

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ РАСШИФРОВКЕ ЦИФРОВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2024 г. С.А. Григорченко^{1,*}, В.И. Капустин^{2,**}

¹Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета,
Россия 140402 Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 408

²АО «НИЦ «ТЕХНОПРОГРЕСС», Россия 115432 Москва,
Проектируемый проезд № 4062, 6, стр. 16
E-mail: *rent_sig@mail.ru; **kapustin@tpcorp.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024; после доработки 15.10.2024

Принята к публикации 18.10.2024

Повышению эффективности идентификации изображений дефектов при компьютерной расшифровке радиографических изображений посвящена эта статья. В работе рассматривается задача сегментации изображений дефектов, а также модели сегментации изображений дефектов на радиографическом снимке как при ручной, так и компьютерной расшифровке. Показано отличие алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений от ручной расшифровки снимков.

Разработаны и экспериментально проверены на АПК КАРС алгоритмы поиска и идентификации дефектов для применения в комплексах цифровой радиографии. Сходимость результатов компьютерной и ручной расшифровки составила 0,85.

Ключевые слова: объект контроля, радиографическое изображение, компьютерная расшифровка, дефект, изображение дефекта, группа, скопление, сегментация.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DEFECT IMAGE IDENTIFICATION DURING COMPUTER DECODING OF DIGITAL RADIOGRAPHIC IMAGES OF WELDED JOINTS OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

© 2024 S.A. Grigorchenko^{1,*}, V.I. Kapustin^{2,**}

¹Kolomna Institute (branch) Moscow Polytechnic University,
Russia 140402 Moscow region, Kolomna, Oktyabrskaya revolyutsii str., 408

²JSC SIC TECHNOPROGRESS, Russia 109548 Moscow,
Projected passage No. 4062, 6, building 16
E-mail: *rent_sig@mail.ru; **kapustin@tpcorp.ru

This article is devoted to improving the efficiency of flaw image identification during computer decoding of digital radiographic images. The paper studies the problem of segmentation of flaw images. Models of segmentation of flaw images on a radiographic image are studied for both manual and computer decoding. The difference between algorithms for searching and identifying groups, clusters, chains of pores, slag and metal inclusions from manual decoding of images is shown.

Algorithms for the search and identification of flaws for use in digital radiography complexes have been developed and experimentally tested at HSC KARS. The convergence of the results of computer and manual decryption was 0,85.

Keywords: monitored object, radiographic image, computer decoding, flaw, flaw image, group, cluster, segmentation.

DOI: 10.31857/S0130308224120056

ВВЕДЕНИЕ

Радиографический метод является одним из основных методов неразрушающего контроля сварных соединений, литья, литьих лопаток и других объектов контроля (ОК) различных технических устройств на опасных производственных объектах [1, 2]. В настоящее время в Российской Федерации и за рубежом продолжает развиваться цифровая радиография. Разработаны зарубежные и отечественные цифровые комплексы, в состав которых входит соответствующее программное обеспечение (ПО): ПО для цифровой и компьютерной радиографии «Х-Визор» [3], система улучшения и архивирования изображений «СОВА+» [4], ПО Дисофт [5] и др., которые на данный момент не обладают полной функциональностью, необходимой для автоматизации процесса расшифровки радиационных изображений, а также не всегда учиты-ва-

ют специфику контроля технических устройств на опасных производственных объектах [1, 2]. Поэтому в настоящей статье рассматривается контроль сварных соединений технических устройств на опасных производственных объектах с учетом требований НТД.

Компьютерная расшифровка цифровых радиографических изображений металлических сварных соединений (далее объектов контроля) в целях неразрушающего контроля может быть разделена на несколько операций: формирование, визуализация и архивация изображений; их сегментация и др. Вопросам формирования, визуализации и оценки качества цифровых радиационных изображений посвящено большое количество работ, например, [6—10]. Соответственно сегментация может быть разделена на два этапа. На первом этапе осуществляется обнаружение изображений дефектов (ИД) и их классификация. При этом используются различные методы распознавания образов (посредством нейронных сетей, вейвлет-анализа и др.) [11—19]. На втором этапе решается задача объединения обнаруженных ИД в группы изображений дефектов (ГИД) и/или скопления ИД (СИД). В дальнейшем для ГИД и СИД используется общий термин — объединение ИД (ОИД). После обнаружения ОИД необходимо определить их размеры и произвести оценку допустимости с учетом требований соответствующих нормативных документов (НД).

В качестве примера на рис. 1 представлена группа из четырех дефектов (1—4) [20, рис. 9.3]. Исходные данные: толщина ОК $S = 20$ мм. Категория II по НД НП-105-18 [21].

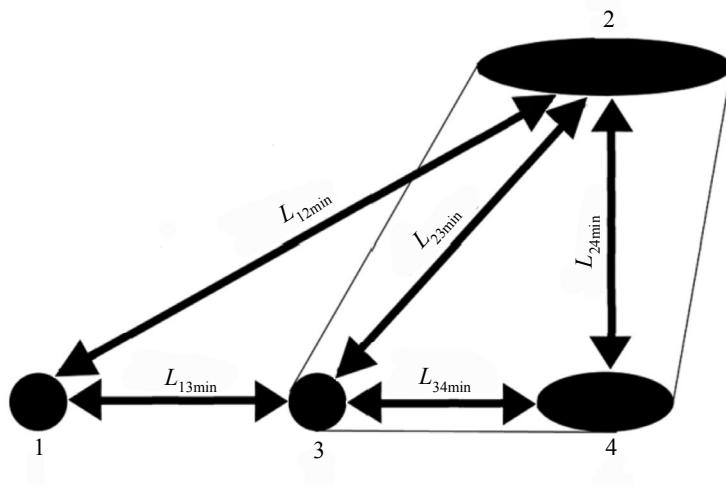


Рис. 1. Обобщенная схема определения расстояний между дефектами: $L_{12\min}$, $L_{13\min}$, $L_{23\min}$, $L_{24\min}$, $L_{34\min}$ — минимальные расстояния между дефектами.

Необходимо рассмотреть группу дефектов, классифицировать ее согласно НД НП-105-18 и определить допустимость дефектов по приведенному выше НД.

Для групповой классификации дефектов необходимо определить размеры дефектов и минимальные расстояния между дефектами 1—4, входящими в рассматриваемую группу дефектов, и установить их групповую принадлежность в соответствии с НД НП-105-18 [21].

Далее предполагается, что максимальные размеры дефектов, а также расстояния между ними указаны в мм. В случае компьютерной обработки линейные размеры определяются в пикселях, а затем пересчитываются в мм с учетом масштаба цифрового радиографического изображения. В свою очередь масштаб изображения в мм/пиксель вычисляется на основе разрешающей способности изображения и используемой схемы просвечивания или определяется по изображению объекта с известными геометрическими размерами, например, изображению канавочного эталона чувствительности контроля. Максимальные размеры дефектов указываются в формате $a \times b$, где a — максимальный размер дефекта или его длина; b — максимальный размер дефекта в направлении, перпендикулярном отрезку максимального размера, или максимальная ширина. Если $a = b$, то указывается диаметр дефекта, т.е. \varnothing .

Максимальные размеры дефектов: № 1 — $\varnothing 4,0$; № 2 — 15×3 ; № 3 — $\varnothing 4,0$; № 4 — 9×4 .

Минимальные расстояния между дефектами: $L_{12\min} = 40$; $L_{13\min} = 17$; $L_{23\min} = 24$; $L_{24\min} = 18$; $L_{34\min} = 11$.

Дефект № 1:

$L_{n12}^c = 3 \cdot \max[\max(b_1, b_2), \min(a_1, a_2)] = 3 \cdot \max[\max(4, 3), \min(4, 15)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 1 и № 2 для скопления дефектов согласно НД НП-105-18;

$L_{n13}^c = 3 \cdot \max[\max(b_1, b_2), \min(a_1, a_2)] = 3 \cdot \max[\max(4, 4), \min(4, 4)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 1 и № 3 для скопления дефектов.

Критерий включения дефектов в скопление по НД НП-105-18: $L_{ij\min} < L_{nij}^c$, где $L_{ij\min}$ — соответственно минимальное расстояние и пороговое расстояние для скопления между i -м и j -м дефектами. Тогда

$$\left. \begin{array}{l} L_{12\min} = 40 > L_{n12}^c = 12 \\ L_{13\min} = 17 > L_{n13}^c = 12 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефект № 1 является одиночным.}$$

Дефекты № 2 и № 4:

$L_{n24}^r = \max(b_2, b_4) = \max(3, 4) = 4$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 2 и № 4 для объединения в группу согласно НД НП-105-18;

$L_{n24}^c = 3 \cdot \max[\max(b_2, b_4), \min(a_2, a_4)] = 3 \cdot \max[\max(3, 4), \min(15, 9)] = 3 \cdot 9 = 27$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 2 и № 4 для скопления дефектов.

Критерий включения дефектов в группу по НД НП-105-18: $L_{ij\min} < L_{nij}^r$, где $L_{ij\min}$ — соответственно минимальное расстояние и пороговое расстояние для объединения в группу между i -м и j -м дефектами. Тогда

$$\left. \begin{array}{l} L_{24\min} = 18 > L_{n24}^r = 4 \\ L_{24\min} = 18 < L_{n24}^c = 27 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефекты № 2 и № 4 образуют скопление.}$$

Дефекты № 3 и № 4:

$L_{n34}^r = \max(b_3, b_4) = \max(4, 4) = 4$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 3 и № 4 для объединения в группу;

$L_{n34}^c = 3 \cdot \max[\max(b_3, b_4), \min(a_3, a_4)] = 3 \cdot \max[\max(4, 4), \min(4, 9)] = 3 \cdot 4 = 12$ — пороговое значение расстояния между дефектами № 3 и № 4 для скопления дефектов.

$$\left. \begin{array}{l} L_{34\min} = 11 > L_{n34}^r = 4 \\ L_{34\min} = 11 < L_{n34}^c = 12 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{дефекты № 3 и № 4 образуют скопление.}$$

Таким образом, дефект № 1 — одиночный, а дефекты № 2, № 3 и № 4 образуют скопление размером 25×24 .

Дефекты превышают допустимые размеры, так как по табл. 4.8 НД НП-105-18 допускается скопление с максимальным размером (длиной) 3,5 и одиночные крупные включения с максимальным размером и максимальной шириной $6 \times 2,5$.

В настоящее время расшифровка радиографических снимков ОК в основном выполняется вручную. Данная процедура расшифровки сложна и трудоемка. В случае компьютерной расшифровки ПО реализует ограниченный набор ручных операций: формирование изображений, отображение изображений на экране и их визуализация, измерение расстояния между пикселями, измерение яркости пикселя и др. Ручная компьютерная обработка обладает двумя существенными недостатками: высокая трудоемкость и субъективность. Оба недостатка в полной мере проявляются в процессе обнаружения и оценки как отдельных ИД, так и ОИД. В частности, в сложных с точки зрения количества, формы и взаимного расположения ИД случаях дефектоскопист должен выполнить с достаточной точностью необходимое количество измерений расстояния, на основании которых (измерений) принять решение о включении ИД в ОИД. Субъективность выполнения таких измерений может, с одной стороны, привести к перебраковке, с другой стороны, к недооценке совместного влияния близко расположенных дефектов на ОК. Оба варианта могут повлечь за собой существенные затраты на ремонт ОК.

В работе рассматривается программное решение задачи сегментации (поиска и оценивания) ОИД (групп, скоплений, цепочек) для применения в комплексах цифровой радиографии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И АЛГОРИТМ ПОИСКА ОИД

В данной работе предполагается, что ИД обнаружены, т.е. изображение каждого дефекта характеризуется:

1) массивом пикселей P_{ki} , образующих контур ИД,

$$P_{ki} = \{p_{ki}[j] = (x_{ij}, y_{ij}), i = 0, 1, \dots, N_d; j = 0, 1, \dots, N_{ki} - 1\}, \quad (1)$$

где i — номер ИД; N_d — количество ИД; $p_{ki}[j]$ — j -й элемент массива P_{ki} ; x_{ij}, y_{ij}, N_{ki} — соответственно координаты j -го пикселя и количество пикселей, принадлежащих контуру i -го ИД. Контур ИД, в свою очередь, представляет собой замкнутую линию шириной в один пиксель, в которой отсутствуют петли. Элементы массива, описывающего контур ИД, упорядочены таким образом, что соседним элементам массива соответствуют расположенные рядом пиксели контура;

2) следующими параметрами: a_i — максимальный размер (наибольшее расстояние между двумя пикселями контура i -го ИД [21, 22]); b_i — максимальная ширина (наибольшее расстояние между двумя пикселями контура, измеренное в направлении, перпендикулярном отрезку максимального размера i -го ИД [21, 22]); a_{il} — максимальный размер i -го ИД вдоль шва [23]; a_{it} — максимальный размер i -го ИД поперек шва [23]; h_i — оценка максимального размера в направлении просвечивания (высоты) i -го дефекта [23];

3) тип и оценка допустимости дефекта.

Используя перечисленные выше данные, нужно определить контуры ОИД и вычислить параметры, необходимые соответственно для оценки их (ОИД) допустимости и качества ОК. При этом также предполагается, что процедура поиска ОИД является частью программного обеспечения информационной системы, в состав которой входит реляционная база данных (БД).

Известно ([21—23]), что объекты, относящиеся к изделиям разного типа, контролируются по различным методикам, которые изложены в соответствующих НД. Анализ НД показывает, что, с одной стороны, общим признаком для формирования ОИД является минимальное расстояние между ИД, которое на радиографическом изображении оценивается как минимальное расстояние между контурами ИД. С другой стороны, имеются некоторые отличия в критериях включения ИД в ОИД.

В табл. 1 приведены критерии формирования ОИД, соответствующие трем НД: НП-105-18 [21] определяет правила контроля объектов атомных энергетических установок; ГОСТ 23055—78 [22] используется при проведении радиографического контроля объектов газоснабжения и других объектов; СТО Газпром 2-2.4-917-2014 [23] содержит инструкцию по радиографическому контролю качества сварных соединений промысловых и магистральных трубопроводов.

Таблица 1

Нормативный документ	Критерий		Примечание
	Группа	Скопление, цепочка	
НП-105-18	$L_{ij\min} < L_{ij}^r$, $L_{ij}^r = \max(b_i, b_j)$, $N_{d\min} = 2$	$L_{ij}^r \leq L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)]$, $N_{d\min} = 2$	Группа или скопление мелких включений
ГОСТ 23055—78	$L_{ij\min} < L_{ij}^r$, $L_{ij}^r = \max(b_i, b_j)$, $N_{d\min} = 2$	$L_{ij}^r \leq L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max(bB_i, bB_j)$, $N_{d\min} = 3$	Группа или скопление включений
СТО Газпром 2-2.4-917-2014		$L_{ij\min} < L_{ij}^c$, $L_{ij}^c = 3 \cdot \max(aA_i, aA_j)$, $N_{d\min} = 3$	Скопление или цепочка пор, скопление или цепочка шлаковых включений

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $L_{ij\min}$ — минимальное расстояние между i -м и j -м изображениями дефектов: включений, групп включений, скоплений или цепочек включений; L_{ij}^r — пороговое значение $L_{ij\min}$ для группы включений; L_{ij}^c — пороговое значение $L_{ij\min}$ для скопления и цепочки включений; $N_{d\min}$ — минимальное количество включений в группе, скоплении или цепочке; b_k — максимальная ширина k -го изображения включения; aA_k — максимальный размер k -го изображения включения (группы включений) a_k или скопления (цепочки) включений A_k ; bB_k — максимальная ширина изображения k -го включения (группы включений) b_k или скопления (цепочки) включений B_k .

Следует отметить, что НД НП-105-18 определяет два вида объединений дефектов: группу включений и скопление включений, где под включениями понимаются дефекты типа пора, шлаковое или вольфрамовое включение. При этом группу образуют два и более включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^r = \max(b_i, b_j)$ (см. табл. 1). Скопление образуют также два и более мелких (допустимых) включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)]$.

ГОСТ 23055—78 аналогично НП-105-18 определяет группу включений. В свою очередь, скопление образуют три и более любых включений, минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max(bB_i, bB_j)$, т.е. критерий для скопления отличается от критерия, изложенного в НП-105-18.

СТО Газпром 2-2.4-917-2014 в части оценки качества сварных соединений строящихся трубопроводов определяет: скопления пор или шлаковых включений; цепочки пор или шлаковых включений. Такие объединения дефектов образуют не менее трех однотипных дефектов (пор или шлаковых включений), минимальное расстояние между которыми меньше $L_{nij}^c = 3 \cdot \max(aA_i, aA_j)$. В свою очередь, цепочки дефектов отличаются от скоплений дефектов тем, что дефекты в цепочке располагаются вдоль прямой.

Таким образом, анализ НД показывает, что объединения дефектов определяются по-разному в НП-105-18, ГОСТ 23055—78 и СТО Газпром 2-2.4-917-2014. Следовательно, универсальный алгоритм поиска ОИД должен обеспечивать вычисление различных критериев формирования групп, скоплений и цепочек ИД, а выбор используемого критерия должен соответствовать НД, на основе которого осуществляется контроль объекта изделия определенного типа.

Для примера на рис. 2 схематично изображен один из возможных вариантов взаимного расположения двух ИД с размерами $aA_i = a_i$, $bB_i = b_i$ и $aA_j = a_j$, $bB_j = b_j$. Согласно НД НП-105-18 (см. табл. 1):

$$L_{nij}^c = 3 \cdot \max[\max(bB_i, bB_j), \min(aA_i, aA_j)] = 3 \cdot \max[\max(b_i, b_j), \min(a_i, a_j)] = 3 \cdot \max[b_i, a_j] = 3 \cdot a_j.$$

На рис. 2 видно, что $L_{ij\min} < L_{nij}^c = 3 \cdot a_j$, т.е. рассматриваемые ИД должны объединяться в СИД.

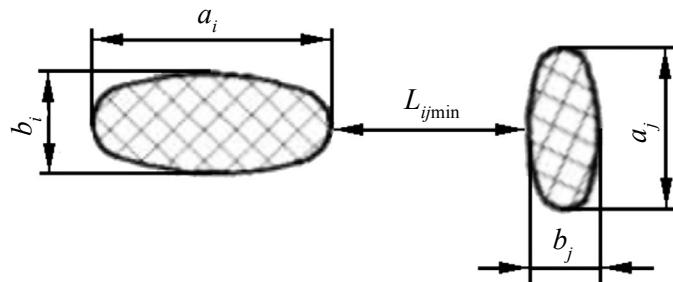


Рис. 2. Пример объединения двух включений в скопление по НД НП-105-18.

Краткое описание алгоритма поиска ОИД, упрощенная блок-схема которого изображена на рис. 3:

1. Выбор критерия поиска и чтение из БД параметров критерия поиска ОИД.
2. Чтение необходимых параметров ИД, включая контур ИД, из БД в массив.
3. Формирование ГИД, если это предусмотрено выбранным критерием. При этом организуются два вложенных цикла, в которых перебираются все пары ИД. Для каждой пары ИД вычисляются $L_{ij\min}$, L_{nij}^r (см. табл. 1). Если $L_{ij\min} < L_{nij}^r$, то создается или изменяется ранее созданная ГИД. ИД, образующие группу, помечаются как элементы ГИД и в дальнейшем не рассматриваются. После завершения циклов поиска для каждой ГИД определяется ее контур и параметры, необходимые для дальнейшей обработки (максимальный размер, максимальная ширина и др.); вычисляются координаты прямоугольника, в который вписывается контур ГИД. В свою очередь, обнаруженная ГИД рассматривается как новое отдельное ИД.

4. Формирование СИД. При этом организуется три вложенных цикла. Два внутренних цикла обеспечивают перебор всех пар следующих объектов: отдельных ИД, ГИД и ранее сформированных, начиная со второго прохода внешнего цикла, потенциальных СИД. Для каждой

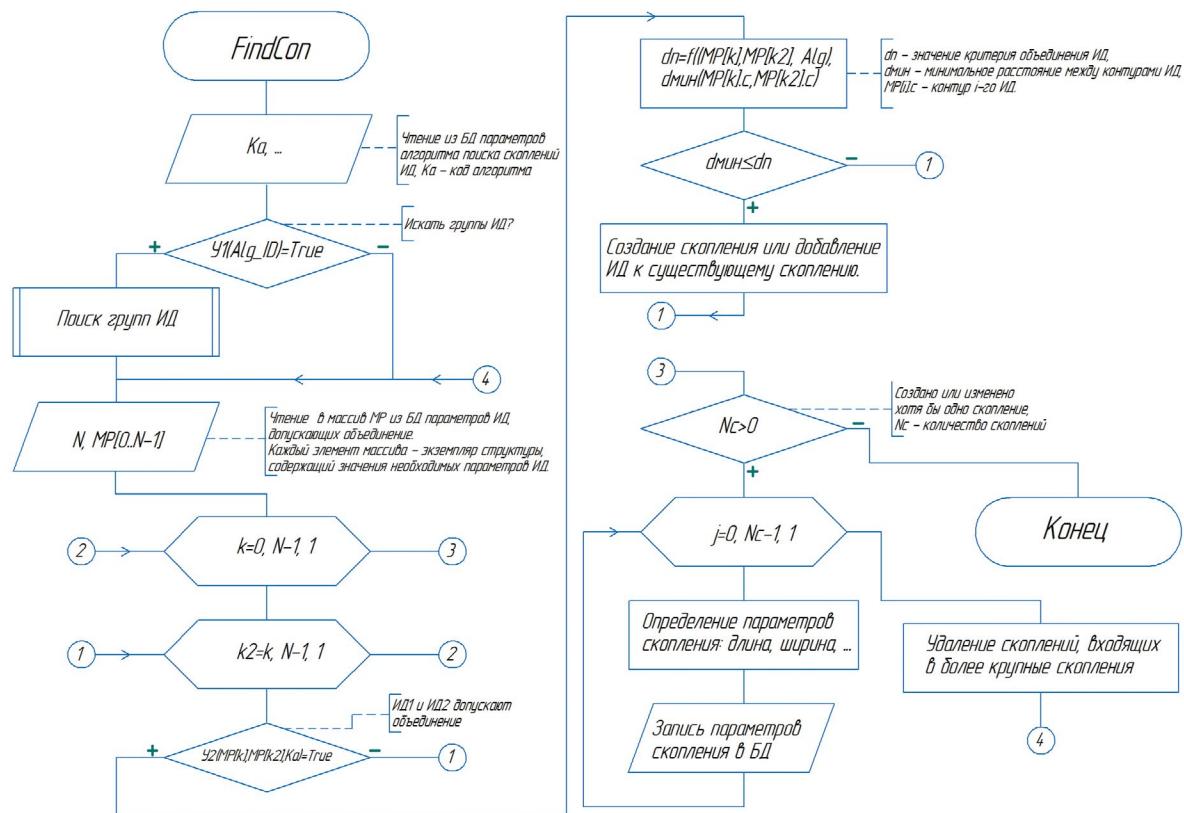


Рис. 3. Упрощенная блок-схема алгоритма поиска ОИД.

пары таких объектов вычисляются $L_{ij\min}, L_n^c$ (см. табл. 1). Если $L_{ij\min} < L_n^c$, то создается или изменяется ранее созданное потенциальное СИД. ИД, образующие потенциальное СИД, помечаются как элементы потенциального СИД и в дальнейшем не рассматриваются. Если в очередном проходе внешнего цикла не найдено ни одного потенциального СИД, то внешний цикл завершается. В противном случае определяется количество ИД в каждом потенциальном СИД N_d . Если для некоторого потенциального СИД $N_d < N_{d\min}$ (см. табл. 1), то с входящих в него ИД снимается соответствующая пометка, а в свою очередь это потенциальное СИД удаляется. Если все потенциальные скопления будут удалены, то внешний цикл завершается. В противном случае для каждого теперь уже обнаруженного СИД определяется его контур и параметры, необходимые для продолжения поиска более крупных СИД (максимальный размер, максимальная ширина), а это СИД рассматривается как новый отдельный дефект. В следующем проходе внешнего цикла (как отмечалось ранее) могут добавляться в уже сформированные СИД, отдельные ИД или ГИД, а также ранее обнаруженные СИД объединяться в новые более крупные СИД. В результате образуются СИД, которые являются изображениями одиночных скоплений дефектов, а также остаются одиночные ИД (изображения одиночных групп дефектов), не вошедшие в состав СИД.

5. После выполнения четвертого шага выполняется ряд дополнительных операций. Если критерий поиска предполагает деление СИД на скопления и цепочки, то вычисляется отношение максимального размера СИД к его максимальной ширине, по значению которого (по аналогии с разбиением одиночных дефектов на протяженные и компактные [19]) принимается решение о типе СИД (скопление или цепочка). Для каждого СИД: вычисляется сумма площадей, входящих в него ИД; определяется ИД с максимальной площадью и фиксируются основные параметры этого ИД; определяется дефект с максимальной высотой, которая принимается за высоту СИД; вычисляются координаты прямоугольника, в который вписывается контур СИД. Сформированные данные об отдельных ИД, ГИД и СИД используются: при автоматизированном определении качества ОК [24]; в процессе формирования заключения о качестве ОК; для их (ИД, ГИД и СИД) визуализации.

6. Запись в БД информации о найденных ОИД.

Параметры алгоритмов поиска ОИД удобно хранить в БД. Перед расшифровкой изображений в БД заносится информация об объектах контроля, начиная с типа изделия. Типы изделий

хранятся в предварительно сформированной справочной таблице. Выбирая тип изделия, дефектоскопист неявно выбирает алгоритм оценки качества объекта контроля, включая алгоритм поиска ОИД.

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствует о том, что, во-первых, объединяться могут только ИД определенных типов, во-вторых, типы объединяемых дефектов зависят от критерия: любые мелкие включения, любые включения, только поры или только шлаковые включения. Информацию об объединяемых ИД в зависимости от критерия удобно хранить в БД. На основе этой информации перед циклом поиска ОИД формируется двумерный логический массив размерностью N на N , где N — количество типов классифицируемых дефектов, а в качестве индексов элементов массива используются идентификаторы (коды) типов дефектов. Элементы этого массива имеют истинные значения для пар потенциально объединяемых ИД, что, в свою очередь, обеспечивает универсальность и простоту операции проверки условия возможного объединения ИД.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было разработано и протестировано ПО, реализующее рассмотренный алгоритм сегментации и оценивания ОИД. Рис. 4 является графической иллюстрацией реализации рассмотренного алгоритма сегментации ОИД: фрагменты на этом рисунке — это фрагменты обработанного цифрового радиографического изображения, полученного в результате применения разработанного ПО.

На рис. 4 a представлен фрагмент радиографического изображения сварного соединения с ИД, которые классифицированы как включения. На этом рисунке контуры ИД выделены желтым цветом, а зеленым цветом обозначены границы сварного соединения. На рис. 4 b приведен тот же фрагмент, но после выполнения операции поиска ГИД. На этом рисунке контуры ИД, образующие ГИД, выделены синим цветом, а отдельные ИД и прямоугольники, описанные вокруг ГИД, — желтым цветом. Длины больших и меньших сторон описанных прямоугольников являются соответственно максимальным размером и максимальной шириной ГИД. На рис. 4 c приведен тот же фрагмент, но после последовательного выполнения операций поиска ГИД, а затем СИД. На этом рисунке: контуры ИД, образующие СИД, выделены синим цветом; прямоугольники, описанные вокруг ГИД, включенных в СИД, — сине-желтым пунктиром; прямоугольники, описанные вокруг СИД, — желтым цветом. Длины больших и меньших сторон, описанных вокруг СИД прямоугольников являются соответственно максимальным размером и максимальной шириной СИД. В приведенном примере обнаруженные ГИД и СИД соответствуют определениям групп и скоплений включений, данным в НД НП-105-18 и ГОСТ 23055—78.

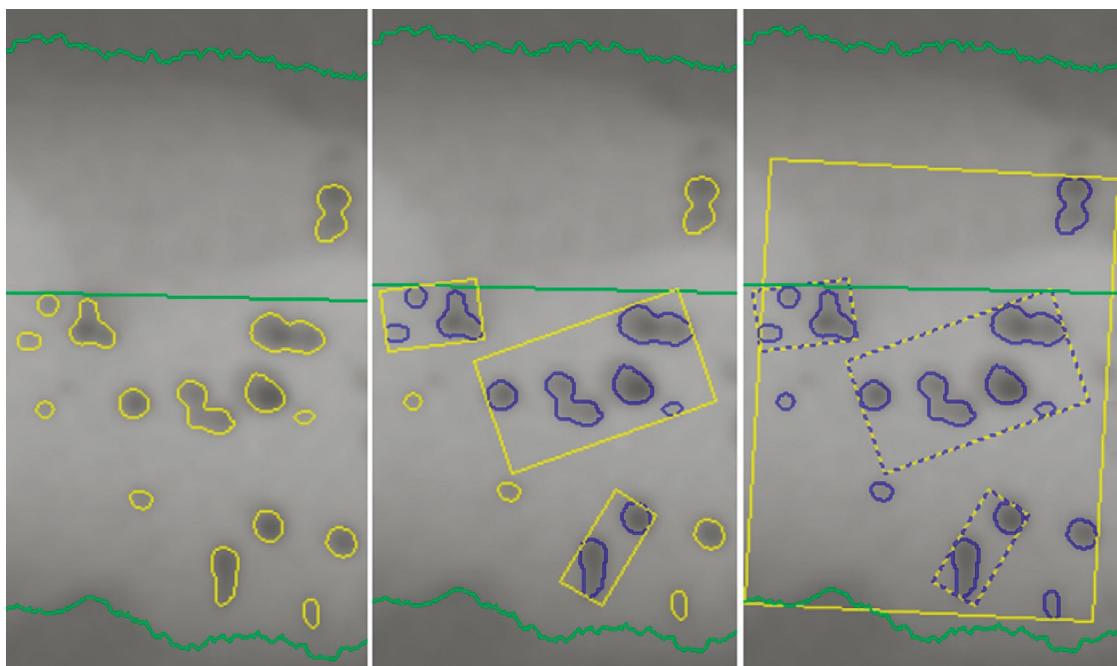


Рис. 4. Иллюстрация применения операции поиска СИД.

В процессе тестирования ПО оценивалось время выполнения операции поиска ОИД. Измерение времени производилось на ноутбуке с 64-разрядным четырехядерным процессором с тактовой частотой 2,4 ГГц и оперативной памятью объемом 8 ГБ. При обработке сложных изображений с количеством включений около ста время выполнения этой операции не превышало 5 с.

Разработанное ПО предоставляет дефектоскописту некоторые дополнительные возможности: поиск только ГИД, если это предусмотрено используемым критерием формирования ОИД; поиск СИД с предварительным поиском ГИД или без него; поиск СИД за один или несколько проходов (второй вариант предполагает возможность объединения СИД в более крупные СИД); включение в ОИД изображения только допустимых дефектов; поиск ОИД в выбранной пользователем прямоугольной области изображения участка ОК.

Проверка алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор и шлаковых включений проводилась на 120 радиографических снимках с применением разработанного ПО, который входил в состав ПО аппаратно-программного комплекса (АПК) «КАРС». Сходимость результатов компьютерной и ручной расшифровки составляло 0,85. Основная причина расхождения заключалась в погрешности измерения геометрических размеров ИД, расстояний между ИД, пропуск малоконтрастных изображений типа отдельных пор с контрастом менее 0,02 Б и субъективный фактор дефектоскопистов.

Поиск ОИД является относительно независимой операцией и может дополнять соответствующее программное обеспечение компьютерной и цифровой радиографии.

Разработанное ПО входит в состав ПО АПК «КАРС» (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2009610394), предназначенного для расшифровки и архивации радиографических изображений сварных соединений стальных газопроводов, технических устройств на опасных производственных объектах, который эксплуатируется в ряде лабораторий неразрушающего контроля РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и экспериментально проверены на аппаратно-программном комплексе «КАРС» алгоритмы поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений для применения в комплексах компьютерной и цифровой радиографии.

2. Алгоритмы поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений отличаются от ручной расшифровки:

во-первых, объединяться могут только ИД определенных типов;

во-вторых, типы объединяемых дефектов зависят от критерия: любые мелкие включения, любые включения, только поры или только шлаковые включения.

в рассмотренном решении задачи объединения изображений дефектов реализована возможность проверки условия объединения изображений дефектов любых типов (не только включений) в различных сочетаниях, что в свою очередь обеспечивает универсальность предлагаемого подхода.

3. Разработанное ПО с применением алгоритмов поиска и идентификации групп, скоплений, цепочек пор, шлаковых и металлических включений может быть встроено в цифровые комплексы с последующей доработкой в части использования методов искусственного интеллекта для расшифровки радиографических изображений сварных соединений стальных газопроводов, технических устройств на опасных производственных объектах РФ.

Авторы статьи благодарят за оказанную помощь по оформлению и обсуждению материала статьи к.т.н., доцента, ректора АНО ДПО ИПК «ТЕХНОПРОГРЕСС» Шевченко Светлану Александровну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон № 116 — ФЗ от 21.07.97 г. Принят Государственной Думой 20 июня 1997 г. [сайт]. 1997. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11232> (дата обращения: 08.10.2024).

2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 октября 2020 г. N 420 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс] / Информационно-правовой портал «Гарант.ру»: <https://base.garant.ru/75039846/#friends> (дата обращения: 08.10.2024).

3. X-Vizor — ПО для цифровой и компьютерной радиографии. Общество с ограниченной ответственностью «Ньюком-НДТ» [сайт]. 2024. URL: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor> (дата обращения: 08.10.2024).

4. Система улучшения и архивирования изображений “СОВА+” / Ассоциация научно-технического сотрудничества «ТЕСТРОН» [сайт]. 2024. URL: <http://www.testron.ru/ru/view/38> (дата обращения: 08.10.2024).
5. ПО Дисофт // Общество с ограниченной ответственностью «Центр Цифра» [сайт]. 2024. URL: <https://digital-xray.ru/product/po-disoft/#desc> (дата обращения: 08.10.2024).
6. Грудский А.Я., Величко В.Я. Оцифровка радиографических снимков — это не очень просто // В мире НК. 2011. № 4 (54). С. 74—76.
7. Грудский А.Я., Величко В.Я., Деч А.В. Как гарантировать достоверность и качество цифрового архива рентгеновских снимков кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода? // В мире НК. 2012. № 4 (58). С. 34—40.
8. Багаев К.А., Козловский С.С. Оцифровка рентгеновских пленок. Что следует учесть при разработке и внедрении российских стандартов // В мире НК. 2013. № 3 (61). С. 30—35.
9. Деч А.В. Требования к программным комплексам улучшения и архивирования рентгеновских изображений // В мире НК. 2003. № 3 (21). С. 66—68.
10. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 37—42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
11. Назаренко С.Ю., Удод В.А. Применение искусственных нейронных сетей в радиационном неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 53—64.
12. Воробейчиков С.Э., Фокин В.А., Удод В.А., Темник А.К. Оценка эффективности двух алгоритмов сегментации цифрового радиационного изображения объекта контроля // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 60—67.
13. Liu T., Zheng P., Bao J., Chen H. A state-of-the-art survey of welding radiographic image analysis: Challenges, technologies and applications // Measurement. 2023. V. 214. P. 112821. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112821
14. Block S. B., Da Silva R. D., Lazzaretti A. E., Minetto R. LoHi-WELD: A Novel Industrial Dataset for Weld Defect Detection and Classification, a Deep Learning Study, and Future Perspectives // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 77442—77453. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3407019
15. Say D., Zidi S., Qaisar S.M., Krichen M. Automated Categorization of Multiclass Welding Defects Using the X-ray Image Augmentation and Convolutional Neural Network // Sensors. 2023. V. 23. P. 6422. <https://doi.org/10.3390/s23146422>
16. Zhao S., Long L., An D., Wang Y., Zhang H., Liang H., Jin S. Design and Realization of Nondestructive Testing Information Management System for Shell Electron Beam Welds // Software Engineering and Applications. 2022. V. 11. No. 5. P. 1005—1016. DOI: 10.12677/SEA.2022.115103. <https://doi.org/10.12677/sea.2022.115103>
17. Harrouche S., Nacereddine N., Goumeidane A.B. A Comparative Study of Different CNN Models using Transfer Learning for Weld Defect Classification in Radiographic Testing // Proc. of the 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE). 30—31 December 2023, Dubai, UAE. DOI: 10.1109/ICECCE1019.2023.10442057
18. Григорченко С.А., Ефименко Л.А. Автоматизация компьютерной расшифровки радиационных изображений сварных соединений // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 21—27.
19. Григорченко С.А., Капустин В.И. Классификация дефектов при автоматизированном радиографическом контроле сварных соединений // Дефектоскопия. 2009. Т. 45. № 9. С. 73—87.
20. Капустин В.И., Зуев В.М., Иванов В.И., Дуб А.В. Радиографический контроль. Информационные аспекты. Москва: ООО Издательство «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ», 2010. 368 с.
21. НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже.
22. ГОСТ 23055—78. Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля.
23. СТО Газпром 2-2.4-917-2014. Инструкция по радиографическому контролю качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных трубопроводов.
24. Григорченко С.А. Автоматизированная оценка качества сварных соединений по параметрам радиографических изображений дефектов // Контроль. Диагностика. 2009. № 10. С. 30—36.

REFERENCES

1. On Industrial Safety of Hazardous Production facilities : Federal Law No. 116 — FZ dated 07/21/97 : adopted by the State Duma on June 20, 1997 [website]. 1997. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11232> (Accessed on 08.10.2024).
2. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 20, 2020. No. 420 “On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules for industrial safety expertise” (with amendments and additions) [Electronic resource] // Information and legal portal “Garant.ru”. Available at: <https://base.garant.ru/75039846/#friends> (Accessed on 08.10.2024).

3. X-Vizor — SOFTWARE for digital and computer radiography / Limited Liability Company “Newcom-NDT” [website]. 2024. Available at: <https://newcom-ndt.ru/x-vizor> (Accessed on 08.10.2024).
4. The system of image improvement and archiving “SOVA+” / Association of Scientific and technical cooperation “TESTRON” [website]. 2024. Available at: <http://www.testron.ru/ru/view/38> (Accessed on 08.10.2024).
5. Disoft software // Limited Liability Company “Center Tsifra” [website]. 2024. Available at: <https://digital-xray.ru/product/po-disoft/#desc> (Accessed on 08.10.2024).
6. Grudsky A. Ya., Velichko V. Ya. Digitization of radiographic images is not very easy // In the world of NDT. 2011. No. 4 (54). P. 74—76.
7. Grudsky A. Ya., Velichko V. Ya., Dech A. V. How to guarantee the reliability and quality of the digital archive of X-ray images of annular welded joints of the main pipeline? // In the world of NDT. 2012. No. 4 (58). P. 34—40.
8. Bagaev K. A., Kozlovsky S. S. Digitization of X-ray films. What should be taken into account when developing and implementing Russian standards // In the world of NDT. 2013. No. 3 (61). P. 30—35.
9. Dech A. V. Requirements for software applications for improving and archiving X-ray images // In the world of NDT. 2003. No. 3 (21). P. 66—68.
10. Kosarinal E.I., Krupninal O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography // Aviation Materials and Technologies. 2019. No. 1 (54). P. 37—42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
11. Nazarenko S.Yu., Udod V.A. Application of artificial neural networks in radiation non-destructive testing // Defectoskopiya. 2019. No. 6. P. 53—64.
12. Vorobeychikov S.E., Fokin V.A., Udod V.A., Temnik A.K. Estimating the efficiency of two algorithms for segmentation of digital radiation images of test objects // Defectoskopiya. 2017. No. 2. P. 60—67.
13. Liu T., Zheng P., Bao J., Chen H. A state-of-the-art survey of welding radiographic image analysis: Challenges, technologies and applications // Measurement. 2023. V. 214. P. 112821. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112821
14. Block S. B., Da Silva R. D., Lazzaretti A. E., Minetto R. LoHi-WELD: A Novel Industrial Dataset for Weld Defect Detection and Classification, a Deep Learning Study, and Future Perspectives // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 77442—77453. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3407019
15. Say D., Zidi, S., Qaisar S.M., Krichen M. Automated Categorization of Multiclass Welding Defects Using the X-ray Image Augmentation and Convolutional Neural Network // Sensors. 2023. V. 23. P. 6422. <https://doi.org/10.3390/s23146422>
16. Zhao S., Long L., An D., Wang Y., Zhang H., Liang H., Jin S. Design and Realization of Nondestructive Testing Information Management System for Shell Electron Beam Welds // Software Engineering and Applications. 2022. V. 11. No. 5. P. 1005—1016. DOI: 10.12677/SEA.2022.115103. <https://doi.org/10.12677/sea.2022.115103>
17. Harrouche S., Nacereddine N., Goumeidane A.B. A Comparative Study of Different CNN Models using Transfer Learning for Weld Defect Classification in Radiographic Testing // Proc. of the 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE) 30—31 December 2023, Dubai, UAE. DOI: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442057
18. Grigorchenko S.A., Efimenko L.A. Automation of computer interpretation of radiation images of welded joints // Defectoskopiya. 2015. No. 1. P. 21—27.
19. Grigorchenko S.A., Kapustin V.I. Classification of flaws in automated radiographic inspection of welded joints // Defectoskopiya. 2009. V. 45. No. 9. P. 73—87.
20. Kapustin V.I., Zuev V.M., Ivanov V.I., Dub A.V. Radiographic inspection. Information aspects. Moscow: LLC Publishing House “NAUCHTEKHLITIZDAT”, 2010. 368 p.
21. NP-105-18. Rules for metal control of equipment and pipelines of nuclear power plants during manufacture and installation.
22. GOST 23055—78. Non-destructive testing. Fusion welding of metals. Welds classification by radiography testing results
23. STO Gazprom 2-2.4-917-2014. Instructions for radiographic quality control of welded joints during the construction and repair of field and main pipelines.
24. Grigorchenko S.A. Automated assessment of the quality of welded joints according to the parameters of radiographic images of flaws // Control. Diagnostics. 2009. No. 10. P. 30—36.