УДК 620.179+621.791.763

Е.В. Шаповалов, к.т.н.
В.В. Долиненко, к.т.н.
Р.М. Галаган, к.т.н.
Ф.С. Клищар

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев
e-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua

В статье представлен опыт разработки аппаратуры, используемой для сбора и анализа сигналов акустической эмиссии, которые возникают в процессе контактной точечной сварки. Определены требования к электронным узлам разрабатываемой акустико-эмиссионной системы, к выбору преобразователя, а также алгоритму работы программного обеспечения.

***Ключевые слова**: контактная точечная сварка, акустическая эмиссия, контроль, управление*

Введение и постановка задачи

Разработка методов и алгоритмов контроля процесса контактной точечной сварки (КТС) является актуальной задачей, поскольку позволяет значительно повысить качество соединения за счёт адаптивного управления режимами сваривания. Методы контроля процесса КТС можно условно разделить на две группы: 1) методы, которые основаны на регистрации электрических, временных и механических параметров оборудования КТС; 2) методы, основанные на регистрации различных физических и электромагнитных параметров самого точечного соединения. Первая группа методов достаточно хорошо разработана и широко применяется в машинах КТС. В данном случае используются различные регуляторы, позволяющие регистрировать сварочный ток, время протекания сварочного тока, падение напряжения между электродами, мощность и энергию, выделяющиеся в точке сварки, сопротивление точки сварки, усилие сжатия электродов, ускорение и амплитуду движения электродов и т.п. [1-4]. Недостатком первой группы методов является то, что регистрация электрических и физических параметров режима сварки позволяет вести только косвенную оценку качества сварного соединения. Ко второй группе можно отнести методы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики, такие как: ультразвуковые, тепловые и электромагнитные [5-7]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Перспективным является развитие метода акустической эмиссии (АЭ), с помощью которого получают важную диагностическую информацию о процессе расплавления и кристаллизации литого ядра во время КТС [8]. Полученная информация позволяет в режиме реального времени управлять процессом сваривания для повышения качества соединения. Хотя приборы и методика акусто-эмиссионного контроля хорошо известны и широко применяются при НК в целом, однако обоснование применения АЭ для контроля процесса КТС, а также требования к аппаратуре освещены не в полном объёме. Целью работы является разработка системы для анализа сигналов АЭ, которые возникают в процессе КТС.

Определение требований к электронным узлам АЭ системы

При сварке в материале соединяемых деталей возникают упругие колебания (акустическая эмиссия), причиной которых являются резкие изменения его структуры, фазовые превращения и развитие дефектов. Сигналы АЭ возникают на протяжении всего сварочного цикла, а также в процессе остывания сварного соединения. Анализируя параметры АЭ можно оценить размеры литой зоны свариваемых деталей и следить за возникновением внутренних дефектов, а также диагностировать слипание (по отсутствию регистрации сигналов АЭ) [9].

Для измерений, проводимых с помощью АЭ, не требуются жесткие условия к местоположению установки датчиков. Связь сигналов акустической эмиссии с образованием и развитием зоны плавления мало исследована, в основном из-за отсутствия специального оборудования и способа отстройки от сигналов механических шумов.

Разрабатываемая аппаратура должна удовлетворять требованиям, которые предъявляются к АЭ системам. Под АЭ системой обычно подразумевают совокупность аппаратных средств, вычислительных устройств и специализированного математического обеспечения [10].

К основным параметрам и техническим характеристикам аппаратуры АЭ обычно относятся: уровень собственных шумов усилительного тракта $U_ш$; амплитудный динамический диапазон $K_{АДД}$; амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); диапазон рабочих частот $\Delta F_{РЧ}$; максимальная скорость обработки импульсов АЭ; число каналов аппаратуры; перечень измеряемых параметров сигналов АЭ; перечень устанавливаемых параметров аппаратуры АЭ [11].

Учитывая то, что разрабатываемая АЭ сенсорная система предназначена для контроля качества выполнения технологической операции КТС, можно сформулировать следующие предварительные сокращённые технические требования:

1. Эффективное значение напряжения собственных шумов (приведенное ко входу) $U_ш$ не должно превышать 5 мкВ.
2. Динамический диапазон измерения амплитуды сигнала АЭ $K_{АДД}$ должен быть не менее 60дБ.
3. Диапазон рабочих частот $\Delta F_{РЧ}$ (по уровню -3 дБ) должен быть от 20,0 кГц до 0,6 МГц.
4. Ослабление за пределами рабочего диапазона при расстройке относительно частот среза на октаву (в 2 раза) АЭ должно быть не менее 30 дБ. При этом неравномерность АЧХ не должна превышать ±3 дБ.
5. Диапазон регулировки порогового напряжения, приведенный к входу: 40 дБ.
6. Устанавливаемые временные параметры аппаратуры (интервал контроля максимального значения импульса АЭ, длительность импульса, окончания импульса): 50 мкс.
7. При регистрации времени поступления сигнала АЭ: разрешение не хуже 1 мкс.
8. Скорость обработки импульсов АЭ: не менее 1000 $с^{-1}$.
9. Параметрический канал должен обеспечивать динамический диапазон измерения параметров не хуже 60 дБ.

Отметим, что требования п.п. 1–4 относятся к аппаратным средствам, в то время как остальные из приведенных требований должны быть реализованы программными средствами разрабатываемой АЭ сенсорной системы.

Требование максимального значения напряжения собственных шумов на уровне 5 мкВ в диапазоне рабочих частот до 1,0 МГц обеспечивается использованием прецизионных высокочастотных операционных усилителей (ОУ). В данном случае используются ОУ типа ADA4899 (“Analog Devices”, США), которые обладают следующими параметрами: собственный шум – 1нВ/√Гц, частота единичного усиления – 600 МГц, скорость нарастания – 310 В/мкс.

Требование динамического диапазона измерений амплитуды импульсов (длительностью более 1 мкс) на уровне 60 дБ относится в большей степени к узлу аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Этот динамический диапазон обеспечивается 10-разрядным преобразованием. Требование к частоте дискретизации АЦП зависит от реализации узла полосового фильтра, так как для корректного преобразования аналогового сигнала в цифровой вид необходимо выполнить условия теоремы Котельникова. В соответствии с этой теоремой полосу пропускания сигнала необходимо ограничить верхней частотой, равной половине частоты дискретизации. Верхняя частота спектра сигнала определяется верхней частотой подавления на уровне -60 дБ (в соответствии с условием динамического диапазона).

Полосовой фильтр разработанной АЭ сенсорной аппаратуры реализован в виде системы активных высокочастотных и низкочастотных фильтров. Для того чтобы определить верхнюю частоту подавления полосового фильтра необходимо задаться типом фильтра и его порядком. При выборе типа фильтра учитывалось требование наилучшей импульсной характеристики, которая определяется характеристикой групповой задержки. На рис. 1 представлена характеристика групповой задержки известных типов фильтров нижних частот (ФНЧ): Чебышева, Баттерворта и Бесселя. Из рис. 1 следует, что фильтр Бесселя обладает наиболее линейной характеристикой групповой задержки, поэтому на его основе были реализованы два фильтра 4-го порядка, которые составляют полосовой фильтр (8-го порядка): фильтр верхних частот (ФВЧ) и фильтр нижних частот.

Верхнюю частоту спектра анализируемых АЭ сигналов F_B можно определить из условия спада АЧХ ФНЧ Бесселя 4-го порядка до уровня -60 дБ. На рис. 2 представлены АЧХ ФНЧ 4-го порядка, из которых можно определить максимальные значения нормированных частот для требуемого уровня подавления сигнала. Из рис. 2 получаем, что для ФНЧ 4-го порядка Бесселя

значение частоты подавления сигнала по уровню -60 дБ в 8,4 раз больше расчётной верхней частоты пропускания, что в нашем случае составляет F_B = 0,6×8,4 ≈ 5,0 (МГц). Таким образом, можно рассчитать частоту дискретизации $F_{АЦП}$ АЭ сигнала (частоту тактирования АЦП): $F_{АЦП}$ = F_B ×2 = 10 МГц.

В ходе анализа интегральных высокоскоростных АЦП, которые доступны в настоящее время на рынке электронных компонентов, выбрана микросхема AD9225, которая характеризуется следующими параметрами: разрядность 12 бит, максимальная частота преобразования 25 МГц, напряжение питания 5 В, коэффициент отношения сигнал/шум 71 дБ, диапазон напряжений измеряемого сигнала от -2 В до +2 В.

Определим требования к активному фильтру верхних частот. Исходными параметрами являются: минимальная частота полосы пропускания на уровне -3 дБ, тип ФВЧ и порядок – фильтр Бесселя 4-го порядка, а также динамический диапазон измерения амплитуды сигнала АЭ $K_{АДД}$. Последний параметр определяет частоту подавления ФВЧ на уровне -60 дБ, которую можно определить аналогично ФНЧ, выполнив зеркальный поворот графика относительно единичной нормированной частоты. Расчёт показывает, что минимальная частота пропускания (на уровне -40 дБ) АЭ сенсорной системы должна составлять приблизительно 300 Гц. Это позволяет отфильтровывать наводки и помехи с частотами силового питания сварочного оборудования.

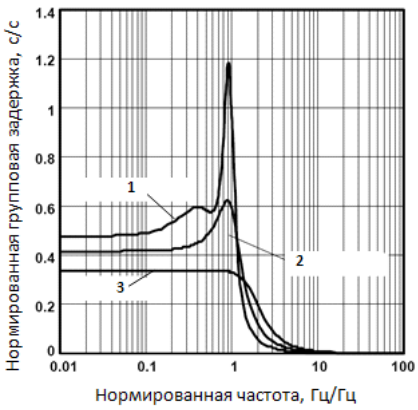

Рис.1 Характеристика групповой задержки фильтров низких частот: 1 – Чебышева; 2 – Баттерворта; 3 – Бесселя

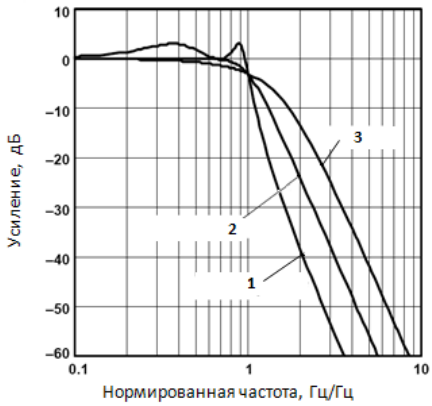

Рис.2 АЧХ фильтров низких частот 4-го порядка:
1 – Чебышева; 2 – Баттерворта; 3 – Бесселя

Для определения требований к объёму буфера оперативной памяти, предназначенной для хранения массива экспериментальных данных, зададимся временем проведения эксперимента – 5 с. Тогда для частоты дискретизации 10 МГц и типа данных *Integer* (2 байта) получаем, что размер буфера должен быть не менее 100 Мбайт.

Экспериментальный образец системы для анализа сигналов АЭ, возникающих в процессе КТС, представлен на рис. 3.

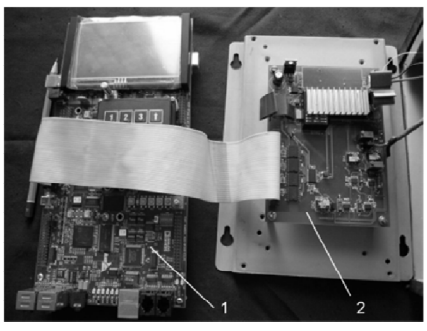

Рис.3 Аппаратура сенсорной системы: 1 – высокоскоростной регистратор цифровых сигналов; 2 - модуль усиления, фильтрации и оцифровывания сигналов АЭ

Выбор преобразователя АЭ

При проведении акустико-эмиссионного контроля используют широкополосные ($f_{max}/f_{min}\geq 2$), полосовые ($f_{max}/f_{min}\approx 1$) и узкополосные ($\Delta f/f=0{,}1$) пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Последние обычно применяют, когда на основе предварительных исследований выбран оптимальный для контроля диапазон частот, а широкополосные — когда нужно исследовать форму и частотный спектр сигналов АЭ. Поэтому на начальном этапе разработки АЭ системы контроля процесса КТС можно рекомендовать использование широкополосного датчика, благодаря которому можно будет более точно измерить сигнал акустической эмиссии, что даст больше возможностей для восстановления связи его источника с протекающими процессами сварки. ПЭП обычно рассчитывают на прием

колебаний нормальных к поверхности. Диаграмма направленности ПЭП, как правило, весьма широкая. ПЭП приклеивают к поверхности контролируемого объекта

легкорастворимым клеем. Условия эксперимента не ставят особых требований к способу крепления и защиты от воздействия высоких температур (керамики ЦТС-19, ЦТС-23 могут работать до 200°С).

Современная промышленность предлагает готовые датчики акустической эмиссии. На основании выше перечисленного был выбран датчик акустической эмиссии ДАЭ-150, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона. Преобразователь изготовлен из пьезокерамической пластины типа ЦТС, который крепится на алюминиевый протектор. Одним из контактов является корпус датчика. Внутри корпуса также установлен предусилитель. Датчик рассчитан на работу в диапазоне частот от 10кГц до 1МГц.

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) разработанной АЭ системы контроля процесса КТС создано в рамках математического пакета MATLAB. ПО предназначено обработки в режиме “off-line” записанных сигналов АЭ с целью получения информативного показателя качества КТС, а также для визуализации сигналов и рассчитанных характеристик.

Программное обеспечение АС сенсорной системы реализует следующие задачи:

– выполняет предварительную обработку информации для вывода графиков на экран монитора;

– проводит спектральные преобразования сигнала АЭ;

– отображает кривые временных процессов (АЭ сигнал и сигнал датчика тока сварки), а также спектральные характеристики сигналов на заданном интервале времени;

– рассчитывает показатели качества КТС;

– сохраняет результаты в виде файла на жёстком диске.

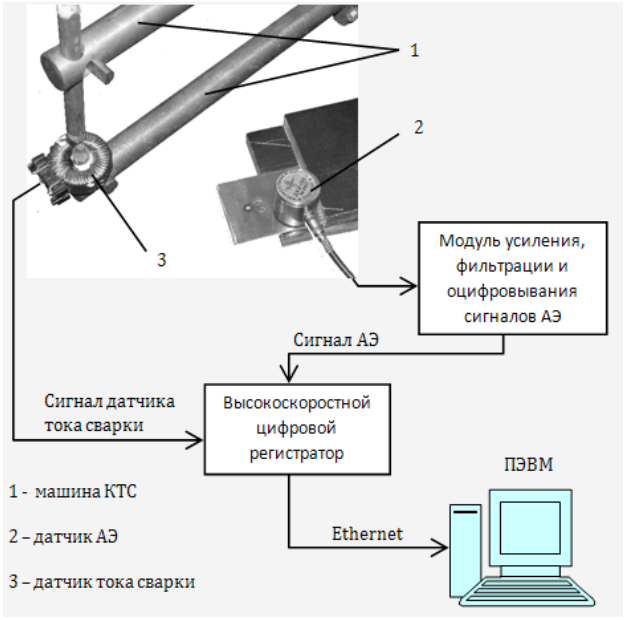

Рис. 4 Автоматизированная система для исследований сигналов АЭ при КТС

Описание установки для исследований

В состав разработанной автоматизированной системы для исследования сигналов АЭ, возникающих в процессе КТС, входят: машина КТС *“АДАМ-1.1”*; датчик тока сварки; датчик сигналов АЭ типа ДАЭ-150; разработанный модуль усиления, фильтрации и оцифровывания сигналов АЭ; высокоскоростной цифровой регистратор, созданный на основе микропроцессора BF548 (“Analog Devices”) и персональный компьютер, работающий под управлением ОС типа MS Windows (рис. 4).

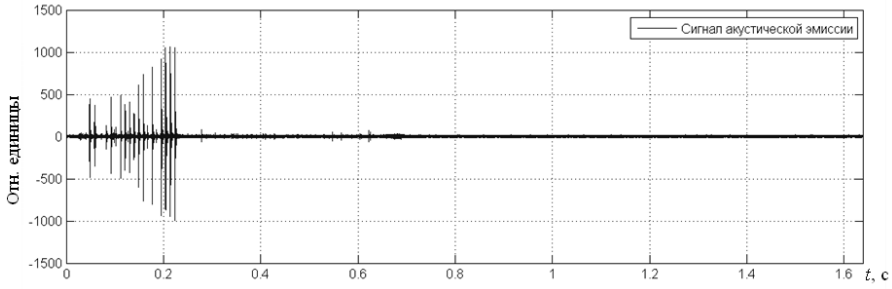

Рис. 5 Сигнал АЭ

Сигналы акустической эмиссии одновременно с сигналом датчика тока сварки в цифровом виде в реальном масштабе времени считываются высокоскоростным цифровым регистратором и записываются в его оперативную память. По окончании сварки записанный массив экспериментальных данных передаётся в компьютер и сохраняется на жёстком диске для последующего анализа. С помощью программы MATLAB производится обработка и визуализация результатов измерений. Пример оцифрованного в процессе точечного сваривания сигнала АЭ представлен на рис. 5.

Выводы

Таким образом, сформированы технические требования к АЭ сенсорной системе для контроля процесса КТС, которая должна состоять из аппаратных и программных средств. Аппаратные средства реализуют активную полосовую фильтрацию с использованием системы из 2-х узлов: ФВЧ 4-го порядка типа Бесселя и ФНЧ 4-го порядка также типа Бесселя. Полоса пропускания полосового фильтра по уровню -3дб составляет 20 кГц … 0,6 МГц. Сигналы АЭ оцифровываются 12-разрядным АЦП с тактовой частотой 10 МГц и запоминаются в буфере объёмом 100 Мбайт (длительность непрерывной регистрации 5 с). Дальнейшим направлением развития является реализация обработки данных в режиме “on-line”, а также разработка критериев оценивания качества точечного сварного соединения по результатам АЭ контроля.

Список литературных источников

1. Руденко П.М. Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02 / П.М. Руденко, В.С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2007. - №11(655). – С. 43-45.

2. Method and Apparatus for Electrical Resistance Spot Welding Using Electrical Servo Actuator: патент 7145097 США, МПК[7] B23K 11/24 / Leach, Kenneth R., Pippin Jr., John R.; заявитель и патентообладатель Milco Manufacturing Co. – заявл. 06.02.04; опубл. 05.12.06 – 12 с.

3. Óscar Martína. Quality prediction of resistance spot welding joints of 304 austenitic stainless steel / Óscar Martína, Pilar De Tiedra, Manuel López, Manuel San-Juan, Cristina García, Fernando Martín, Yolanda Blanco // Materials and Design. – 2009. – V. 30, №1. – P. 68–77.

4. Verfahren zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen: патент Германии № 102007002319.9, МПК[8] B23K 11/24 (2006.01), B23K 11/25 (2006.01) / Volkswagen AG, Rudolf Heiko, Juttner Sven, Streilein Volker. – заявл. 16.01.07; опубл. 17.07.08 – 9 с.

5. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов / Б.Д. Орлов, А.А. Чакалев, Ю.В. Дмитриев и др.; Под общ. ред. Б.Д. Орлова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

6. Контроль качества контактной точечной сварки с помощью накладного вихретокового преобразователя [Электронный ресурс] / А.О. Воробьев, С.В. Болотов // Студенческий вестник. – 2007. – №3. Режим доступа к журналу: http://www.bru.mogilev.by/science/vesnik/papers2007.html (дата обращения 25.09.2012 г.)

7. Архипов П.П. Термосенсорная диагностика и управление качеством соединений при контактной сварке / П.П. Архипов, А.Ф. Керемжанов, Н.Г. Ефименко, М.В. Орлов, Н.А. Варуха // Сварщик. – 2002. - №5 (27). – С. 50-51.

8. Ivan Polajnar. Sources of acoustic emission in resistance spot welding / Ivan Polajnar, Janez Grum, Elsayed A. Esmail // International Conference «DEFEKTOSKOPIE 2008»: conference proceedings, November 4-6, 2008. – Brno, Czech Republic, 2008. – P. 187-194.

9. Бигус Г.А. Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой / Г.А. Бигус, А.А. Травкин // 17-я Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: материалы конференции, 5-9 октября 2009. – Ялта, 2009. – С. 122-124.

10. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, А.В. Ковалёв, Ф.Р. Соснин; под ред. В.В. Клюева. – 3-е изд., исп. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

11. РД 03-29-99. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов / Утв. Госгортехнадзором России 15.07.1999; введ. в действие с 01.10.1999. – М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. – 32 с.