработки данных, рассчитаны погрешности измерений.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 64 наименований. Работа содержит 155 страниц, в том числе 98 страниц основного текста, 6 таблиц, 62 рисунка и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, определена цель работы, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены защищаемые положения.

Первая глава содержит литературный обзор, касающийся вопросов радиационной дефектоскопии сварных металлоконструкций. Описаны процессы образования дефектов сварного шва и их влияние на работоспособность изделий. Подробно обсуждаются вопросы формирования радиационного изображения, влияния различных факторов на выявляемость дефектов, методы определения геометрических размеров дефектов.

Анализ работ, посвященных изучению проблем определения глубины дефекта по радиографическому снимку, показал, что при традиционном радиографическом контроле определяются размеры дефекта в плоскости снимка: его длина и ширина. Однако в нормативно-технической документации существуют нормы на допустимое значение глубины дефекта, в основном для непроваров сварных швов.

В то же время известные радиографические методы контроля глубины дефекта в направлении просвечивания не дают полного решения этой задачи, т.к. работают не во всех диапазонах толщин. Так, широко известный фотометрический метод применим только для малых плотностей почернения, поэтому чаще всего используется в исследовательских целях. Кроме того, в нем не решен вопрос определения глубины узких дефектов, что связано с влиянием рассеянного излучения.

При традиционной радиографии рассматривается диапазон энергий фотонов проникающего излучения до 1 МэВ. Основными процессами взаимодействия квантов с веществом в этом диапазоне являются когерентное (Рэлеевское) и некогерентное (Комптоновское) рассеяние и фотоэлектрическое поглощение фотонов.

Стандартные радиографические методы основаны на использовании закона ослабления, при этом предполагается, что эффекты рассеяния приводят только к уменьшению контрастности радиографических изображений и не влияют на образ внутренней структуры.

На самом деле, как видно из рис. 1, распределение плотности почернения под прямоугольным отверстием не имеет прямоугольной формы, его края «размыты». Длина участка, на протяжении которого одно почернение переходит в другое, называется нерезкостью.

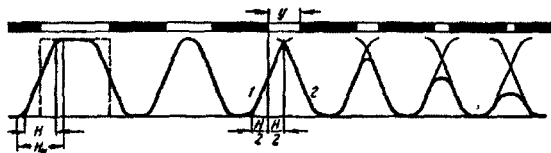


Рис. 1. Распределение плотности почернения под отверстиями.

Если размер дефекта велик по сравнению с величиной нерезкости, то ослабляющее действие краев дефекта будет приводить только к появлению нерезкости. Но с уменьшением размера дефекта все сильнее будет сказываться другое явление. Когда отверстие уменьшится настолько, что отдельные точки пленки будут испытывать одновременное ослабление излучения от обоих краев отверстия, то суммарная интенсивность излучения уменьшится (за счет снижения интенсивности рассеянного излучения), что приведет к уменьшению оптической плотности изображения дефекта, хотя интенсивность излучения, непосредственно падающая на пленку, останется без изменения. Этим эффектом объясняется занижение определяемой глубины дефекта для узких дефектов.

На основании литературного обзора поставлена указанная выше цель исследования и сформулированы задачи работы:

1. Исследовать влияние ширины дефекта, рассеянного излучения, глубины залегания на контраст его изображения на радиографической пленке и, соответственно, на расчет его глубины.
2. Разработать методику измерения радиационного контраста с учетом уменьшения величины контраста для узких дефектов.
3. Разработать и изготовить имитаторы основных типов дефектов сварных швов: непроваров в корне и по сечению сварного шва.
4. Исследовать вклад рассеянного излучения в формирование радиационного изображения.
5. Испытать разработанный способ определения глубины дефекта на искусственных и натуральных дефектах.

Во второй главе проанализированы существующие способы расчета глубины дефекта при радиографическом контроле и обоснована предложенная методика расчета.

Различные способы расчета глубины дефекта, основанные на законе ослабления излучения, не применимы на практике из-за того, что в формулы расчета входит линейный коэффициент поглощения излучения материалом дефекта. Дефект может быть заполнен воздухом или шлаком. Если коэффициент линейного ослабления воздуха известен, то состав шлака может меняться в зависимости от марки основного металла, типа электрода и газовой среды, в которой производится сварка. Расчет коэффициента линейного ослабления шлака становится отдельной сложной задачей.

В настоящее время предложено несколько методов определения глубины дефекта на основе экспериментальных данных. Оказалось, что эти формулы применимы только в ограниченных областях, а глубина непровара, определенная по этим формулам, занижена по сравнению с истинной величиной. Расхождение тем больше, чем меньше ширина непровара. Это объясняется влиянием геометрической нерезкости на контраст изображения дефекта.

Нерезкость изображения на радиографическом снимке определяют как расстояние на пленке, на котором плотность почернения изменяется от величины, характерной для одного постоянного поля плотности, до величины, характерной для другого поля. Она складывается из нескольких составляющих: геометрическая нерезкость; собственная нерезкость; нерезкость, вызываемая рассеянием излучения; динамическая нерезкость.

Динамическая нерезкость вызывается относительным движением источника, пленки или контролируемого объекта. Для того, чтобы избежать ее появления, следует жестко крепить источник излучения и исключать перемещение и вибрацию изделия и кассеты с пленкой. Поскольку чаще всего динамической нерезкости стараются избегать, в дальнейшем рассматривать ее мы не будем.

Геометрическая нерезкость (рис. 2) возникает вследствие того, что фокусное пятно источника излучения не является точечным.

Чем меньше дефект по ширине, тем сильнее влияние ослабляющего действия краев на контраст и тем меньше оптическая плотность почернения в месте расположения дефекта (рис. 1). Уменьшение же разности оптических плотностей дефекта и фона – это уменьшение контраста изображения дефекта. Когда контраст изображения дефекта упадет до порога контрастной чувствительности глаза, изображение дефекта перестанет восприниматься дефектоскопистом.

Собственная нерезкость пленок и экранов колеблется в пределах от 0,1 до 0,7 мм в зависимости от энергии излучения, величины зерна пленки и типа усиливающего экрана.

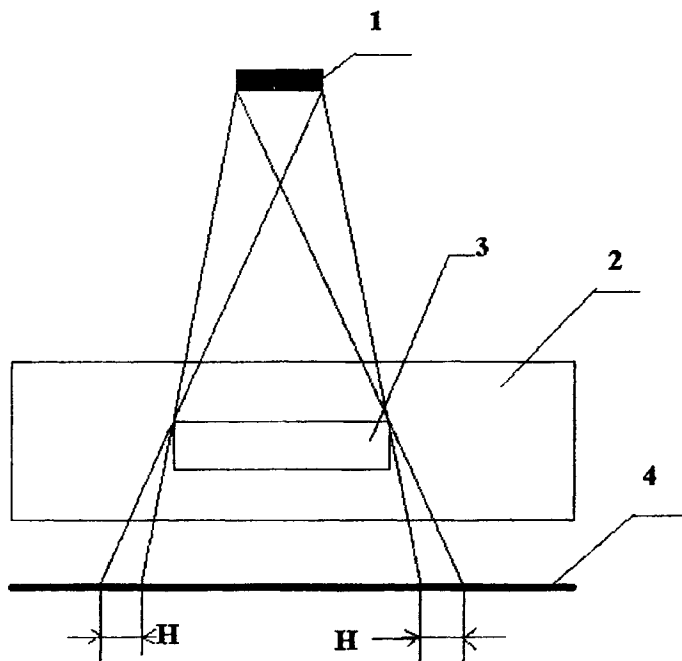


Рис 2. Схема формирования геометрической нерезкости
1 – фокусное пятно источника излучения
2 – контролируемый объект
3 – дефект
4 – радиографическая пленка
H – геометрическая нерезкость изображения

В облучаемом материале всегда возникает рассеянное излучение, которое также приводит к смазыванию изображения. Нерезкость, вызываемая рассеянием излучения, зависит от толщины и плотности просвечиваемого материала и энергии излучения. Однако полной оценки факторов, от которых зависит влияние рассеянного излучения на нерезкость, в литературе не приведено.

Общая нерезкость не является просто арифметической суммой всех рассмотренных нерезкостей, т.к. по характеру они различны. Общая нерезкость может быть выражена формулой Классена

$$H_{\text{общ}}^3 = H^3 + H_c^3 + H_p^3, \quad (1)$$

где H – геометрическая нерезкость,
 H_c – собственная нерезкость,
 H_p – нерезкость рассеяния.

Для практических целей чаще пользуются простым соотношением, по которому величина общей нерезкости отличается от значения по формуле (1) лишь на несколько процентов

$$H_{\text{общ}}^2 = H^2 + H_c^2 + H_p^2. \quad (2)$$

Следует отметить, что пока одна составляющая общей нерезкости намного больше другой, ее воздействие преобладает. Но доминирование большей составляющей прекратится, как только составляющие станут почти равными.

Для разработки нового способа расчета глубины дефекта по радиографическому снимку предложено объединить формулу, вытекающую из метода дефектометров, и соотношение между размерами дефекта, нерезкостью и потерей контраста. Первая формула:

$$\frac{h}{b} = \frac{D\delta}{D\varepsilon}, \quad (3)$$

где h – глубина непровара; b – глубина соответствующей бороздки дефектометра; D_δ – плотность почернения изображения дефекта; D_ε – плотность почернения изображения канавки эталона.

Второе соотношение:

$$\frac{S}{H} = \frac{K}{K_H}, \quad (4)$$

где S – ширина дефекта; H – нерезкость изображения дефекта; K – фактический контраст изображения дефекта; K_H – номинальный контраст изображения дефекта, т.е. разница оптических плотностей дефекта и фона при идеально резком изображении или при достаточно больших размерах дефекта.

Для анализа соотношения (4) разделим дефекты в зависимости от ширины на два типа и будем различать широкие дефекты, или дефекты 1-го рода ($S > H$), и узкие дефекты, или дефекты 2-го рода ($S \leq H$).

Для дефекта 1-го рода соотношение (4) не выполняется, т.к. очевидно, что фактический контраст изображения дефекта не может быть больше номинального контраста. В идеальном случае $K = K_H$, но из практики известно, что ширина дефекта может быть значительно больше нерезкости его изображения. Следовательно, соотношение (4) выполняется только для узких дефектов, или дефектов 2-го рода. Для таких дефектов $S/H \leq 1$, т.е. $K_H \geq K$, что подтверждает схему распределения плотностей почернения, приведенную на рис. 1.

Расчет характеристик непроваров 1-го рода по кривой плотности почернения дефекта в предлагаемом методе проводится с использованием аппроксимирующих прямых (рис. 3 и 4).

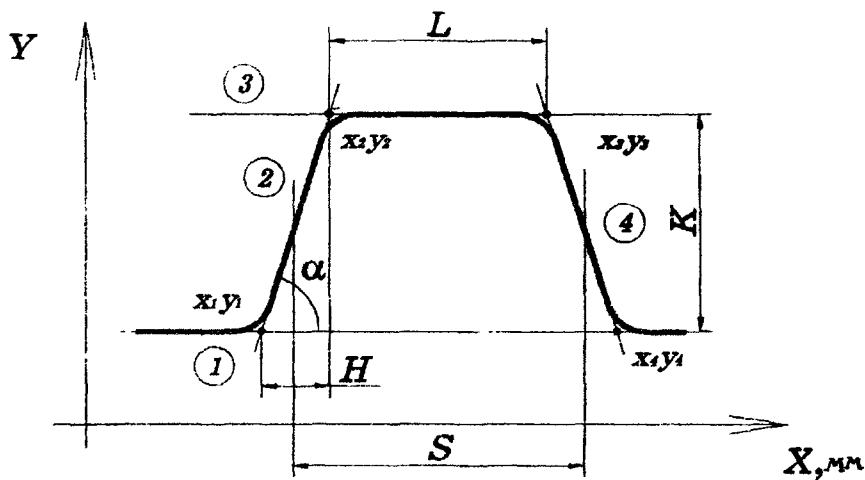


Рис. 3. Кривая плотности почернения широкого дефекта
 ось X — координата по сечению дефекта,
 ось Y — плотность почернения в относительных единицах,
 H — нерезкость,
 S — ширина дефекта,
 L — ширина верхнего горизонтального участка трапеции,
 K — контраст,
 α — угол наклона аппроксимирующей прямой
 x_1y_1 — координаты точек пересечения аппроксимирующих прямых

Кривые плотностей почернения аппроксимируются четырьмя прямыми:

$$1: y = y_1 \quad (5)$$

$$2: \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (6)$$

$$3: y = y_2 \quad (7)$$

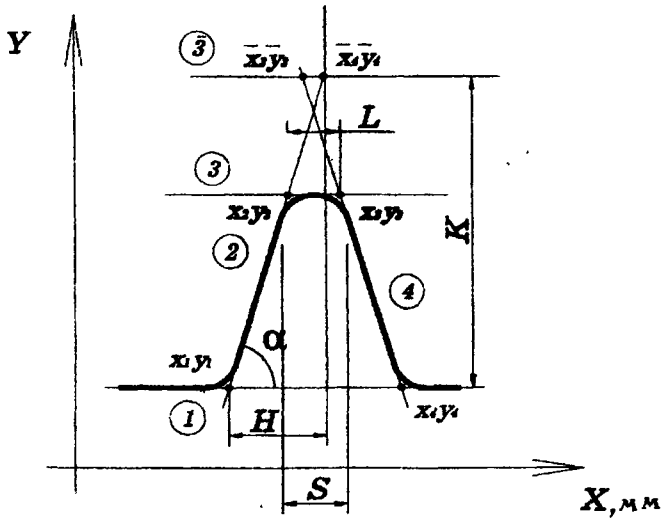


Рис. 4. Кривая плотности почернения узкого дефекта
Обозначения соответствуют приведенным на рис.3

$$4: \frac{x - x_4}{x_3 - x_4} = \frac{y - y_4}{y_3 - y_4} \quad (8)$$

Характеристики широкого дефекта рассчитаны по следующим формулам:

$$H = x_2 - x_1 \quad (9)$$

$$K = y_2 - y_1 \quad (10)$$

$$S = x_4 - x_2 = x_4 - x_1 - H \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (12)$$

Формула для расчета глубины широкого дефекта принимает вид

$$h = k_h \times K + b_h, \quad (13)$$

где k_h, b_h – коэффициенты.

Поскольку контраст изображения узкого дефекта зависит не только от его глубины, но и от ширины, то для расчета глубины такого дефекта необходимо восстановить значение контраста изображения дефекта до номинального (рис.4).

Тангенс угла α определяется по формуле (12) и используется при расчете нерезкости изображения:

$$H = k_n \times \operatorname{tg} \alpha + b_n = k_n \times \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + b_n, \quad (14)$$

где k_n, b_n – коэффициенты.

Откладывая по оси X значение нерезкости и продляя прямую 1, восстанавливаем контраст изображения:

$$\bar{x}_4 = x_1 + H \quad (15)$$

Для определения ординаты точки пересечения необходимо вновь записать выражение для тангенса угла наклона прямой 1:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\bar{y}_4 - y_1}{\bar{x}_4 - x_1} \quad (16)$$

Отсюда:

$$\bar{y}_4 = (\bar{x}_4 - x_1) \times \operatorname{tg} \alpha + y_1 \quad (17)$$

Следовательно, в результате проведенных расчетов определены координаты номинального контраста узкого дефекта. После этого рассчитываются все характеристики узкого дефекта:

$$S = |x_4 - x_1 - H| = \left| x_4 - x_1 - k_1 \times \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - b_1 \right| \quad (18)$$

$$K = \bar{y}_4 - y_1 = (\bar{x}_4 - x_1) \times \operatorname{tg} \alpha = \left(k_n \times \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + b_n \right) \times \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (19)$$

$$h = k_h \times K + b_h \quad (20)$$

Таким образом, в рамках предложенного метода получены соотношения для расчета основных характеристик (глубины, ширины, нерезкости изображения) как для узкого дефекта, так и для канавки эталона чувствительности.

Для экспериментальной проверки адекватности предложенного метода в качестве объекта исследования из всего многообразия дефектов сварного шва выбраны непровары, как представляющие наибольший интерес при решении вопроса о глубине дефекта.

Наиболее простым примером является непровар в корне сварного шва, т.к. в первом приближении его можно представить в виде протяженного дефекта с прямоугольным сечением. Более сложный вариант – непровар по сечению сварного шва, т.е. непровар, наклоненный относительно нормали к поверхности сварного шва на угол β .

В основе экспериментальной проверки предложенного метода расчета глубины непровара лежит компьютерная обработка радиографического снимка. Для перевода радиографического снимка в файл формата bmp используется сканер Duoscan HiD AGFA. Для расчета параметров дефекта по предложенной методике применяются программы Weld.exe (для непровара в корне сварного шва) и Welding.exe (для непровара по сечению сварного шва), разработанные совместно с программистами ООО «Дата-центр» (г. Екатеринбург). Для отработки и проверки метода расчета глубины непровара созданы имитаторы дефекта с известными размерами дефектов.

Порядок работы оператора в указанных программах идентичен:

1. Перевод радиографического снимка в цифровую форму (сканирование).
2. Выбор участка канавочного эталона чувствительности и его анализ (программа строит кривую плотности почернения и рассчитывает ее характеристики).
3. Выбор участка сварного шва с дефектом и его анализ (аналогично п. 2).
4. Результат выдается в форме таблицы (рис. 5).

В третьей главе представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методике определения глубины на искусственных дефектах.

Рассмотрим на примере типичного рентгеновского снимка имитатора непровара в корне шва схему проведения расчета глубины дефекта по предложенной методике и получаемые при этом закономерности.

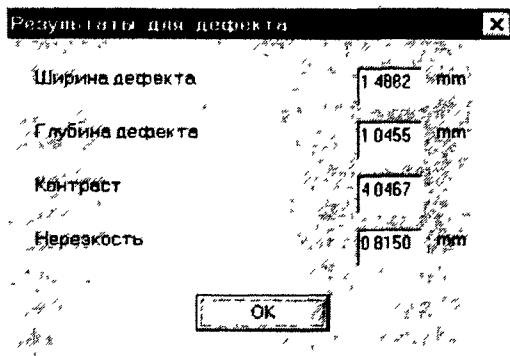


Рис. 5. Результаты расчета характеристик дефекта в программе Weld.exe

1 этап. Расчеты параметров канавочного эталона чувствительности, изображение которого обязательно присутствует на снимке: анализ пиков изображения канавочного эталона чувствительности (рис. 6), измерение характеристик каждого пика, построение зависимости нерезкости изображения канавки от ее глубины, которая известна (рис. 7).

По рис. 7 видно, что зависимость нерезкости изображений канавок от их глубины можно аппроксимировать прямой линией и продлить ее за пределы глубин канавок эталона.

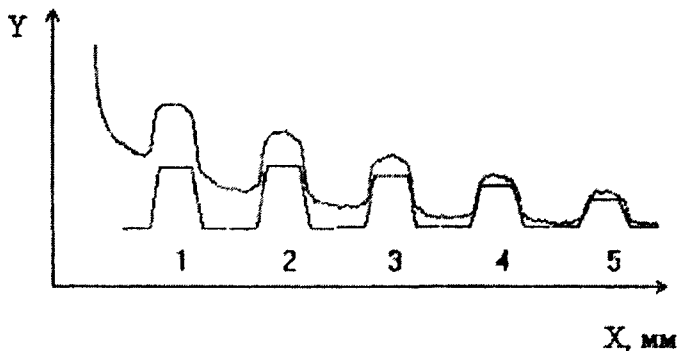


Рис. 6. Типичная кривая плотности почернения в области эталона чувствительности. Цифрами пронумерованы канавки эталона

2 этап. Построение зависимости тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой от нерезкости (рис.8), которая, как правило, аппроксимируется прямой линией.

3 этап. Анализ кривой плотности почернения изображения дефекта (Рис.9). Поскольку ни одна из характеристик дефекта неизвестна, невозможно по кривой плотности почернения определить нерезкость изображения дефекта. Единственная характеристика, которую можно определить непосредственно по кривой плотности почернения – это тангенс угла наклона аппроксимирующей кривой. Измерив его, по рис. 7 определяем нерезкость изображения дефекта. Определив нерезкость, рассчитываем остальные характеристики дефекта по формулам (17) – (20).

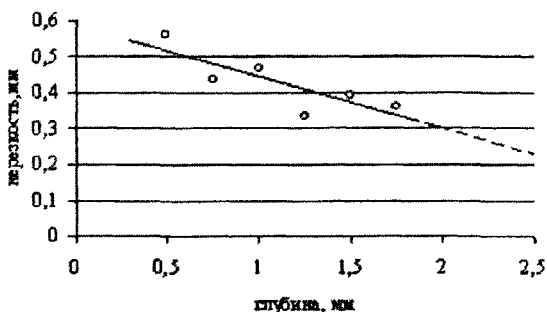


Рис. 7. Зависимость нерезкости изображения канавок эталона чувствительности от их глубины

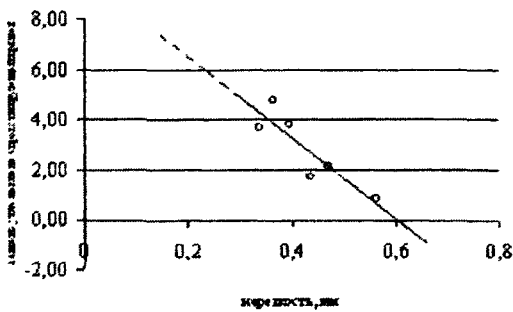


Рис. 8. Зависимость тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой от нерезкости изображения канавок эталона чувствительности

Полученные результаты для дефекта и канавок эталона чувствительности наносим на зависимость нерезкости от глубины (Рис. 10). Видно, что точки рассчитанных характеристик практически ложатся на прямую зависимость нерезкости изображения от глубины.

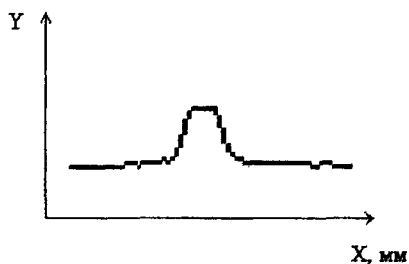


Рис. 9. Кривая плотности почернения в области исследуемого дефекта

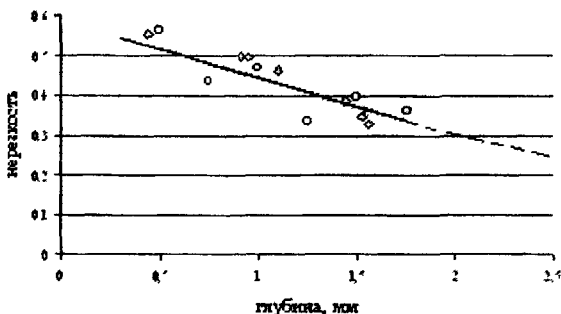


Рис. 10. Зависимость нерезкости изображения от глубины дефекта

○ - эталон чувствительности

◇ - дефект

Для имитатора непровара по сечению сварного шва расчеты проведены по аналогичной схеме. В отличие от непровара в корне сварного шва, непровар по сечению выглядит на радиографическом снимке как широкая полоса, и, соответственно, кривая плотности почернения имеет другой вид (Рис. 11). В данном случае с учетом нерезкости изображения считаем, что ширина пика на кривой плотности почернения характеризует глубину непровара по сечению сварного шва, а его высота – ширину.

Для обоих вариантов дефектов и для всех образцов рассчитаны погрешности измерения глубины дефекта и построены зависимости относительного отклонения от истинного значения, относительной погрешности и общей погрешности от глубины. Среднее значение относительной погрешности расчета глубины непровара в корне шва составило 16,4 %, глубины непровара по сечению сварного шва – 6,2 %.

Анализ погрешностей измерения для всех типов непроваров показал, что общая погрешность незначительно растет с увеличением глубины дефекта.

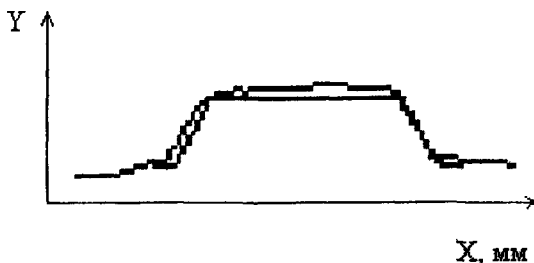


Рис. 11. Участок кривой плотности почернения в области непровара по сечению сварного шва

Проведен расчет и анализ всех типов нерезкостей, их зависимость от глубины дефекта. Показано, что основной составляющей общей нерезкости (77,9 %) является нерезкость рассеяния. Таким образом, подтверждено, что для улучшения качества радиографического снимка необходимо уменьшать влияние рассеянного излучения.

В четвертой главе приведена проверка предложенной методики расчета глубины реальных дефектов.

Непровары. Использовались образцы с непроварами в корне и по сечению сварного шва, вырезанные из забракованных производственных деталей. Истинная глубина дефекта определялась по шлифу (рис. 12).

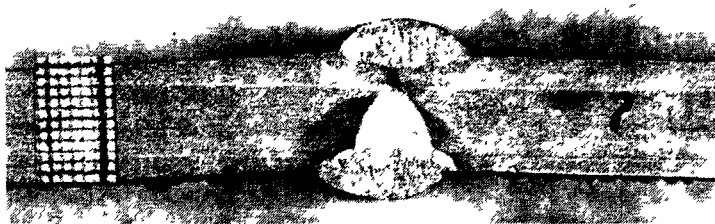


Рис. 12. Разрез сварного образца с непроваром в корне сварного шва

Среднее значение относительной погрешности для непровара в корне сварного шва составило 11,3 %, что согласуется с результатами расчета искусственных дефектов. Погрешность для непровара по сечению сварного шва – 14,5 %. В то же время рассчитанные значения чаще всего незначительно занижены относительно истинных значений.

Газовые поры и шлаковые включения. Для объемных дефектов (поры, шлаковые включения) принято считать что их размер в направлении просвечивания сопоставим с шириной. Для расчета глубины дефекта использована программа *Welding.exe*, поскольку она более приспособлена для расчета объемных дефектов за счет учета угла наклона дефекта. Для выбора наиболее рационального способа исследования пор и шлаковых включений расчет произведен для трех углов наклона дефекта: 30, 45 и 90°. Среднее значение общей погрешности составило: для угла 30° - 68,9 %, для угла 45° - 28,7 %, для угла 90° - 40,1 %. Эти результаты показывают, что, если неизвестен угол наклона объемного дефекта, то лучшие результаты получаются при угле 45°.

Таким образом, результаты расчета размеров объемных дефектов с применением методики, разработанной для плоскостных дефектов типа непроваров, показали, что использовать данную методику для этих целей можно, но с большей погрешностью, чем для непроваров. Для определения условий точного расчета размеров объемных дефектов необходимо проводить дальнейшее более подробное исследование.

Глубина залегания малоконтрастного дефекта. При такой же геометрии просвечивания, как в известных способах определения глубины залегания (расположение источника излучения, контролируемого объекта и пленки), на объект устанавливают свинцовые маркировочные знаки со стороны пленки и делают последовательно два снимка со смещением источника излучения (Рис. 13). При этом плотность почернения каждого из двух полученных снимков равняется плотности почернения первоначального снимка, на котором дефект был выявлен, что обеспечивает наличие на снимках изображения слабоконтрастного дефекта.

Для измерения смещения изображения дефекта необходимо совместить два полученных снимка. Удвоенная плотность почернения при просмотре на негатоскопе не позволяет этого сделать. Поэтому предлагается при предварительном просмотре каждого снимка сделать на пленке сквозные маркеры в местах изображения двух свинцовых знаков и дефекта (Рис. 14, а, б). На экране негатоскопа снимки совмещаются по двум светящимся маркировочным точкам, и измеряется смещение светящихся точек от дефекта (Рис. 14, в).

По измеренному смещению проводят расчет глубины залегания дефекта по формуле:

$$X = \frac{a \times F}{l + a} - b, \quad (18)$$

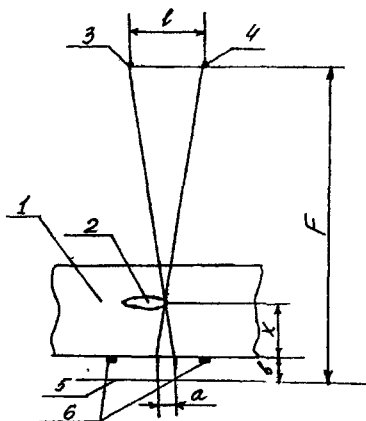


Рис. 13. Схема просвечивания при определении глубины залегания слабоконтрастного дефекта

1 – контролируемый объект; 2 – дефект; 3 – положение источника излучения при первой экспозиции; 4 – положение источника излучения при второй экспозиции; 5 – радиографическая пленка; 6 – свинцовые маркировочные знаки

где a – смещение изображения дефекта, мм;

F – фокусное расстояние (расстояние от источника излучения до пленки), мм;

l – расстояние между двумя положениями источника излучения, мм;

b – расстояние от пленки до внутренней поверхности контролируемого объекта, мм.

В заключение четвертой главы предложен способ оценки экономической эффективности от внедрения предложенной методики расчета глубины дефекта. Она достигается за счет того, что часть деталей с неглубокими дефектами (5-15 % свариваемой толщины) допускаются в дальнейшее производство без исправления и, соответственно, уменьшается объем следующих работ: дополнительное 100 %-ное просвечивание основного и однотипных сварных швов; вырубка дефектного участка; заварка дефектного участка; просвечивание исправленного участка.

В качестве примера рассмотрен реальный случай радиографического контроля сварного шва корпуса ковша шагающего экскаватора. Расчет общих затрат на один радиографический снимок с допущенным без исправления непроваром показал, что в этом случае предлагаемая методика контроля позволяет снизить затраты более, чем в 8 раз.

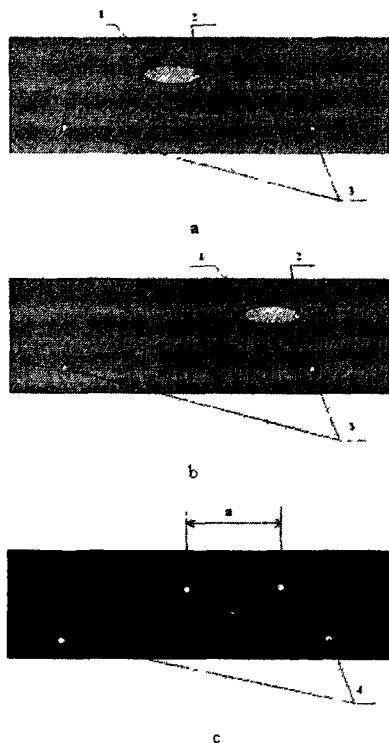


Рис. 14. Схема совмещения радиографических снимков с изображением малококонтрастного дефекта

а – снимок, полученный при первой экспозиции; б – снимок, полученный при второй экспозиции; с – схема совмещения двух снимков

1 – изображение дефекта; 2 – отверстие в месте изображения дефекта; 3 – отверстия в местах изображения свинцовых маркировочных знаков; 4 – совмещенные отверстия в местах изображения свинцовых маркировочных знаков

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан радиографический метод определения глубины дефектов сварного шва в крупногабаритных изделиях тяжелого машиностроения с учетом геометрических параметров дефектов (ширины и ориентации) и характеристик их изображения на пленке (контраст и нерезкость). В методе учтен эффект уменьшения контраста изображения для дефектов, у которых ширина меньше или равна нерезкости изображения.

2. Проведена экспериментальная проверка предложенного способа. Для этого создан экспериментальный комплекс, позволяющий выполнить радиографические снимки исследуемых образцов, перевести изображение с рентгеновской пленки в электронный вид и обработать электронное изображение. Разработаны программы Weld.exe и Welding.exe для расчета характеристик непровара в корне и по сечению шва соответственно.

3. Обоснован выбор в качестве моделей дефектов двух типов непровара сварного шва (в корне и по сечению шва). Разработаны и изготовлены имитаторы этих дефектов, позволяющие менять их геометрические параметры (глубину, ширину, ориентацию).

4. Анализ вклада рассеянного излучения в формирование радиационного изображения показал, что рассеянное излучение существенно увеличивает нерезкость изображения и, следовательно, снижает контраст изображения узких дефектов. При этом нерезкость рассеяния незначительно уменьшается при увеличении глубины дефекта, т.е. увеличивается с ростом толщины просвечиваемого образца, что подтверждает предыдущие исследования.

5. Подтверждена применимость предложенного способа на практике при хорошей точности расчета (среднее значение погрешности – не более 20 %). По результатам проверки на искусственных и натуральных дефектах предложенная методика внедрена в производство сварных металлоконструкций.

6. Показана возможность применения предложенной методики для расчета характеристик других типов дефектов – газовых пор и шлаковых включений. Результаты проверки показали, что такое использование принципиально возможно, но с большей погрешностью, чем для непроваров. Для установления оптимальных условий расчета следует провести более подробное исследование.

7. Предложен новый способ определения глубины залегания малоконтрастных дефектов. Проведены исследования влияния глубины

залегания дефекта как одного из факторов, влияющих на точность расчета глубины дефекта. Они показали, что погрешность расчета глубины дефекта незначительно возрастает с увеличением глубины его залегания.

В приложениях приведены дополнительные материалы: информация об аппаратуре радиационного контроля сварных швов; данные измерений для образцов с искусственными непроварами в корне и по сечению сварного шва; зависимости нерезкости изображения дефекта от его глубины; данные расчета нерезкостей

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Круглова Е.В., Князюк Л.В., Кортвов В.С. Определение размеров непровара по сечению сварного шва при радиографическом контроле // Дефектоскопия. – 2005. – № 4. – С. 63-69.
2. Круглова Е.В., Князюк Л.В. Определение размеров дефектов сварных соединений по сканированным рентгеновским снимкам // Дефектоскопия. – 2004. – № 1. – С. 71-75.
3. Круглова Е.В., Князюк Л.В. Новое в определении размеров дефектов сварных швов при радиографическом контроле. // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 8-10.
4. Способ определения глубины залегания малококонтрастного дефекта при радиографическом контроле/Л.В. Князюк, Е.В. Круглова. – Заявка на изобретение № 2003117860/28; Заявл. 16.06.03; Опубл. 20.02.05. – Бюл. №5.
5. E. Krouglova, L. Knyzuk, V. Kortov: Mathematical Modeling at Account of Parameters of Incomplete Fusion of a Weld, Proc. Third International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies MMT-2004, Ariel, Israel, 2004, v. 2, p.105 – 111.
6. Круглова Е.В., Кортвов В.С. Влияние рассеянного излучения на формирование изображения дефекта при радиографическом контроле. // Сварка и контроль – 2005. Материалы докладов 24-й научно-технической конференции сварщиков Урала и Сибири. Челябинск, 2005. С. 294-299.
7. Круглова Е.В., Князюк Л.В. Влияние ширины непровара сварного шва на его выявляемость при радиографическом контроле. // Сварка и контроль – 2004. Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция. - Пермь, 2004. - Т.2. - С. 350-351.

8. Круглова Е.В., Князюк Л.В. Определение положения дефекта по сечению сварного шва для расчета его глубины. // Снежинск и наука – 2003. Современные проблемы атомной науки и техники: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Снежинск Челябинской области: Изд-во СГФТА, 2003. - С. 258-259.

9. Князюк Л.В., Круглова Е.В. Способ восстановления контраста изображения узкого непровара для расчета его глубины. // Тез. докл. 22-й НТК «Сварка Урала-2003». - Киров, 2003. - С. 92-93.

10. Князюк Л.В., Круглова Е.В. Новое в определении размеров дефектов сварных швов при радиографическом контроле. // Тез. докл. международной НТК «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». - Москва, 2003.- С. 32.

11. Князюк Л.В., Круглова Е.В., Аргучинская О.Н. Способ определения глубины непровара по сканированному рентгеновскому снимку // Тез. докл. международной конференции «Современные проблемы сварки и ресурса конструкций. - Киев, 2003.- С. 44-46.

12. Князюк Л.В., Круглова Е.В. Перспективы радиографического контроля сварных швов в ОАО «Уралмашзавод». // Тез. докл. НТК «Сварка на рубеже веков». - Москва, 2002. - С. 112.

13. Круглова Е.В. Возможности и перспективы радиографического контроля сварных швов в ОАО «Уралмаш». // Тез. докл. 7-й НТК «Сварка, наплавка и специализированное оборудование в ремонте и восстановлении деталей машин». - Екатеринбург, 2001. - С. 44-45.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тираж 85 экз. заказ №03

Объем 1 печатный лист, формат 60*84 1/16
620041 г. Екатеринбург ГСП-170 ул. С. Ковалевской, 18