

На правах рукописи

Канифадин Кирилл Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ АКУСТИКО-
ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В
ПРОЦЕССЕ СВАРКИ И ОСТЫВАНИЯ СВАРНОГО ШВА**

Специальность 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет
путей сообщения» (СГУПС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Степанова Людмила Николаевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смирнов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор
Сидуленко Олег Анатольевич

Ведущая организация: ОАО «Новосибирский завод химкон-
центратов» (г. Новосибирск)

Защита состоится «20» декабря 2011 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 35.

Автореферат разослан «14» ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
кандидат технических наук, доцент

 Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сварка является одним из ведущих и эффективных процессов обработки металлов. Преимущества перед другими способами получения неразъемных соединений обеспечили ей широкое применение в машиностроении, на железнодорожном транспорте, в авиации, судостроении, строительстве и т.д. К качеству сварных соединений предъявляются высокие требования. Основной причиной, снижающей технологическую прочность сварных соединений, являются дефекты (трещины, непровары, шлаковые включения), образующиеся при сварке и выявляемые различными методами неразрушающего контроля (НК).

В настоящее время для решения задач по контролю качества сварного шва все большее распространение получают современные методы контроля, позволяющие автоматизировать процессы измерения и определять дефекты сварки в реальном масштабе времени. Одним из них является метод акустической эмиссии (АЭ).

При решении задач НК методом АЭ проводится контроль как небольших, так и крупногабаритных сварных конструкций без их демонтажа, осуществляется локализация и классификация дефектов по степени опасности независимо от их положения и ориентации в объекте контроля (ОК). При использовании данного метода влияние человеческого фактора на результаты контроля сведено к минимуму. Его применение не требует больших временных и материальных затрат по подготовке поверхности ОК, с его помощью оперативно выявляются развивающиеся дефекты, а их исправление осуществляется с минимальным объемом выборки металла. Это особенно важно при выполнении многопроходной сварки конструкций ответственного назначения.

Однако метод АЭ обладает рядом недостатков, основным из которых является низкая помехоустойчивость. Поскольку в процессе сварки сигналы АЭ регистрируются на фоне высокого уровня шумов и помех, то задача повышения надежности и достоверности контроля дефектов сварки актуальна. Это достигается за счет тщательной методической проработки процессов измерения и анализа сигналов АЭ. Для расширения возможностей современных микропроцессорных АЭ-систем необходимо разработать алгоритмы обработки сигналов, позволяющие решать задачи, связанные с повышением точности определения координат дефектов сварки и оценкой степени их опасности в режиме реального времени.

В настоящее время решению этих задач посвящено много работ, как в нашей стране, так и за рубежом. Среди отечественных следует отметить работы Алешина Н.П., Белова В.М., Дробота Ю.Б., Иванова В.И., Гуменюка В.А., Апасова А.М., Смирнова А.Н., Шухостанова В.К., Дороховой Е.Г. и ряда других.

При проведении АЭ-контроля в процессе сварки важной становится задача оптимального выбора информативных параметров сигналов АЭ, которые связаны с дефектами сварки.

Для обработки АЭ-информации, полученной в процессе сварки и остывания сварного шва, использовались методы математической статистики и кластерного анализа. Разработанные методы кластеризации по набору параметров сигналов АЭ и скорости нарастания их переднего фронта позволяют осуществлять кластеризацию за минимальное время. Принадлежность полученных кластеров к дефектам определялась на основе анализа их временных и энергетических параметров. Использование такого подхода позволило разработать способы, позволяющие надежно выявлять дефекты сварки в реальном масштабе времени.

Объектом исследования являются разработка алгоритмического процесса обработки временных и энергетических параметров сигналов АЭ, используемых при кластеризации в процессе определения координат дефектов сварки, степени их опасности и проведения браковки дефектных сварных швов.

Предмет исследования: способы АЭ-контроля качества сварного шва в процессе сварки и остывания с использованием регулируемого или нескольких фиксированных уровней селекции, разработка методического обеспечения с использованием кластеризации по набору параметров сигналов АЭ при автоматизированном контроле многопроходной сварки.

Цель диссертационной работы. Разработка методов кластеризации для повышения надежности выявления дефектов и оценки степени их опасности при акустико-эмиссионном контроле металлических конструкций в процессе сварки и остывания сварного шва.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка способа обнаружения дефектов сварных швов в процессе сварки с использованием трех уровней селекции с кластеризацией по скорости нарастания переднего фронта сигналов АЭ между пороговыми уровнями.
2. Разработка способа АЭ-контроля качества сварного шва в процессе сварки за счет регулирования порога селекции измерительного канала системы, кластеризации сигналов АЭ с отбраковкой по амплитуде и частоте.
3. Исследование предложенных алгоритмов кластеризации, позволяющих за минимальное время выделять группы сигналов от развивающихся дефектов сварки и проводить оценку степени их опасности.
4. Разработка методов локализации дефектов сварки в режиме реального времени.
5. Исследование влияния температуры ОК на характеристики преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) и погрешность локализации сигналов АЭ.
6. Разработка методики браковки дефектных сварных швов по энергетическим параметрам кластеров с определением опасных источников сигналов АЭ.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели использовались методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, кластерный анализ и теория распознавания образов.

Результаты, полученные в процессе теоретических исследований, подтверждены экспериментально с использованием фрактографии сварных швов при контроле процесса разрушения металлических образцов и образцов из ком-

позиционных материалов, процесса сварки рельсов и металлических объектов. Используемые в работе микропроцессорные АЭ и тензометрические системы сертифицированы в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии.

Научная новизна.

1. Разработан способ обнаружения дефектов сварных швов в процессе сварки с использованием трех уровней селекции и кластеризацией сигналов АЭ по скорости нарастания переднего фронта между пороговыми уровнями.
2. Предложен способ АЭ-контроля качества сварного шва в процессе сварки за счет регулирования порога селекции измерительного канала системы и кластеризации сигналов АЭ с отбраковкой по амплитуде и частоте.
3. Разработан и исследован метод кластеризации по набору параметров сигналов АЭ в процессе сварки и остывания сварного шва, позволяющий осуществлять обработку информации за минимальное время.
4. Обоснована методика оценки степени опасности дефектов по совокупности основных параметров кластеров.
5. Разработан алгоритм и программное обеспечение для АЭ-систем СЦАД-16.03, СЦАД-16.10 при браковке дефектов сварных соединений в процессе сварки и остывания сварного шва по энергетическим параметрам.

Практическая значимость работы.

По результатам работы подготовлены и практически реализованы методики АЭ-контроля дефектов сварки на основе предложенных методов кластеризации, которые входят в состав программных комплексов АЭ-контроля СЦАД-16.03 (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.27.007.A. №39729, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 18892-10), СЦАД-16.10 (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.27.007.A №40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений №45154-10), сертифицированных в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии. Разработанные способы контроля дефектов в момент сварки запатентованы и используются при контроле сварки металлических конструкций в ФГУП «СибНИА им. С.А.Чаплыгина», в ОАО «ПО» «Севмаш», а также – в курсе лекций по «Автоматизации измерений» СГУПС. За счет использования разработанных методик контроля дефектов сварки на основе разработанных методов кластеризации повысилась точность локализации и надежность контроля.

На защиту выносятся:

1. Метод кластеризации сигналов АЭ по набору информативных параметров, позволяющий определять дефекты сварного шва в процессе сварки.
2. Методика оценки степени опасности дефектов сварных соединений по совокупности временных и энергетических параметров кластеров сигналов АЭ.
3. Способ АЭ-контроля качества сварного шва в процессе сварки, основанный на использовании «плавающего» порога селекции измерительного канала диагностической системы и выполнении кластеризации сигналов с их последующей браковкой при превышении в кластерах критического числа.

4. Способ обнаружения дефектов сварки с использованием кластеризации по скорости нарастания переднего фронта сигнала АЭ между тремя уровнями селекции.
5. Анализ влияния температуры ОК на характеристики ПАЭ и погрешности локализации сигналов АЭ.
6. Методика браковки дефектов сварных соединений в процессе сварки и остывания сварного шва с определением опасных источников сигналов АЭ по энергетическим параметрам кластеров.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Качество и инновации – основа современных технологий» (Новосибирск, 2010), конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010, V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Аэродинамика и прочность летательных аппаратов», посвященной 70-летию со дня основания СибНИА (Новосибирск, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы в соавторстве опубликовано 12 статей в журналах, входящих в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ, получено 2 патента РФ и положительное решение на выдачу патента, опубликована монография, написано 3 отчета по научно-исследовательской работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающей 117 наименований. Работа изложена на 150 страницах и содержит 74 рисунка, одну таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность представленной работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведена общая характеристика работы, ее практическая значимость, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий анализ причин возникновения дефектов при сварке. Рассмотрен анализ традиционных методов НК, используемых при контроле сварных соединений, а также особенности контроля в процессе сварки и остывания сварного шва. Для решения задач по обнаружению дефектов сварного шва все большее распространение получают современные методы НК. Одним из них является метод АЭ, обладающий значительными преимуществами по сравнению с традиционными методами НК, делающими его наиболее предпочтительным при контроле многопроходной сварки ответственных конструкций. Выполнен анализ как отечественных, так и зарубежных работ по применению метода АЭ для контроля сварных соединений. В анализируемых работах рассматриваются различные подходы к выявлению дефектов сварки и, в том числе, предлагается комплексное использование метода АЭ и традиционных методов НК. В известных работах данным методом определяются области локализации акустических сигналов, после чего контроль выполняется традиционными методами НК. При этом контролю подвергается не весь сварной

швов, а лишь его отдельные области, в которых осуществлена локализация сигналов АЭ. Это позволяет снизить экономические затраты, сократить время контроля и объем проводимых исследований.

В других работах в качестве критерия качества браковки сварных швов предложено использовать информативные параметры сигналов АЭ. На основании проведенного анализа показано, что для более точной оценки дефектов сварных швов предлагается использовать не один параметр сигналов АЭ, а два или три в комплексе. В заключительном разделе главы определена основная цель работы и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены разработанные методы кластеризации сигналов АЭ. Применение метода АЭ для контроля сварки связано с необходимостью фильтрации поступающей информации и последующей обработки в режиме реального времени.

После записи информации АЭ-системой в момент остывания сварного шва проводилась кластеризация сигналов по оцифрованной форме. При этом определялся максимум корреляционной функции $R_{i,k}$. Если полученный результат превышает установленное значение, то оба сигнала относятся в один кластер.

Разработанный новый метод кластеризации основан на оптимальном наборе параметров сигналов АЭ. Используемый набор параметров должен быть достаточным для наиболее полного описания формы исследуемого сигнала. Экспериментальным перебором различных комбинаций параметров с последующим их анализом было установлено, что наиболее полное представление о форме можно получить при использовании координат точек локализации, доминантной частоты, числа осцилляций, времен прихода и скорости нарастания переднего фронта сигналов АЭ. При этом кластеризация выполняется в два этапа. На первом этапе осуществляется группировка сигналов АЭ по координатам, а на втором – по выбранному набору параметров.

Для группировки сигналов по координатам первый из зарегистрированных сигналов выбирается в качестве базового. Для этого сигнала рассчитывается погрешность локализации по координатам x и y . Общая погрешность локализации сигнала АЭ представляется как сумма вкладов двух составляющих погрешностей измерения разности времен прихода (РВП) ΔT_i сигналов АЭ на датчики пьезоантенны и скорости звука ΔC .

Вклад величин ΔT_1 , ΔT_2 в погрешность локализации дефекта (Δ_x , Δ_y) записывается в следующем виде:

$$\Delta_x(\Delta_{T_1}, \Delta_{T_2}) = -A_1 \Delta_{T_1} (T_C + T_1) - T_1 A_1 \left(\frac{\partial T_C}{\partial T_1} \Delta_{T_1} + \frac{\partial T_C}{\partial T_{21}} \Delta_{T_2} \right) \quad (1)$$

$$\Delta_y(\Delta_{T_1}, \Delta_{T_2}) = -(T_1 + T_C) B_1 B_2 \Delta_{T_1} - (T_2 + T_C) B_1 \Delta_{T_2} - (T_1 B_1 B_2 + T_2 B_1) \left(\frac{\partial T_C}{\partial T_1} \Delta_{T_1} + \frac{\partial T_C}{\partial T_{21}} \Delta_{T_2} \right)$$

где x , y – неизвестные координаты источника сигналов АЭ; C – скорость звука; T_C – неизвестное время распространения сигнала до момента регистрации первым ПАЭ; T_1 , T_2 – времена прихода сигнала на два датчика пьезоантенны.

Аналитические выражения для частных производных $\frac{\partial T_c}{\partial T_1}$, $\frac{\partial T_c}{\partial T_2}$ находятся дифференцированием решения системы триангуляционных уравнений для определения координат дефекта. Коэффициенты A_i , B_i вычисляются как:

$$A_1 = \frac{c^2}{x_1}; \quad B_1 = \frac{c^2}{y_2}; \quad B_2 = -\frac{x_2}{x_1},$$

где x_1 , x_2 , y_2 – координаты ПАЭ в системе координат, приведенных к первому принявшему датчику.

Из рассчитанных по формулам (1) составляющих погрешностей Δx , Δy определяются их максимальные значения при решении задачи локализации. В дальнейшем выбранное значение погрешности служило границей для отбраковки сигналов АЭ. Затем находится функция расстояния d_E между двумя сигналами. В качестве одного из сигналов использовался базовый, а в качестве второго – поочередно все l сигналов. Функция расстояния d_E определяется как:

$$d_E(i) = \sqrt{(x_{\text{баз}} - x_i)^2 + (y_{\text{баз}} - y_i)^2}, \quad (2)$$

где $x_{\text{баз}}$, $y_{\text{баз}}$ – координаты локализации базового сигнала АЭ; x_i , y_i – координаты сигналов АЭ.

Затем полученные значения функции расстояния d_E сравниваются с максимальной погрешностью Δ_{MAX} определения координат базового сигнала

$$d_E \leq \Delta_{\text{MAX}}. \quad (3)$$

Если неравенство (3) выполняется, то считается, что исследуемый сигнал принадлежит к тому же источнику, что и базовый. Если же значение функции расстояния d_E , найденное по формуле (2), больше, чем максимальная погрешность Δ_{MAX} , то считается, что два сигнала принадлежат к разным источникам.

Второй этап кластеризации осуществляется при помощи метода «ближайших соседей». Выбранные параметры каждого из m сигналов сравниваются со значениями параметров базового сигнала. Если значения всех параметров сравниваемого сигнала находятся в пределах ширины заданного интервала от значений базового сигнала, то считается, что они принадлежат к одному кластеру.

Для подтверждения достоверности результатов кластеризации по набору параметров были проведены экспериментальные исследования с использованием имитатора сигналов АЭ и металлического листа. Кластеризация зарегистрированных сигналов АЭ выполнялась двумя методами: по форме и по набору параметров. Полученные данные представлены на рис.2, а,б.

Проведенный анализ показал, что при кластеризации по набору параметров зарегистрировано на три кластера больше. Следовательно, кластеризация по параметрам несколько снижает точность локализации, однако при этом значительно увеличивается быстродействие. Это позволяет выполнять кластеризацию за минимальное время, что необходимо при регистрации дефектов в момент сварки и остывания сварного шва.

Также во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с идентификацией опасных дефектов сварки по анализу

поведения во времени параметров кластеров. Анализ информации, полученной экспериментально, позволил в качестве таких параметров использовать локализацию, распределение суммарного счета и зависимость энергии сигналов АЭ в кластере от времени.

Отработка методики АЭ-контроля выполнялась при сварке листов размером 500 x 500 x 8 мм из стали Ст3 двухсторонними швами. При этом осуществлялась имитация дефектов за счет введения в сварной шов титановых (рис.1,в) и дюралюминиевых вставок.

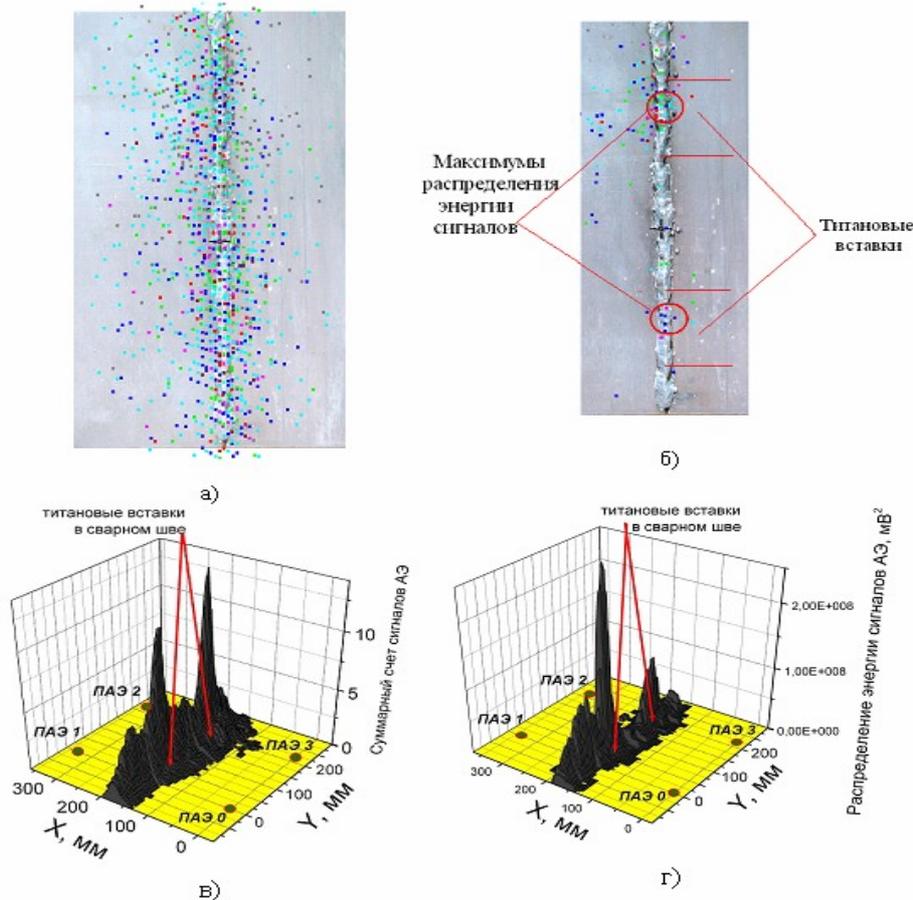


Рис.1,а– локализация сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе сварки; б – совокупность кластеров, локализованных в области введения титановых вставок; в – распределение суммарного счета локализованных сигналов АЭ вдоль сварного шва; г – распределение энергии локализованных сигналов вдоль сварного шва в области введения титановых вставок

При кластеризации использовался метод по набору параметров сигналов АЭ, который позволил получить значительное число кластеров в местах установки титановой и дюралюминиевой вставок. Для наиболее объемных кластеров были построены графики распределения суммарного счета сигналов АЭ от времени. Как следует из рис.3, активность сигналов АЭ для большинства кластеров по окончании промежутка времени $\Delta t = 400$ с заметно снижается. Самым активным источником на протяжении всего времени эксперимента оставался первый кластер. По полученным данным были построены совмещенные графики распределения энергии и суммарного счета сигналов АЭ от времени для первого кластера (рис. 4). В исследуемых кластерах увеличение суммарного

счета сигналов АЭ на начальном этапе эксперимента сопровождается повышением уровня энергии регистрируемых сигналов. Все это подтверждает высокую активность рассматриваемого источника.

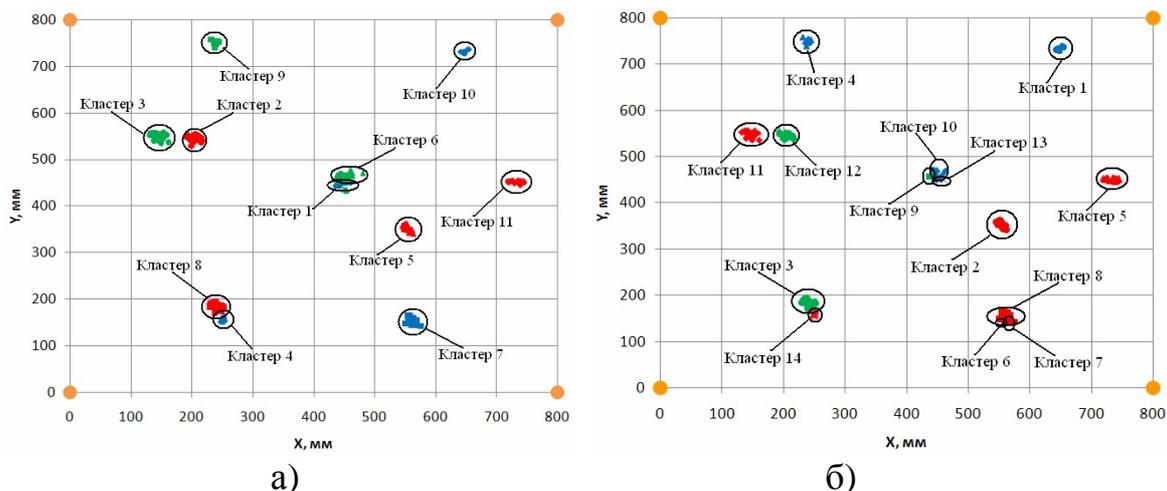


Рис. 2. Локализация сигналов АЭ: а – при кластеризации по форме; б – при кластеризации по набору параметров

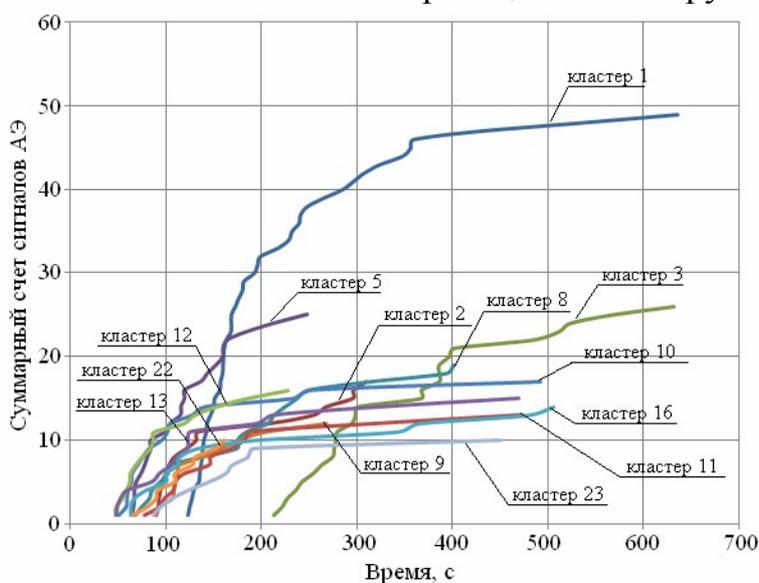


Рис. 3. Распределение по кластерам суммарного счета сигналов АЭ от времени в образце с титановыми вставками

После выполнения кластеризации и определения параметров кластеров образцы были направлены на металлографические исследования. Проведенный металлографический анализ (рис.5,а,б) позволил определить наличие внутренних дефектов в сварных швах (шлаковые включения, непровары по сечению металла и по кромке шва).

После выполнения кластеризации и определения параметров кластеров образцы были направлены на металлографические исследования. Проведенный металлографический анализ (рис.5,а,б) позволил определить наличие внутренних дефектов в сварных швах (шлаковые включения, непровары по сечению металла и по кромке шва).

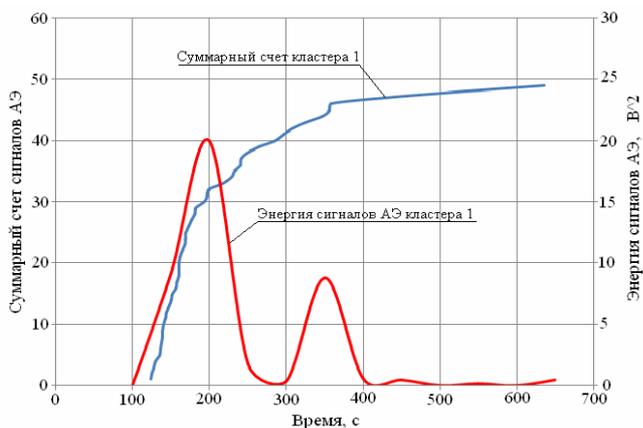


Рис. 4. Распределение энергии и суммарного счета сигналов АЭ от времени для первого кластера по набору параметров в образце с титановыми вставками

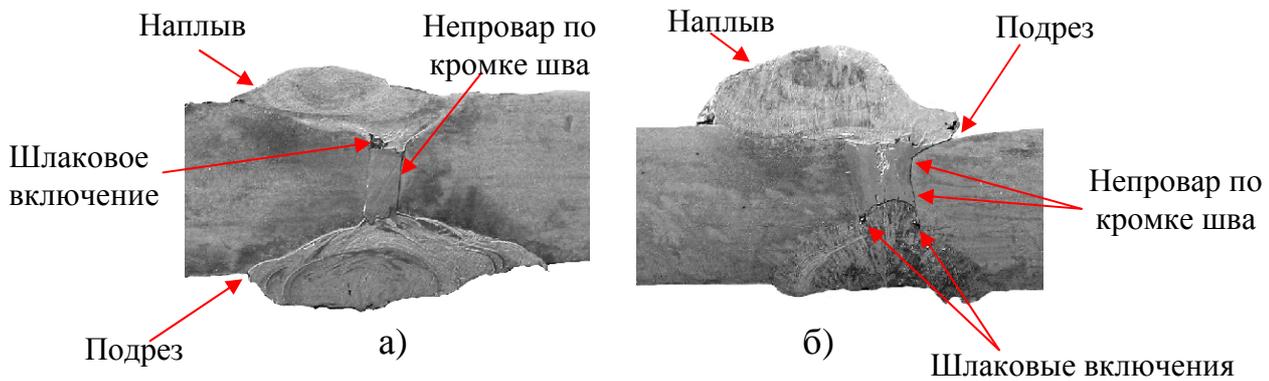


Рис. 5. Результаты металлографического анализа образцов:
а – с дюралюминиевой вставкой; б – с титановой вставкой

В третьей главе изложена методика контроля качества сварного шва в процессе его остывания. Для обработки АЭ-информации использовался метод кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ. При этом определялась принадлежность сигналов из одного кластера к одному источнику. Обработка информации осуществлялась статистическими методами. Для каждого ОК выбирались кластеры с высокой плотностью расположения сигналов АЭ и проверялась гипотеза о нормальном законе распределения координат точек локализации. Если рассчитанная статистика оказывалась больше критической, то принималась гипотеза о нормальном законе распределения координат. Кластеры, не прошедшие проверку, исследовались на наличие ошибок по неправильному определению времени прихода сигнала АЭ. После установления у выбранных кластеров нормального закона распределения они проверялись на наличие выбросов по правилу 3σ . Если величина ошибки не выходила за границы 3σ от геометрического центра источника сигналов АЭ, то сигнал принадлежал данному кластеру. Процедура кластеризации (рис.1,а,б) позволяет весьма эффективно осуществлять локализацию дефектов, возникающих в сварном шве в процессе остывания.

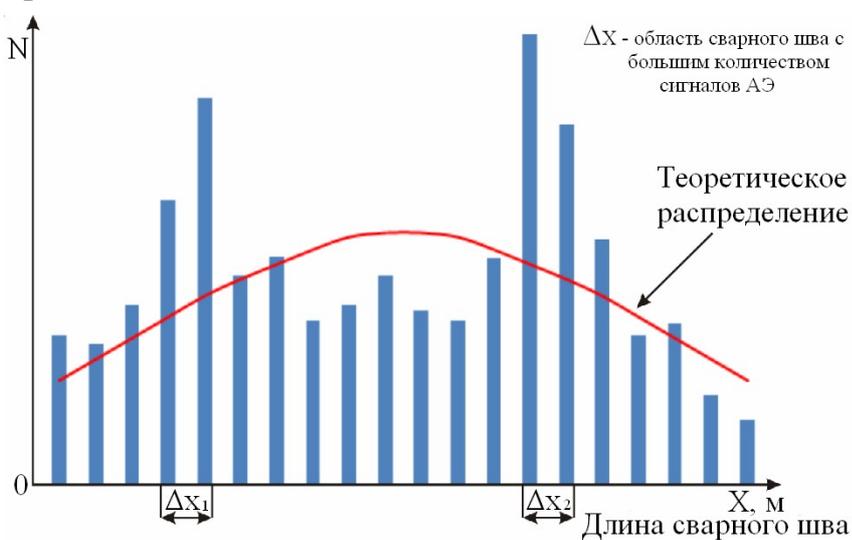


Рис. 6. Распределение сигналов АЭ вдоль сварного шва

В третьей главе также приводится разработанная методика локализации и контроля качества сварного шва в процессе сварки и остывания. Для этого использовалась диагностическая АЭ-система СЦАД-16.10 с «плавающим» порогом селекции. В момент регистрации большого количества сигналов АЭ и шумов высокого уровня осуществлялось автоматическое изменение

порогового уровня, при котором происходило увеличение порога селекции. Уровень селекции автоматически уменьшался при поступлении сигналов низкого уровня.

В разработанном методе локализации дефектов сварного шва в процессе сварки рассматривается не весь шов, а только области с повышенной концентрацией источников сигналов АЭ. Для этого в режиме реального времени строилось экспериментальное распределение суммарного счета N зарегистрированных сигналов АЭ вдоль сварного шва (рис.6), после чего оно сравнивалось с теоретическим. Форма теоретического распределения определялась исходя из предположения о том, что в сварном шве нет дефектов и сигналы АЭ распределяются равномерно по всей его длине.

Все возможные источники сигналов АЭ описываются соотношением вида:

$$g(a) = \begin{cases} 1/L, & a \in (x_{нач}, x_{кон}) \\ 0, & a \notin (x_{нач}, x_{кон}) \end{cases},$$

где $x_{нач}$, $x_{кон}$ – координаты начала и конца сварного шва; L – длина сварного шва; $g(a)$ – функция плотности равномерного закона распределения; a – координата источника сигнала АЭ.

Для произвольно зарегистрированного сигнала АЭ точка его локализации с учетом погрешности будет отображаться в окрестности источника как:

$$x \in (a - \Delta x, a + \Delta x),$$

где x , Δx – соответственно координата и погрешность локализации вдоль сварного шва.

Совместная плотность распределения $f_{совм}(x, a)$ координат источника сигнала АЭ и его точки локализации запишется в виде:

$$f_{совм}(x, a) = f_{усл}(x|a)g(a),$$

где $f_{усл}(x|a)$ – условная плотность распределения координаты точки локализации при заданном местоположении источника сигналов АЭ с учетом погрешности.

Чтобы получить теоретическую функцию плотности распределения точек локализации $f(x)$ сигналов АЭ вдоль сварного шва, не содержащего дефектов, осуществлялось интегрирование совместной плотности распределения $f_{совм}(x, a)$ по параметру a :

$$f(x) = \int_R f_{усл}(x|a)g(a)da = \frac{1}{L} \int_{x_{нач}}^{x_{кон}} f_{усл}(x|a)da.$$

Параметр Δx , определяющий предельно-допустимое значение отклонения точки локализации от положения источника сигналов АЭ, зависит от множества параметров (погрешностей определения времен прихода сигналов на ПАЭ, скорости распространения сигнала АЭ, погрешности измерения этой скорости и т.д.). Для пьезоантенны произвольной формы вид зависимости $\Delta x(a)$, $a \in (x_{нач}, x_{кон})$ находится численно с использованием формул расчета погрешности лока-

лизации сигналов АЭ. Затем производится ее аппроксимация кусочно-постоянной функцией вида:

$$\Delta x(a) = \Delta_j; a \in (b_j, b_{j+1}),$$

где b_j, b_{j+1} – точка разрыва аппроксимирующей функции; $b_0 = x_{нач}$; $b_N = x_{кон}$; N^B – количество аппроксимирующих коэффициентов; Δ_j – значение аппроксимирующей функции на отрезке $a \in (b_j; b_{j+1})$.

Разбиение точками b_j было выбрано таким образом, чтобы для любого j выполнялись условия:

$$b_j - \Delta_j > b_{j-1}; b_j + \Delta_j < b_{j+1}$$

В результате плотность распределения точек локализации сигналов АЭ вдоль сварного шва примет вид:

$$f(x) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{N^B-1} f_j(x),$$

$$f_j(x) = \begin{cases} \frac{b_{j+1} - b_j}{2\Delta_j^2} (2x + 2\Delta_j - b_{j+1} - b_j), & x \in (b_j - \Delta_j, b_j) \\ \frac{b_{j+1} - b_j}{2\Delta_j^2} (-2x + 2\Delta_j + b_{j+1} + b_j), & x \in (b_{j+1}, b_{j+1} + \Delta_j) \\ \frac{1}{2\Delta_j^2} [(x - b_j)(x - b_j + 2\Delta_j) + (b_{j+1} - x)(b_{j+1} - x + 2\Delta_j)], & x \in (b_j, b_{j+1}) \end{cases}$$

После построения теоретического и экспериментального распределений выполнялся их сравнительный анализ. Считалось, что в тех зонах, где экспериментальное распределение более всего отличается от теоретического, присутствуют дефекты. Поэтому для дальнейшего анализа выбирались именно эти участки сварного шва, что позволило сократить объем обрабатываемой АЭ-информации.

Для определения дефектов в выбранных участках сварного шва применялся разработанный метод кластеризации по скорости нарастания переднего фронта сигнала АЭ. При этом огибающая переднего фронта сигнала разбивалась на два участка тремя пороговыми уровнями, значения которых определялись экспериментально. Данный метод кластеризации основан на сравнении скорости нарастания переднего фронта на каждом из участков анализируемых сигналов.

Для обработки экспериментальных данных разработан метод выделения опасных источников по уровню их энергетической активности с использованием метода кластеризации по цифровой форме и набору параметров сигналов АЭ. Для оценки опасности источника сигналов предложено использовать медиану распределения энергии сигналов, образующих кластер. Приведены результаты экспериментальных исследований по использованию метода АЭ для контроля дефектов сварных соединений и отработке методики браковки, как при остывании сварных швов, так и в процессе сварки. Основу разработанной методики контроля сварных швов составляют методы кластерного анализа, осуществляющие выделение сигналов АЭ, зарегистрированных от дефектов, из

общего объема регистрируемой информации. На рис.7 показано положение кластеров на образце с титановой и дюралюминиевой вставками.

Сигналы от развивающегося дефекта характеризуются высоким уровнем энергии. В связи с этим при принятии решения о дефектности сварного шва сигналы низкого уровня исключаются из рассмотрения. В дальнейшем одним из основных параметров, учитываемых при анализе результатов кластеризации, считается энергия сигналов кластера.

Оценка энергии зависит от параметров ПАЭ, качества их установки на свариваемый объект и коэффициента усиления канала. Поэтому степень опасности источника сигналов АЭ из выделенного кластера определяется сравнением энергии сигналов АЭ из этого кластера с энергией сигналов, не входящих в кластер, но полученных с тех же датчиков. Для увеличения надежности контроля используется информация со всех датчиков пьезоантенны выбранной зоны локализации. Оценка энергии кластера определялась через среднюю энергию входящих в него сигналов.

$$M_E^J = \frac{1}{N_J} \sum_{i=1}^{N_J} E_{i,J}, \quad (4)$$

где M_E^J – средняя энергия сигналов в кластере J ; N_J - количество сигналов в кластере J ; $E_{i,J}$ – энергия сигнала i , входящего в кластер J .

Медиана распределения находится как точка на числовой оси, в которой функция распределения переходит от значений, меньших $\frac{1}{2}$, к значениям, большим $\frac{1}{2}$. Для непрерывной случайной величины эта точка определена как:

$$(V_{1/2})_J : F_J(V_{1/2}) = 1/2.$$

Для построенной по данным эксперимента ступенчатой функции распределения за величину медианы принимается значение середины интервала, на котором функция $F_J(x)$ сохраняет значение 1/2:

$$(V_{1/2})_J = \frac{X_{1/2}^{\min} + X_{1/2}^{\max}}{2}; \quad (5)$$

$$X_{1/2}^{\min} = \min_X (F_J(X) = 1/2), \quad X_{1/2}^{\max} = \min_X (F_J(X) > 1/2)$$

где $(V_{1/2})_J$ – медиана распределения энергии сигналов в кластере J ; $F_J(X)$ – функция распределения энергии сигналов в кластере J , оцениваемая по значениям энергии $E_{i,J}$; X_{min} , X_{max} – границы интервалов, на которых функция $F_J(X)$ сохраняет значения $\frac{1}{2}$.

Основная идея использования медианы, определяемой по формулам (4), (5), состоит в том, что эта оценка во многом подобна выборочному среднему. Однако она значительно более устойчива к наличию «выбросов» среди рассматриваемых результатов измерения.

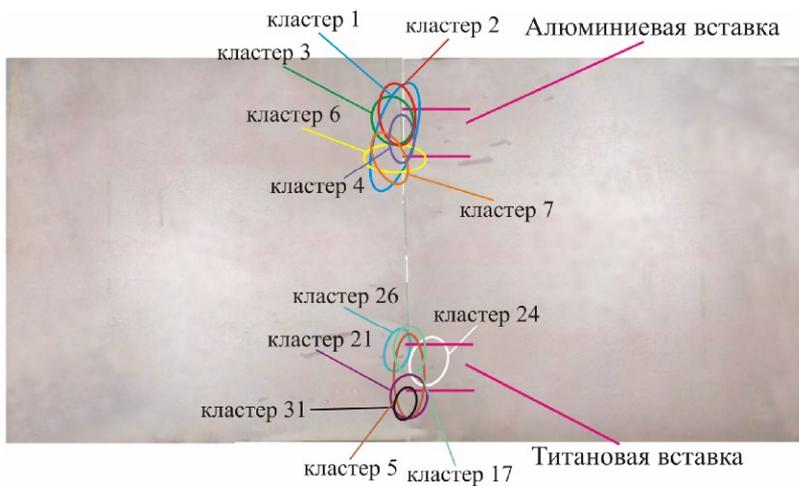


Рис. 7. Положение кластеров на образце с титановой и дюралюминиевой вставками

Во втором разделе третьей главы приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры нагрева сварного шва и околошовной зоны на

характеристики ПАЭ. Температурные изменения амплитуды сигналов с датчика и ее разброс влияют на погрешность локализации источника сигналов АЭ, поскольку рассчитывались с использованием двухинтервального коэффициента $K(t)$, определяемого по формуле:

$$K(t) = \frac{A(t) - A(t - T_{OK})}{A(t - T_{OK})}, \quad (6)$$

где $A(t) = \sum_{i=t/t}^{(t+T_{OK})/t} |u_i|$ – параметр структуры сигнала АЭ; u_i – значения отсчетов оцифрованной формы сигнала АЭ; T_{OK} – размер «окна» двухинтервального коэффициента; τ – интервал дискретизации аналого-цифрового преобразователя измерительного канала системы.

Для высокотемпературных ПАЭ типа ВТ1, работающих до температуры $+200^{\circ}\text{C}$, на первом этапе нагрева из-за уменьшения амплитуды сигналов АЭ точность локализации понижается. Однако дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению амплитуды сигналов, в результате чего точность локализации возрастает. При этом увеличивается двухинтервальный коэффициент из (6) и уменьшается погрешность в определении времени прихода сигналов АЭ

$$\Delta_1, \Delta_2 \sim \frac{1}{K(t_s)},$$

где Δ_1, Δ_2 – погрешности определения времен прихода сигналов АЭ, от которых зависят погрешности локализации.

В четвертой главе представлены результаты практического применения метода АЭ при прочностных испытаниях сварных соединений.

Известно, что процесс сварки сопровождается появлением дефектов, являющихся источниками сигналов АЭ. Экспериментально подтверждено, что использование методов кластерного анализа позволяет в режиме реального времени обрабатывать регистрируемую АЭ-информацию и выполнять локализацию дефекта в зоне сварного шва.

Для проверки качества сварного соединения исследовались образцы из стали Ст3, которые устанавливались в электрогидравлическую испытательную машину MTS-250. В процессе испытаний к образцу ступенчато прикладывалась нагрузка с интервалом в 100 кН. Каждое повышение нагрузки приводило к увеличению суммарного счета сигналов АЭ. При этом образец выдерживался под нагрузкой до момента снижения активности сигналов АЭ, после чего нагрузка снова увеличивалась. График суммарного счета сигналов АЭ, зарегистрированных при испытании, представлен на рис.8.

Анализируя полученные данные (рис.8) можно отметить, что при малых нагрузках скорость счета сигналов АЭ низкая, однако при дальнейшем повышении нагрузки она резко увеличивается. При нагрузке в 1220 кН произошло разрушение образца вдоль сварного шва. Разрушению предшествовал резкий скачок суммарного счета сигналов АЭ. При осмотре места разрушения было установлено, что в корне сварного шва присутствует непровар. Для имитации непровара данный участок был сварен без защитного газа, что способствовало возникновению пор в корне сварного шва.

Обработка результатов измерения позволила установить, что сигналы АЭ локализовались в трех зонах. Первые две зоны соответствовали участкам приложения нагрузки, которая выполнялась гидравлическими захватами испытательной машины MTS-250. Третья зона локализации сигналов АЭ находилась в области сварного шва. Причем основное количество сигналов было зарегистрировано в зоне, где впоследствии произошло разрушение образца. Следовательно, наличие дефекта, обнаруженного при АЭ-контроле процесса сварки образца, было подтверждено при его дальнейших прочностных испытаниях.

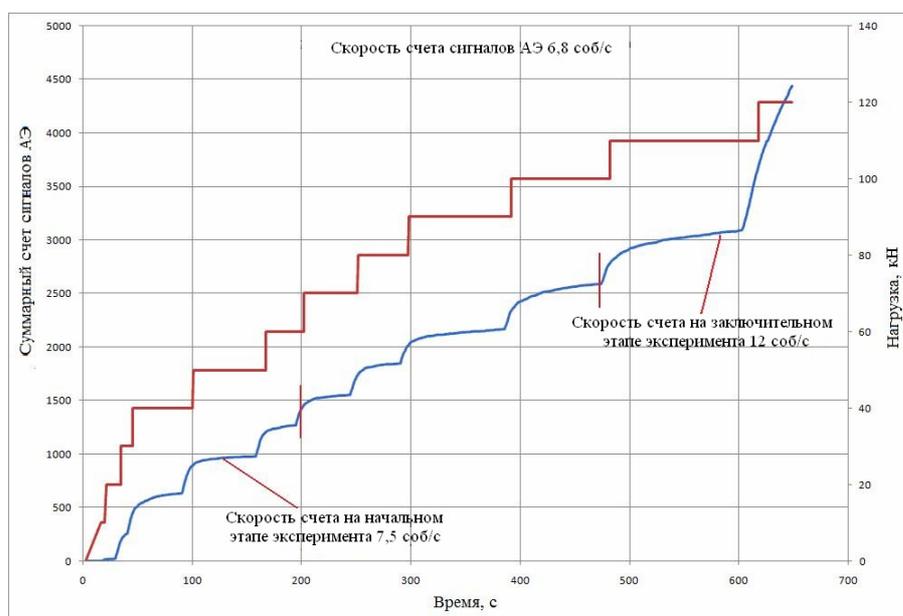


Рис. 8. График суммарного счета сигналов АЭ, зарегистрированных при прочностных испытаниях образца

В четвертой главе также приведены результаты применения разработанной методики АЭ-контроля качества при лазерной сварке титановых образцов. При неправильно подобранном режиме импульсной лазерной сварки возникают

различные дефекты, снижающие прочность всей конструкции. Поэтому разработка методики контроля дефектов при лазерной сварке актуальна.

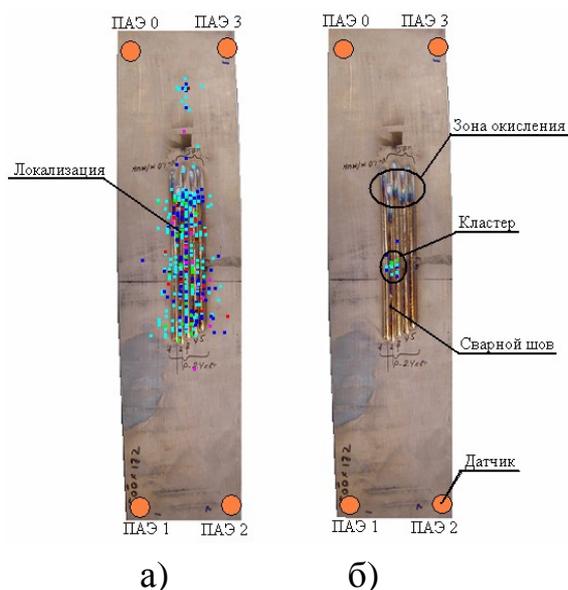


Рис. 9. Локализация сигналов АЭ при лазерной сварке с введенными искусственными дефектами (а) и расположение кластеров (б)

Отработка методики контроля качества сварных соединений проводилась при лазерной сварке титановых образцов из материала ВТ-5 размером 500x120x 5 мм. Было установлено, что при отсутствии дефектов сигналы АЭ локализовались только на краях сварного шва в местах,

где происходило окисление материала вследствие отсутствия газовой защиты шва. В процессе отработки методики дополнительно (по ходу перемещения лазера) были внесены искусственные дефекты в виде оловянно-свинцовой проволоки. Для сигналов АЭ, зарегистрированных при лазерной сварке, выполнялась кластеризация по набору параметров, которая позволила выделить кластеры в местах окисления сварного шва и в месте установки оловянно-свинцовой проволоки (рис.9,а,б).

Промышленное использование метода АЭ для контроля сварки рельсов выполнялось на рельсосварочном поезде, где осуществляется сварка рельсов и укладка их в бесстыковой путь. При контроле сварки рельсов использовалась линейная локализация (рис.10).



Рис.10. Линейная локализация сигналов АЭ при сварке рельсов

В качестве образцов применялись рубки рельсов длиной 615 мм. Часть образцов была сварена с соблюдением технологии сварки, а часть – с искусственными дефектами в форме отверстий, заполненных асбестом в головке и подшве рельсов (рис.11,а), а также – с пережогом.

Линейная локализация не позволяет использовать для обработки полученной информации разработанные методы кластеризации, поэтому для оценки

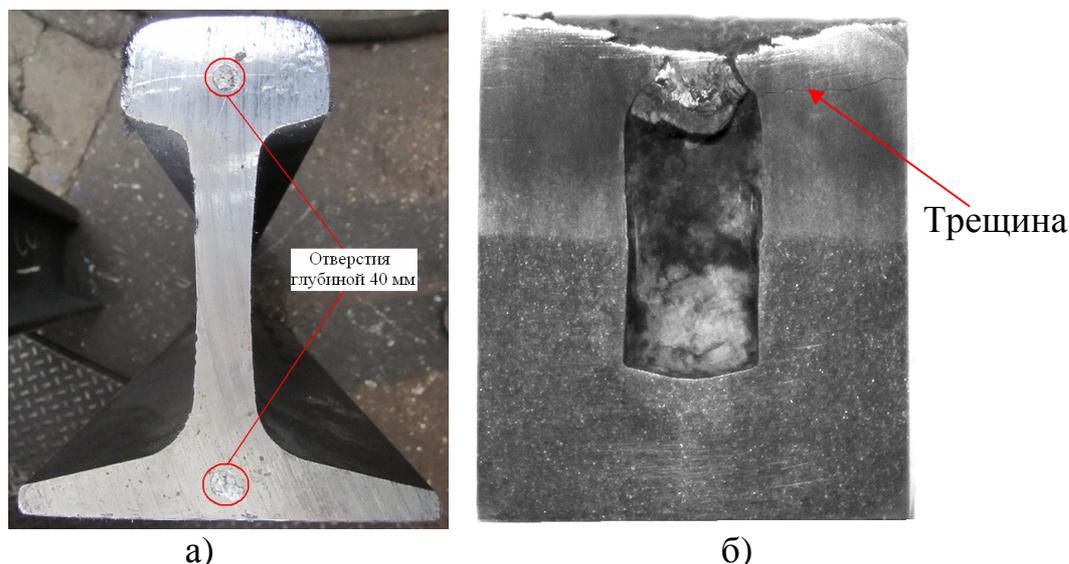


Рис.11, а – Имитация дефекта в головке и подошве рельса; б – результаты металлографического анализа

качества сварного шва применялись энергетические параметры регистрируемых сигналов. Анализ показал, что сигналы АЭ, зарегистрированные в образцах, сваренных с соблюдением технологии и с искусственными дефектами, обладают различной энергией. Поэтому в качестве основного параметра браковки была выбрана медиана распределения энергии сигналов АЭ. На рис.12 представлено распределение медианы энергии сигналов АЭ в образцах. Из рис.12 следует, что в образцах с искусственными дефектами сигналы АЭ регистрировались с большей энергетической составляющей. Анализ энергетических параметров сигналов АЭ, зарегистрированных при сварке рельсов, позволил сделать вывод о наличии дефекта в корне сварного шва.

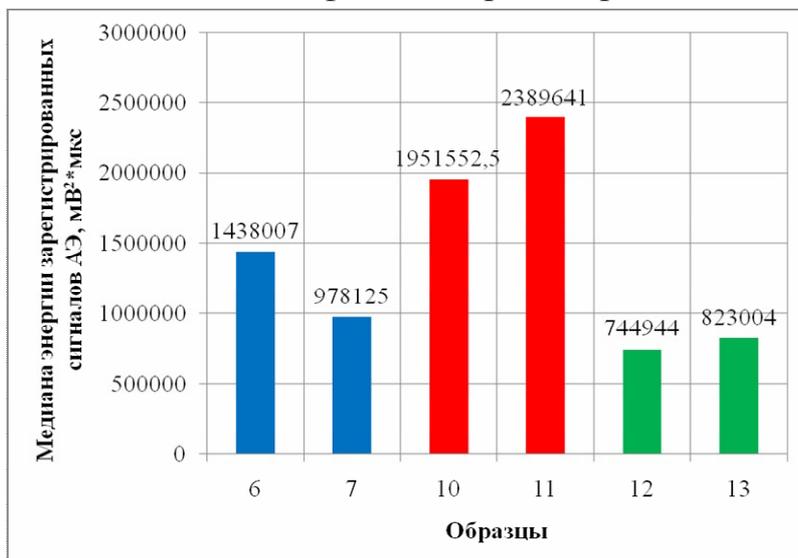


Рис. 12. Распределение медианы энергии сигналов АЭ в образцах, сваренных на РСР

Прочностные испытания позволили определить, что характеристики образцов с искусственными дефектами значительно ниже установленных в нормативно-технической документации. По результатам АЭ-контроля и прочностных испытаний

образцы с дефектами были направлены на металлографические исследования, показавшие наличие трещин в головке рельса (рис.11,б).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. АЭ-контроль дефектов сварного шва проводился с использованием различных методов кластеризации. При оценке кластера учитывались энергия, ак-

- тивность, распределение и разброс точек локализации сигналов АЭ в кластере.
2. Разработанные методы кластеризации по скорости нарастания переднего фронта и по набору параметров сигналов АЭ позволяют при незначительном снижении достоверности кластеризации существенно сократить время обработки, что важно при работе с большими объемами информации при сварке.
 3. Процесс локализации сигналов АЭ от дефектов сварки осложняется наличием паразитных сигналов, вызванных шумами и помехами. Для отработки методики локализации дефектов сварки использовалась их имитация за счет введения в сварной шов титановых и дюралюминиевых вставок. При локализации сигналов АЭ в зоне развития трещин использовалось распределение суммарного счета и энергии вдоль сварного шва.
 4. Проведенный металлографический анализ из области локализации подтвердил наличие титанового сплава в области сварного шва, вырезанного из зоны с максимальным числом локализованных сигналов АЭ. Металлографический анализ проводился с применением микроскопа МИМ-10 на поперечных шлифах.
 5. Выполненные исследования стандартных ПАЭ типа ПК 02-05, работающих в температурном диапазоне от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$, показали незначительное изменение их чувствительности в температурном диапазоне от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+55^{\circ}\text{C}$ и отсутствие гистерезиса, а погрешности локализации не превышали (4...5) %. Погрешности локализации при работе с высокотемпературными ПАЭ типа ВТ1 в диапазоне от $+40^{\circ}\text{C}$ до $+200^{\circ}\text{C}$ составили (10...20) %. В характеристиках высокотемпературных датчиков, работающих при температуре $+200^{\circ}\text{C}$, наблюдался гистерезис, который необходимо учитывать при работе с реальными объектами.
 6. Разработана методика выявления опасных источников сигналов АЭ по уровню их энергетической активности с применением кластеризации по цифровой форме сигнала. Для оценки опасности источника сигналов АЭ предложено использовать медиану распределения энергии сигналов, образующих кластер, поскольку она является наиболее устойчивой к «выбросам» результатов измерения. Проведены металлографические исследования участков сварного шва с высокоэнергетическими кластерами. В местах локализации сигналов АЭ были обнаружены непровар и трещина в корне сварного шва.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 22 научных работы, полный список которых приведен в тексте диссертации, в том числе монография, 2 действующих патента, положительное решение на выдачу патента и 12 публикаций в журналах, включенных ВАК РФ в Перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций.

Публикации в центральных изданиях, включенных ВАК РФ в Перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций:

1. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Митрофанов О.В., Куликов Е.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Канифадин К.В. Акустико-эмиссионный контроль криволинейных панелей фюзеляжа самолета RRJ при ресурсных испытаниях // Дефектоскопия. 2008. №12. С. 42 – 47.
2. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Чаплыгин В.Н., Катарушкин С.А., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Исследование разрушения образцов из стеклопластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2009. №2. С. 39 – 46.
3. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Оценка погрешностей определения времени прихода сигналов акустической эмиссии пороговым методом // Дефектоскопия. 2009. №4. С. 69 – 78.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Чаплыгин В.Н., Лазненко С.А., Канифадин К.В. Исследование возможностей локализации дефектов сварного шва в процессе остывания с использованием акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2009. №5. С. 25 – 33.
5. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю. Канифадин К.В. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта // Дефектоскопия. 2009. №10. С. 27 – 35.
6. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Канифадин К.В. Акустико-эмиссионный контроль качества сварного шва в процессе остывания // Контроль. Диагностика. 2009. №3. С.61 – 67.
7. Степанова Л.Н., Канифадин К.В., Лазненко С.А. Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа // Дефектоскопия. 2010. №1. С.73 – 82.
8. Степанова Л.Н., Канифадин К.В., Рамазанов И.С. и др. Разработка метода кластеризации по параметрам сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. №2. С.78 – 89.
9. Степанова Л.Н., Канифадин К.В., Рамазанов И.С. Влияние температуры на характеристики пьезопреобразователей и погрешности локализации сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. №5. С. 79 – 88.
10. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Определение опасных источников сигналов акустической эмиссии по оценке энергии кластеров // Дефектоскопия. 2010. №9. С.64 – 73.
11. Фомин В.М., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Афонин Ю.В., Оришич А.М., Канифадин К.В., Кабанов С.И. Методика акустико-эмиссионного контроля дефектов лазерной сварки // Контроль. Диагностика. 2011. № 6. С. 69 – 72.
12. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки // Дефектоскопия. 2011. №6. С. 44 – 49.
13. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций /Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., Кабанов С.И., Бехер С.А., Власов К.В., Бобров А.Л., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Рамазанов И.С., Тенитлов Е.С.- / Под ред. Л.Н.Степановой, А.Н.Серьезнова – Новосибирск: Наука, 2011 – 272 с.

14. Патент РФ №2379677, МПК G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе сварки и устройство для его осуществления / Л.Н. Степанова, А.Н. Серьезнов, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, С.А. Бехер, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин – Оpubл. 20.01.2010, Бюл. №2.
15. Патент РФ №2424510, МПК G 01 N 29/14. Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам и устройство для его осуществления / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, Е.Ю. Лебедев, А.Н. Серьезнов – Оpubл. 20.07.2011, Бюл. №20.
16. Положительное решение по заявке № 2009146635 от 05.12.2009 г. «Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе сварки и устройство для его осуществления» / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, К.В. Канифадин.

Основные публикации в других изданиях:

1. Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Канифадин К.В., Тенитилов Е.С. Перспективы развития метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов контроля // «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», конф. с участием иностранных ученых. 28 ию-ня-2 июля 2010 г. т.Ш. Машиноведение – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010. С.72 – 77.
2. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Канифадин К.В. Акустико-эмиссионный контроль дефектов при сварке // «Качество и инновации – основа современных технологий», Всерос. науч.-прак. конф. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. С.102 – 107.
3. Канифадин К.В. Разработка методики кластеризации сигналов акустической эмиссии при контроле сварки // «Наука и молодежь XXI века», Научно-техническая конференция студентов и аспирантов. 17 – 18 ноября 2009 г. Ч.1. Технические науки. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. С. 64 – 66.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Канифадин К.В. Разработка методики кластеризации при акустико-эмиссионной диагностике сварных соединений в процессе сварки и остывания сварного шва // «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», V Российская научно-техническая конференция 25 – 29 апреля 2011 г. – Екатеринбург: Изд-во ИМАШ УрО РАН, 2011. С. 35.
5. Степанова Л.Н., Канифадин К.В. Акустико-эмиссионный контроль дефектов при сварке // «Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта», Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск, 2011. С. 44 – 49.
6. Степанова Л.Н., Канифадин К.В. Использование метода акустической эмиссии для повышения надежности и контроля сварных соединений в процессе сварки и остывания // Всероссийская научно-техническая конференция «Аэродинамика и прочность летательных аппаратов», посвященная 70-летию со дня основания СибНИА 20 – 21 сентября 2011 г. – Новосибирск. С. 11.

Подписано в печать 07.11.2011 г.
1,5 печ.л. Тираж 120 экз. Заказ № 2499

Издательство ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей
сообщения»
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191