

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ МЕТОДИКА БРАКОВКИ ДЕФЕКТОВ КОЛЬЦЕВОГО СВАРНОГО ШВА В ПРОЦЕССЕ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ

© 2019 г. Л.Н.Степанова^{1,2,*}, С.И.Кабанов¹, И.С.Рамазанов¹, В.В.Чернова^{1,2}

¹ ФГУП Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А.Чаплыгина,
Россия 630051 Новосибирск, ул. Ползунова, 21

² Сибирский государственный университет путей сообщения,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191

*E-mail: aergroup@ngs.ru

Поступила в редакцию 03.06.2019; после доработки 09.09.2019

Принята к публикации 04.10.2019

Предложена методика браковки кольцевых сварных швов, основанная на анализе основных параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ), регистрируемых в процессе многопроходной сварки. Точность локации сигналов АЭ, регистрируемых от дефектов, и их фильтрация от шумов и помех обеспечивались применением модифицированного табличного метода и браковочной сетки. С использованием энергии и амплитуды локализованных сигналов АЭ выполнен расчет нормированных коэффициентов, по которым оценивалось качество сварного шва при сварке. Определены пороговые значения нормированных коэффициентов, при превышении которых проводилась браковка сварного шва. С использованием рассматриваемой методики выявлены дефекты в кольцевых сварных швах и показана возможность определения степени опасности дефектов в режиме реального времени.

Ключевые слова: многопроходная сварка, кольцевой шов, дефект, акустическая эмиссия, локация, кластер, браковочная сетка.

DOI: 10.1134/S0130308219120030

ВВЕДЕНИЕ

Основной причиной, снижающей технологическую прочность сварных соединений, являются дефекты (трещины, непровары, шлаковые включения), образующиеся при сварке и выявляемые различными методами неразрушающего контроля (НК). Устранение дефектов связано с повторной заваркой шва, что вызывает появление дополнительных концентраторов напряжений и оказывает влияние на общую прочность конструкций. Дефекты, возникающие при многопроходной сварке конструкции, могут способствовать образованию и развитию усталостных трещин в процессе ее эксплуатации.

В промышленности при контроле дефектов сварки используются ультразвуковой, рентгенографический, магнитный и визуально-оптический методы. Они позволяют определять местоположение дефектов, размеры и глубину их залегания. Однако применять такие методы можно только после полного остывания, формирования сварного шва и выполнения подготовительных операций по его зачистке. Устранение дефектов многопроходной сварки связано с выполнением значительного объема работ по выборке металла и приводит к снижению прочностных характеристик сварного соединения [1, 2]. Общим недостатком данных методов контроля является сложность автоматизации при определении координат дефектов сварки и их браковки в режиме реального времени.

В настоящее время для контроля качества сварного соединения получают распространение методы диагностики, способные выполнять контроль дефектов в режиме реального времени. Одним из них является метод акустической эмиссии (АЭ). Он обладает высокой чувствительностью, локализует дефекты, позволяет оценивать ресурс конструкции и степень опасности дефектов сварки [3–6].

В связи с появлением современных быстродействующих микропроцессорных измерительных и диагностических систем повысилась достоверность результатов контроля дефектов конструкций данным методом. Основным недостатком метода АЭ является низкая помехозащищенность.

Примеры использования метода АЭ для контроля различных сварных конструкций, трубопроводов, мостов, в которых дефекты определяются при их механическом нагружении, приведены в [1, 3–9].

Метод АЭ используется для регистрации дефектов в процессе многопроходной сварки, когда необходимая нагрузка на объект создается за счет теплового режима. При этом в материале сварного шва и в околошовной зоне возникают растягивающие напряжения из-за кристаллизации расплава и остывания сварочной ванны. Для отработки методики контроля дефектов сварки используют образцы, в которых осуществляют имитацию дефектов сварки за счет введения в расплавленный металл сварного шва вставок из титана, вольфрама, шлаковых включений и т.д., либо нарушают

технологии сварки для инициирования появления пор, непровара, трещин [10]. Однако это не всегда позволяет адекватно смоделировать процесс реального дефектообразования при сварке.

Контроль дефектов конструкций в момент сварки металлов существенно осложняется, так как он сопровождается высокой интенсивностью акустических и электромагнитных помех. При этом для определения координат дефектов и степени их опасности необходимо в режиме реального времени выделять сигналы АЭ от дефектов из общего уровня зарегистрированных сигналов. Кроме того, звуковая волна до преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) проходит не по прямому волноводу, а отражается от границ раздела сред и различных неоднородностей. Это вызывает искажение формы сигнала АЭ и нарушает точность триангуляционной локации.

Для повышения надежности АЭ-контроля дефектов многопроходной сварки в процессе сварки разрабатываются новые АЭ-системы [11] и методы кластерного анализа [12, 13], выполняется анализ модового состава сигналов АЭ [14], создаются новые способы АЭ-контроля дефектов сварки [15, 16—23].

В настоящее время интерес к решению задач, связанных с использованием метода АЭ для определения координат дефектов и степени их опасности в момент сварки и остывания сварного шва, когда еще можно устранить дефекты с минимальным объемом выборки металла, прослеживается в работах отечественных и зарубежных авторов. Эти преимущества метода АЭ особенно важны при определении дефектов многопроходной сварки толстостенных конструкций [2, 24—26].

Цель работы — разработка методики АЭ браковки дефектов кольцевого сварного шва в процессе его сварки и остывания.

МЕТОДИКА БРАКОВКИ ДЕФЕКТОВ СВАРНОГО ШВА

Надежность выявления дефектов в сварном шве в момент сварки во многом определяется разработанной методикой АЭ-контроля [2, 14, 16—26]. Активность появления сигналов АЭ высокой амплитуды со временем снижается по мере остывания сварного шва. Локация сигналов АЭ осуществляется триангуляционным методом по разности времен прихода (РВП) их на датчики пьезоантенны.

Однако при триангуляционной локации сигналов АЭ достоверность результатов контроля конструкции с кольцевым сварным швом оказывалась значительно ниже, чем при сварке линейных швов. Это объясняется сложной кольцевой формой свариваемого контура и непрямолинейным распространением звуковых волн до ПАЭ [14, 24]. При использовании простой триангуляционной локации для источников, расположенных на равноудаленном от двух акустических датчиков участке, локационная картина кольцевого контура искажалась (рис. 1а) и образовывала ромб. Поэтому для локации сигналов АЭ в кольцевом сварном шве применялся модифицированный табличный метод [17, 26]. По контуру сварного шва программно накладывалась браковочная сетка, что позволяло повысить точность определения координат дефектов, так как размер ячеек сетки определялся исходя из скорости распространения акустического сигнала в материале конструкции и необходимой точности локации дефектов.

Перед началом контроля выполнялась калибровка сварного шва в каждой ячейке сетки (рис. 1б) и полученные значения РВП заносились в локационную таблицу программы для расчета координат. Для этого с учетом скорости звука и конфигурации конструкции по контуру сварного шва размещалась пьезоантенна, состоящая из четырех ПАЭ.

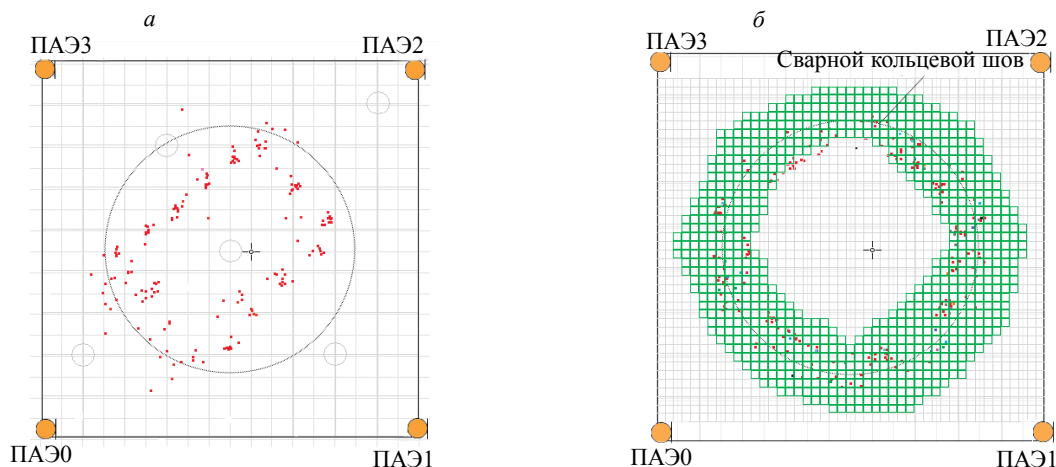


Рис. 1. Локация сигналов АЭ при калибровке зоны контроля кольцевого сварного шва:
а — триангуляционная локация; б — локация табличным методом с нанесенной браковочной сеткой.

В процессе каждого прохода сварного шва осуществлялся прием сигналов АЭ, их усиление, фильтрация, аналого-цифровое преобразование, регистрация времен прихода на ПАЭ и определение активных областей. При контроле сварки проводилось сравнение РВП зарегистрированных сигналов АЭ с соответствующим набором РВП, занесенным в таблицу.

После калибровки выполнялся первый проход сварки кольцевого шва. Прогноз степени опасности дефектов проводился за счет анализа всех локализованных сигналов АЭ. Для этого в каждой ячейке сетки задавались уровни браковки. Разработанная методика контроля была связана с подсчетом энергии и амплитуды сигналов АЭ, попавших в зону браковки, и их сравнением с пороговыми значениями для каждой ячейки сетки.

Затем производилось суммирование амплитуд от всех локализованных сигналов, координаты которых соответствовали непустым ячейкам браковочной сетки. При этом исключались ячейки, в которых суммарная амплитуда была ниже порогового значения $A_{0,1}$, составляющего 10 % от максимальной суммарной амплитуды. Расчет среднего значения амплитуды \bar{A} выполнялся с использованием индикаторной функции $\chi_{i,j}$, определенной для каждой ячейки:

$$\chi_{i,j} = \begin{cases} 0, & (A_{\Sigma})^{i,j} < A_{0,1} \\ 1, & (A_{\Sigma})^{i,j} \geq A_{0,1} \end{cases}, \quad (1)$$

где i — номер строки; j — номер столбца.

Индикаторная функция $\chi_{i,j}$ равна единице для массива ячеек браковочной сетки, в которых суммарная амплитуда больше порогового значения $A_{0,1}$. По всем точкам i, j производился расчет средних значений суммарной амплитуды \bar{A} и энергии \bar{E} :

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i,j} (A_{\Sigma})^{i,j} \cdot \chi_{i,j}}{\sum_{i,j} \chi_{i,j}}; \quad (2)$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i,j} (E_{\Sigma})^{i,j} \cdot \chi_{i,j}}{\sum_{i,j} \chi_{i,j}}, \quad (3)$$

где $(A_{\Sigma})^{i,j}$ — массив значений суммарной амплитуды в ячейке браковочной сетки, В; $(E_{\Sigma})^{i,j}$ — массив значений суммарного энергетического параметра $MARSE$ в ячейке браковочной сетки, мВ·мкс.

При расчете средней амплитуды \bar{A} сигналов АЭ использовались только элементы массива ячеек со значениями выше порогового. При этом из рассмотрения исключались ячейки с малым количеством локализованных сигналов АЭ небольшой амплитуды, так как они обладали большой погрешностью локализации. Рассчитанное среднее значение использовалось в качестве нормирующей величины, после чего производилось выделение активных областей и рассчитывалась максимальная величина браковочного коэффициента по амплитуде:

$$K_{A_{\max}} = \frac{\max(A_{\Sigma})^{k,n}}{\bar{A}}, \quad (4)$$

где k, n — число строк и столбцов в ячейке браковочной сетки.

Для локализации активных областей в каждой ячейке браковочной сетки вычислялись нормированные коэффициенты $K^{i,j}$ по средней амплитуде \bar{A} и энергии \bar{E} :

$$K_A^{i,j} = (A_{\Sigma})^{i,j} / \bar{A}, \quad (5)$$

$$K_E^{i,j} = (E_{\Sigma})^{i,j} / \bar{E}. \quad (6)$$

Пороговые значения нормированных коэффициентов получены при многопроходной сварке двух стальных листов с имитацией дефектов сварки (табл. 1) за счет введения в сварной шов вставок из титана, вольфрама, шлака [25, 26]. При этом нормированный коэффициент малозначительного дефекта равен $K_{C1} = 2$, а для значительного он составил $K_{C2} = 3$. Для процесса остывания этот коэффициент равен $K_{O1} = 2$.

Таблица 1

Нормированные коэффициенты АЭ-контроля сварки для искусственных дефектов

Номер п/п	Номер прохода	Вид вставки, имитирующей дефект	Максимум суммарной амплитуды, мВ	Средняя суммарная амплитуда, мВ	Нормированный коэффициент $K_A^{i,j}$ для зоны вставки
1	3	Первая титановая вставка	12900,7	2943,8	4,38
2	4		6964,1	1960,0	3,55
3	5		7402,0	1890,1	3,92
4	6	Вольфрамовая вставка	13849,9	3036,0	4,56
5	7		9287,2	2174,6	4,27
6	8		4501,4	1238,7	3,63
7	9	Шлаковая вставка	14221,1	3461,2	4,11
8	10		8047,4	1928,1	4,17
9	11		3553,7	1563,6	2,27
10	12	Имитация непровара	7155,5	2060,3	3,47
11	13		3976,3	2042,7	1,95
12	14		3597,8	1572,2	2,29
13	16	Вторая титановая вставка	8905,0	2082,2	4,28
14	20	Третья титановая вставка	11191,9	2287,4	4,89

Затем осуществлялось сравнение вычисленных значений нормированных коэффициентов $K^{i,j}$ с их пороговыми значениями. При превышении первого порогового значения K_{C1} дефект считался малозначительным, при превышении второго порогового значения K_{C2} — значительным.

Активные области локации в зонах введения в сварной шов вставок наблюдались в течение трех и более проходов. Поэтому при контроле кольцевого сварного шва считалось, что если на различных проходах сварки было трехкратное превышение первого порогового значения нормированного коэффициента в данной ячейке сетки, то данный тип дефекта считался значительным.

По формулам (5) или (6) в процессе остывания сварного шва вычислялись нормированные коэффициенты $K^{i,j}$ по амплитуде или по энергии и сравнивались с их пороговыми значениями. Затем по сварному шву корректировались координаты расположения активных областей.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера рассмотрим процесс АЭ-контроля дефектов при сварке трубы, выполненной из стали Ст3 с внешним диаметром 325 мм и толщиной стенки 9 мм. В процессе сварки сигналы АЭ поступали в измерительные каналы системы непрерывно, что могло привести к переходу их операционных усилителей в состояние насыщения. Поэтому для регистрации АЭ-информации использовалась диагностическая система СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство RU.C.27. 007.A № 40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерения под номером 45154-10) [11].

На свариваемую конструкцию трубы устанавливалась прямоугольная пьезоантенна, состоящая из четырех ПАЭ типа ПК-01-07 с полосой пропускания (100—700) кГц.

Для проведения калибровки кольцевой сварной шов разбивался на сегменты, в каждом из которых имитатором Су-Нильсена возбуждался сигнал АЭ. По временам прихода и расстояниям между датчиками рассчитывалась скорость звука, после чего проводилась локация сигналов АЭ и осуществлялось построение браковочной сетки по контуру кольцевого сварного шва (см. рис. 1б).

Локация сигналов АЭ осуществлялась только в области браковочной сетки. При этом производилось суммирование амплитуды для каждой ячейки сетки от всех локализованных сигналов. Группа смежных ячеек сетки, в которых коэффициенты $K_A^{i,j}$ превышали первый пороговый уровень, составляли активную область.

Нормированные коэффициенты сигналов АЭ, локализованных в активной области 1 (рис. 2), были равны $K_A^{i,j} = 2,65$ и незначительно превышали первое пороговое значение, равное $K_{C1} = 2,0$. Поэтому дефект считался малозначительным. Дефект активной области 2 считался значительным,

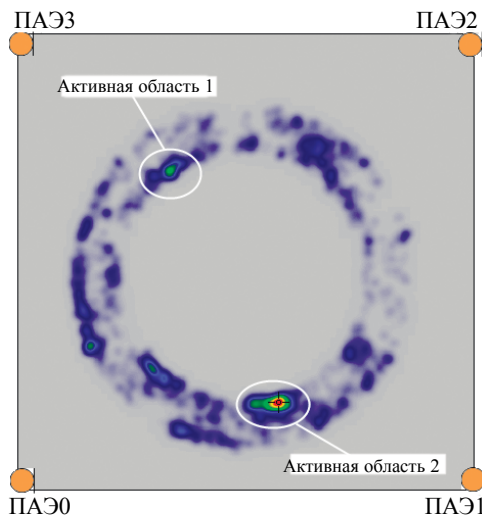


Рис. 2. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при сварке кольцевого сварного шва.

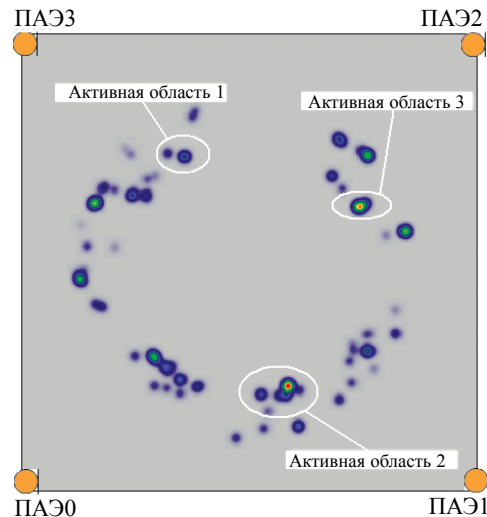


Рис. 3. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при остывании кольцевого сварного шва.

так как нормированные коэффициенты составили $K_A^{i,j} = 5,20$ и превышали второе пороговое значение, равное $K_{C2} = 3,0$.

В процессе остывания кольцевого сварного шва регистрировались сигналы АЭ и для локализованных активных областей (рис. 3) были определены значения массивов нормированных коэффициентов.

Сравнение данных коэффициентов с пороговым значением для этапа остывания сварного шва показало, что в активной области 1 они были равны $K_A^{i,j} = 1,33$ и не превышали порогового значения $K_{O1} = 2,0$, соответствующего процессу остывания. Поэтому дефект в активной области 1 по-прежнему считался малозначительным. Для активной области 2 нормированный коэффициент, равный $K_A^{i,j} = 4,19$, превышал пороговое значение для процесса остывания $K_{O1} = 2,0$, поэтому данный дефект являлся значительным. Также были зарегистрированы сигналы от источника, расположенного в активной области 3 (см. рис. 3). Для этих сигналов нормированные коэффициенты составили $K_A^{i,j} = 3,49$. При остывании сварного шва было подтверждено наличие значительного дефекта в активной области 2 и выявлен дополнительный дефект в области 3.

Для подтверждения полученных результатов браковки с использованием нормированных коэффициентов был проведен дополнительный анализ результатов АЭ-контроля дефектов в процессе сварки в режиме постобработки с применением кластеризации сигналов АЭ по их цифровой форме [14]. При сварке кольцевого сварного шва общей протяженностью 1025 мм было зарегистрировано 17110 сигналов АЭ. При выполнении кластеризации было сформировано 105 кластеров, наибольший из которых состоял из 77 сигналов. При этом в кластеры по цифровой форме было включено 1244 сигнала. Большинство кластеров (около 75 %) было локализовано в секторах сварного шва, соответствующих активным областям 1 и 2 (см. рис. 2). Кластеры с наибольшим числом сигналов АЭ приведены в табл. 2.

Для кластеров выполняли оценку энергии соответствующего источника в сварном шве с использованием внутрикластерной медианы значений $MARSE (\zeta_{1/2})_J$ и внутрикластерного среднего значения:

$$\bar{M}_E^J = \frac{1}{N_J} \sum_{i=1}^{N_J} E_{i,J}, \quad (7)$$

$$F_J(\zeta_{1/2}) = 1/2, \quad (8)$$

где N_J — количество сигналов в кластере J ; $E_{i,J}$ — величина энергетического параметра $MARSE$ сигнала i , входящего в кластер J ; \bar{M}_E^J — среднее значение $MARSE$ для сигналов АЭ, составляющих кластер J ; $(\zeta_{1/2})_J$ — медиана значений $MARSE$ для кластера J ; $F_J(\zeta_{1/2})$ — функция распределения значений $MARSE$ в кластере J .

В [14] показано, что значительными можно считать дефекты в сварном шве, для которых медиана энергии сигналов соответствующего кластера превышает медиану энергии всех зарегистриро-

Таблица 2

Кластеры сигналов АЭ, полученные при кластеризации по цифровой форме

Номер кластера	Количество сигналов АЭ	Среднее значение $MARSE$, В·мкс	Медианное значение $MARSE$, В·мкс	Суммарное значение $MARSE$, В·мкс	Номер активной области
1	77	12,72	11,22	979,39	2
2	37	155,51	82,0	5754,00	1
3	33	206,30	82,28	6807,91	2
4	24	74,43	50,43	1786,33	2
5	23	244,19	85,88	5616,32	1
6	23	135,64	49,73	3119,67	1
7	22	384,19	115,22	8452,2	2
8	22	79,59	42,65	1750,72	2
9	21	182,41	45,17	3830,65	2
10	21	126,15	47,49	2649,06	1
11	19	33,03	30,71	627,54	2
12	19	113,88	47,81	2163,64	2

ванных сигналов АЭ. Для всех сигналов, зарегистрированных при сварке трубы, медиана $MARSE$ составила $(\zeta_{1/2})_{\Sigma} = 91,23$ мВ·мкс. Из данных табл. 2 следует, что только для кластера 7, соответствующего второй активной области, выполнялось данное условие превышения энергии. Кроме того, для кластеров 2, 3, 5 величина медианы $MARSE$ $(\zeta_{1/2})_J$ близка к медиане всех зарегистрированных сигналов $(\zeta_{1/2})_{\Sigma}$ АЭ. Следовательно, активная область 1, с которой связаны кластеры 2 и 5 содержит малозначительный дефект, а активная область 2, связанная с кластерами 3 и 7, содержит значительный дефект.

Эффективность методики браковки дефектов проверялась при сварке образца из стали (рис. 4) размерами 1800×1800 мм, в который вваривалась труба высотой 500 мм и диаметром 700 мм [14].

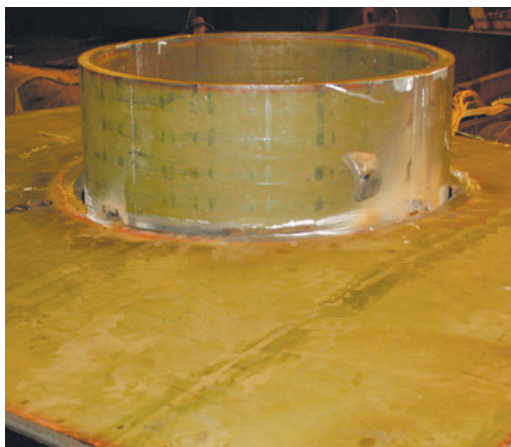


Рис. 4. Фотография конструкции с кольцевым сварным швом.

Для имитации дефектов сварных соединений в процессе сварки в корень сварного шва закладывались вставки из титана и шлака. При этом сварной шов был разделен на 12 секторов. В процессе предварительной сварки в секторах с нечетными номерами вводились искусственные дефекты. В секторе 1 методом нарушения технологии сварки в корне сварного шва закладывалась трещина. В секторе 3 сварка выполнялась по незачищенным кромкам для нарушения целостности сварного шва. В секторе 5 за счет изменения силы тока сварки формировался непровар корня шва. В секторе 7 формировались поры в сварном шве. В секторах 9 и 11 в сварной шов закладывались шлаковое включение и титановая вставка.

Сварка конструкции (см. рис. 4) проводилась в два этапа. В первом этапе было выполнено четыре прохода сварки. При этом формировался корень шва и осуществлялось последовательное введение искусственных дефектов в сварной шов. На втором этапе осуществлялась сварка по обе стороны от корня шва с его усилением. В табл. 3 приведены значения нормированных коэффициентов $K_A^{i,j}$, вычисленных по формуле (5), для первого этапа сварки при формировании корня сварного шва. Во всех секторах, не отмеченных в табл. 3, максимальная величина нормированных коэффициентов была близка к первому пороговому значению $K_{C1} = 2$, но не превосходила его.

Таблица 3

Нормированные коэффициенты АЭ-контроля первого этапа сварки для искусственных дефектов кольцевого сварного шва

Номер прохода	Номер дефектного сектора	Вид искусственного дефекта	Максимум суммарной амплитуды, мВ	Средняя суммарная амплитуда, мВ	Нормированный коэффициент $K_A^{i,j}$ для зоны дефекта
1	1	Трещина	10953,4	2722,2	4,02
	7	Поры	13298,6		4,89
	9	Шлаковое включение	9058,2		3,33
2	9	Шлаковое включение	13660,0	2637,1	5,18
3	7	Поры	9805,7	3082,7	3,18
	9	Шлаковое включение	14431,1		4,68
4	1	Трещина	6811,9	2277,9	2,99
	5	Непровар	7735,5		3,40
	7	Поры	9876,5		4,34
	9	Шлаковое включение	6261,3		2,75

В табл. 4 приведены значения нормированных коэффициентов $K_A^{i,j}$ для второго этапа многопроходной сварки.

В процессе сварки были выполнены проходы (1—4) с одной стороны конструкции для усиления корня сварного шва. На рис. 5 показана локация сигналов АЭ в различных секторах сварного шва. Затем конструкция была перевернута и выполнены проходы сварки (5—8) с другой стороны (рис. 6).

При сварке стороны 1 конструкции было выделено 5 активных областей (см. рис. 5). Активная область 1 располагалась в начале сектора 1 сварного шва. Во время первого из четырех проходов

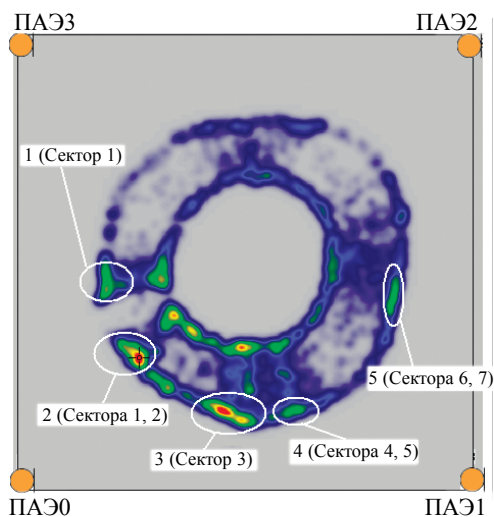


Рис. 5. Локация сигналов АЭ после пяти проходов сварки (сторона 1 свариваемой конструкции).

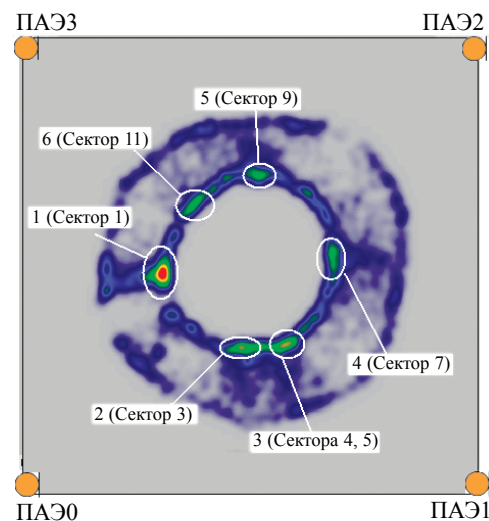


Рис. 6. Локация сигналов АЭ после четырех проходов сварки (сторона 2 свариваемой конструкции).

Таблица 4

Нормированные коэффициенты АЭ-контроля второго этапа сварки для искусственных дефектов кольцевого сварного шва

Номер прохода	Номер дефектного сектора	Вид искусственного дефекта	Максимум суммарной амплитуды, мВ	Средняя суммарная амплитуда, мВ	Нормированный коэффициент $K_A^{i,j}$ для зоны дефекта
1	1	Трещина	14320,9	3838,2	3,74
	3	Нарушение технологии	17073,2		4,45
	5	Непровар	8252,1		2,15
	7	Поры	8924,6		2,33
2	1	Трещина	20381,7	4678,6	4,36
	3	Нарушение технологии	18755,2		4,01
	5	Непровар	10994,7		2,35
3	1	Трещина	10446,3	2937,0	3,56
	3	Нарушение технологии	13375,13		4,55
4	1	Трещина	9107,9	2149,4	4,24
	5	Непровар	8736,7		4,06
	7	Поры	7036,1		3,22
5	1	Трещина	15757,9	3499,2	4,50
	5	Непровар	10255,9		2,93
	7	Поры	8816,1		2,52
	9	Шлаковое включение	11443,8		3,27
	11	Титановая вставка	11939,2		3,41
6	1	Трещина	22690,9	4756,6	4,77
	3	Нарушение технологии	14652,3		3,08
	5	Непровар	17853,9		3,75
7	1	Трещина	15995,7	3820,6	4,19
	3	Нарушение технологии	11592,4		3,03
	5	Непровар	10035,1		2,63
	7	Поры	9961,8		2,61
	9	Шлаковое включение	8320,8		2,18
	11	Титановая вставка	14115,1		3,69
8	1	Трещина	20209,2	4309,1	4,69
	3	Нарушение технологии	13341,1		3,10
	5	Непровар	14010,0		3,25
	7	Поры	9512,7		2,21
	9	Шлаковое включение	11940,6		2,77
	11	Титановая вставка	10714,7		2,49

сварки (см. табл. 4) максимальная величина нормированных коэффициентов для ячеек браковочной сетки, соответствовавших активной области 1, составила $K_A^{i,j} = 3,74$. Поэтому данный дефект был отмечен как значительный. На последующих проходах величина нормированного коэффициента по амплитуде для активной области 1 постоянно снижалась. По итогам анализа суммарной информации за четыре прохода средняя величина нормированного коэффициента составила 2,72. Активная область 2 располагалась на границе секторов 1 и 2. Данная область была активной на протяжении всех четырех проходов сварки. Значения нормированных коэффициентов изменялись в пределах от 3,11 до 4,36. Средняя величина нормированного коэффициента по итогам четырех проходов сварки составила 4,12. Рассмотренные активные области были связаны с искусственным дефектом сектора 1, которым была трещина в корне сварного шва.

Активная область 3 располагалась в секторе 3 и при выполнении первых трех проходов (см. табл. 4) сварного шва нормированные коэффициенты для нее изменялись в диапазоне от 4,01 до 4,55. Во время четвертого прохода сварного шва нормированные коэффициенты в данной области не превышали пороговое значение, т.е. дефект акустически не проявлялся как активный. Средняя величина максимума нормированных коэффициентов активной области 3 по итогам четырех проходов сварки составила 3,88. Активная область 4 располагалась на границе секторов 4 и 5. При первых двух проходах сварки нормированные коэффициенты для нее были равны 2,35 и 2,15. Поэтому данный дефект был помечен как малозначительный. Однако при четвертом проходе сварного шва величина максимума нормированных коэффициентов составила 4,06, что дало основание считать сектор 5 содержащим значительный дефект. Активная область 5 располагалась на границе секторов 6 и 7 сварного шва. Она была впервые отмечена при четвертом проходе сварного шва с величиной нормированных коэффициентов, равной 3,22, как значительный дефект.

В процессе сварки конструкции со стороны 2 было выделено 6 активных областей сварного шва. Активная область 1 соответствовала сектору 1 сварного шва. Данная область была активна в течение всех проходов сварки стороны 2. Величины максимумов нормированных коэффициентов изменялись от 4,19 до 4,77. Поэтому данная область была отмечена как содержащая значительный дефект. Ультразвуковой контроль и настройка браковочной чувствительности проводился с использованием дефектоскопа Д-20. При выполнении УЗ контроля сварного шва после окончания сварки данный сектор был забракован как содержащий протяженные дефекты общей длиной 122 мм. Активная область 2 располагалась в секторе 3. Она была активна во время шестого, седьмого и восьмого проходов с величинами нормированных коэффициентов 3,03—3,10. Активная область 3 соответствовала границе секторов 4 и 5. Нормированные коэффициенты для нее изменялись в диапазоне (2,63—3,75). Активные области 4, 5, 6 соответствовали секторам 7, 9 и 11. Для каждой из них величины нормированных коэффициентов превышали первое пороговое значение $K_{c1} = 2,0$ трижды на протяжении четырех проходов сварки, поэтому в данных секторах были отмечены значительные дефекты, соответствовавшие искусственным дефектам сварки, введенным в сварной шов на предварительных проходах (см. табл. 3). Таким образом, с использованием описываемой методики АЭ-контроля сварки были обнаружены все искусственные дефекты.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика, позволяющая по анализу суммарного значения амплитуды сигналов АЭ и энергетического параметра *MARSE*, выполнять браковку дефектов в процессе сварки и остывания сварного шва.

2. С применением табличного метода локации сигналов АЭ удалось повысить точность определения координат дефектов кольцевого сварного шва в процессе сварки. Использование аналитического метода для кольцевых сварных швов приводит к искажению локационной картины. Совместное использование табличного метода локации и браковочной сетки, программно накладываемой на объект контроля, позволило получить точную и наглядную картину локации дефектов, учитывающую форму сварного шва и особенности непрямолинейного распространения сигналов АЭ.

3. Области сварного шва с высокой активностью излучения сигналов АЭ определялись по превышению пороговых значений нормированных браковочных коэффициентов, полученных для средних значений энергии и амплитуды сигналов, зарегистрированных на разных этапах сварки и остывания. Нормированные браковочные коэффициенты рассчитывались методом сравнения величины суммарной энергии и амплитуды для каждой ячейки со средними значениями тех же параметров, но для всех ячеек браковочной сетки. Пороговые величины браковочных коэффициентов определялись из экспериментальных данных в процессе АЭ-контроля сварки образцов с введенными искусственными дефектами.

Результаты браковки с использованием нормированных коэффициентов были подтверждены УЗ методом контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. Киев: ИНДПРОМ, 2008. 816 с.
2. Гуменюк В.А., Казаков Н.А., Сульженко В.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки объектов морской техники // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 4. С. 20—25.
3. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвеев И.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 11. С. 38—45.

4. *Nosov V.V., Zelenskii N.A.* Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of Temporal Dependences of Acoustic-Emission Parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 2. P. 89—95.
5. *Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В.* Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 96—101.
6. *Носов В.В., Зеленский Н.А.* Контроль и диагностика кольцевых элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2016. №12. С. 30—39.
7. *Бигус Г.А., Сабреков М.А.* Исследование наименее прочных участков металлоконструкции с использованием метода акустической эмиссии // Сварка и диагностика. 2013. № 4. С. 36—40.
8. *Ченцов В.П.* Акустическая эмиссия при упругопластическом деформировании конструкционных материалов и опыт ее применения в неразрушающем контроле. Хабаровск; Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014. 268 с.
9. *Черняева Е.В., Галкин Д.И., Бигус Г.А., Мерсон Д.Л.* Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости // Сварка и диагностика. 2010. № 2. С. 50—57.
10. Patent of Sweden No 376084, MCP 4G 1N29/04. Anordning för bedömning av mateerialfel vid ultraljudundersökning / Boström E. Y; Motala Verkstad AB [SE]. Declared 05. 10.1972; publication 05.05.1975. 4 p.
11. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И.* Диагностический модуль распределенной акустико-эмиссионной системы // Датчики и системы. 2016. № 5. С. 37—43.
12. *Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Kaniifadin K.V.* Analysis of errors in location of flaws in multipass welds using different clustering methods // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 2. P. 96—103.
13. *Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С.* Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 12—21.
14. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И.* и др. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки. Новосибирск: Наука, 2018. 272 с.
15. *Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Канифадин К.В.* Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе многопроходной сварки и устройство для его осуществления / Патент 2 572 067 РФ, МПК G 01 N 29/14. Заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщений, № 2014132494/ 28. Заявл. 06.08.2014; опубл. 27.12.2015. Бюл. № 36. 11 с.
16. *Гомера В.П., Смирнов А.Д., Нефедьев Е.Ю., Потапов А.И., Зотов К.В.* Обнаружение методом акустической эмиссии трещин в сварном шве в процессе сварки // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 25—32.
17. *Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kireenko V.V.* The Development of a Defect-Rejection Procedure for Multiple-Pass Welding by the Distribution of the Principal Parameters of Acoustic-Emission Signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 11. P. 667—678.
18. *Баринов А.В., Федоров А.В., Кинжагулов И.Ю., Сергеев Д.С., Доренская А.В.* Контроль качества сварных соединений в процессе сварки с применением метода акустической эмиссии // Науч.-техн. вестник ИТМО. 2013. № 5(87). С.144—148.
19. Real-time weld process monitoring / Edited by Yu Ming Zang — Cambridge. England, 2008. 299 p.
20. *Meng X., Papaelias M., Huang Z., Melton G.* Welding quality monitoring using acoustic emission techniques / Conference: First World Congress on Condition Monitoring — WCCM 2017. At London. UK. June. 2017.
21. *Zhang L., Carmen Basantes-Defaz A., Ozevin D.* Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. April. 2019. V. 101. Issue 5—8. P. 1623—1634.
22. *Brunner A., Tannert T., Tallée T.* Waveform analysis of acoustic emission monitoring of tensile tests on welded wood-joints // J. Acoustic Emission. 2010. V. 28. P. 59—67.
23. *Poopat B., Jirarungsatean C.* Feasibility Study of Acoustic Emission Monitoring of Hot Cracking in GTAW Weld // Key Engineering Materials. March 2013. V. 545. P. 236—240.
24. *Гуменюк В.А., Несмашный Е.В.* Оптимизация алгоритма акустико-эмиссионной локации дефекта в кольцевых швах сварных конструкций // Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 34—42.
25. *Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Киреенко В.В., Вонсовский А.В., Рамазанов И.С.* Акустико-эмиссионный контроль дефектов в процессе многопроходной сварки образцов из судостроительной стали // Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 74—80.
26. *Stepanova L. N., Ramazanov I. S., Kireenko V. V.* Acoustic-Emission Location of Flaws during Multiple-Run Welding of Contours with Complex Shapes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 5. P. 261—268.