

## **КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 620.179:620.19:621.791.763

### **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ**

*Шаповалов Е. В., Галаган Р. М., Клищар Ф. С., Запара В. И.  
Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев, Украина*

*В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на возникновение дефектов литого ядра в процессе контактной точечной сварки. Проведён обзор методов и средств контроля и управления процессом контактной точечной сварки, позволяющих повысить качество сварного соединения.*

*Показана необходимость установления корреляционных зависимостей между разными методами контроля и управления. Предложен алгоритм работы системы управления процессом контактной сварки.*

**Ключевые слова:** *контактная точечная сварка, неразрушающий контроль, измерение, управление.*

#### **Введение**

Контактная точечная сварка (КТС) занимает важное место во многих областях промышленности, таких как автомобиле-, авиа- и судостроение, машиностроительная и приборостроительная области и др. К сожалению, современные технологии и используемое оборудование для КТС не позволяют создавать полностью бездефектные сварные соединения [1, 2]. В некоторых случаях для повышения надёжности сварных конструкций делают дополнительные сварные точки, что приводит к удорожанию изделий. Например, в автомобильной промышленности количество дополнительных сварных точек на отдельных стадиях производства достигает 30%. Соответственно, важной задачей является повышение качества сварных соединений путём использования и улучшения методов и средств контроля и управления процессом КТС, что позволит продлить сроки эксплуатации и повысить надёжность сварных конструкций.

#### **Постановка задачи**

При КТС актуальным является контроль сварных соединений в реальном времени, который позволял бы адаптивно управлять процессом сварки. В большинстве методов используется косвенная обратная связь, которая, к сожалению, не всегда достаточно информативна. Важной задачей является не только выбор и использование требуемых методов контроля процесса КТС в каждом отдельном случае, но также использование последних достижений электроники и схемотехники, применение современных методов обработки полученной информации, выделения информативных признаков на фоне мешающих факторов, разработка правил принятия решений о соблюдении режимов КТС для ис-

ключения субъективной погрешности, обусловленной оператором. Процесс КТС достаточно механизирован и автоматизирован на современном этапе его развития, разработано много методов контроля процесса КТС, однако слабо исследованы корреляционные связи этих методов между собой. Использование комплексного подхода к принятию решения о качестве сварного соединения по результатам, полученным одновременно при различных методах контроля, позволит повысить достоверность контроля и, соответственно, качество выпускаемой продукции.

Целью статьи является анализ преимуществ и недостатков существующих методов и средств контроля и управления процессом КТС, что позволит разработать комплексный алгоритм функционирования системы управления процессом КТС с одновременным использованием нескольких методов контроля.

### Классификация факторов, влияющих на возникновение дефектов в процессе КТС

Контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемных соединений конструкционных материалов в результате их кратковременного нагрева электрическим током и пластического деформирования усилием сжатия [1]. Точечная сварка – это один из способов контактной сварки, при котором детали свариваются по отдельным ограниченным участкам касания. В результате КТС в центральной зоне свариваемых деталей образуется литое ядро (рис. 1). Сварное соединение считается качественным, если оно имеет литое ядро заданных размеров, в котором нет дефектов, и характеризуется определенной величиной проплавления каждой соединяемой детали [2].

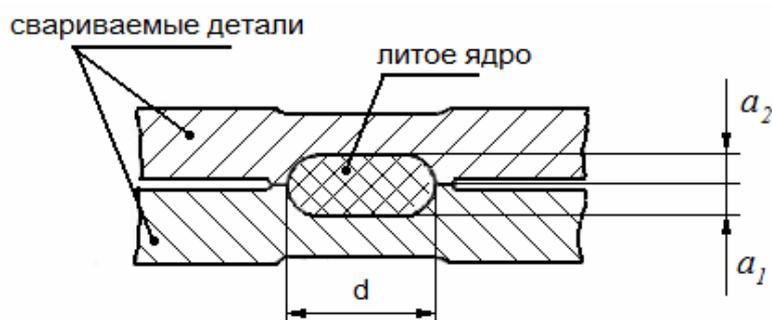


Рис. 1. Схематический разрез точечного сварного соединения:  $d$  – диаметр литого ядра,  $a_1$ ,  $a_2$  – глубина проплавления свариваемых деталей

В процессе КТС на формирование литого ядра влияет множество случайных факторов, которые приводят к появлению дефектов [1-3]. Основными дефектами точечных сварных соединений являются: частичный непровар, склейка, наружные и внутренние трещины и выплески, поры, прожог металла, большие вмятины от электродов.

Прежде, чем приступить к рассмотрению существующих методов и средств контроля процесса КТС, необходимо провести анализ факторов, влияющих на

качество сварного соединения, что впоследствии позволит правильно сформулировать требования к методам контроля, а также оценить их возможности. Для анализа влияния факторов (причин), обуславливающих какое-либо следствие, удобно использовать диаграмму Исикавы (рис. 2). Построение причинно-следственной диаграммы применяется при разработке и непрерывном совершенствовании продукции; это инструмент, обеспечивающий системный подход к определению фактических причин возникновения проблем [4].

Большинство факторов, приведённых на рис. 2, взаимосвязаны. Отклонение данных факторов от установленных норм или их несоблюдение может привести к возникновению дефектов в зоне сваривания. Для контроля этих факторов разработаны различные методы. Например, факторы, обусловленные временными режимами сварки, электрическими и механическими параметрами сварочного оборудования можно контролировать с помощью методов регистрации параметров оборудования КТС. Факторы, обусловленные физическими процессами образования соединения, могут быть диагностированы с помощью методов неразрушающего контроля.

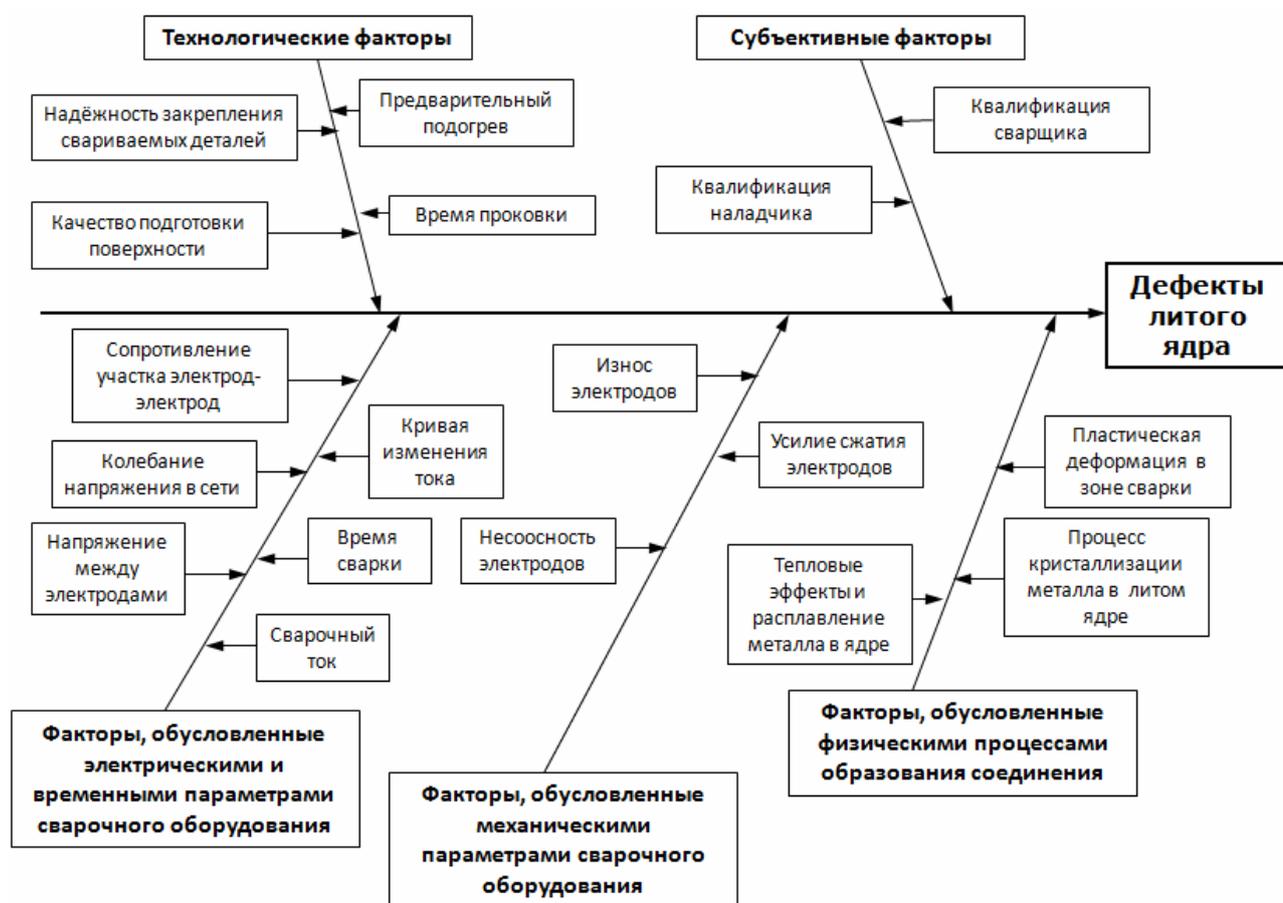


Рис. 2. Факторы, несоблюдение которых или отклонение от нормы может привести к возникновению дефектов литого ядра в процессе КТС

Уменьшение влияния технологических и субъективных факторов достигается за счёт автоматизации и механизации процесса КТС, а также применения специализированных программ настройки оборудования. Стоит отметить, что достоверная оценка степени влияния каждого отдельного фактора на формирование дефектов представляет сложную задачу.

### **Методы и средства контроля процесса КТС**

С целью обеспечения стабильной работы сварочного оборудования создано множество регуляторов, которые можно разделить по типу регистрируемого электрического параметра режима контактной точечной сварки: сварочного тока, времени протекания сварочного тока, падения напряжения между электродами, мощности и энергии, выделяющейся в точке сварки и т.п. [5, 6] Для повышения качества сварного соединения в некоторых регуляторах совмещено регистрацию одного или нескольких электрических параметров вместе с некоторыми физическими параметрами сварки, такими как усилие сжатия электродов, сопротивление точки сварки (например, в регуляторах РКС-17, РКМ-901).

В [7] предложен способ обеспечения качества и воспроизводимости точечной сварки за счёт стабилизации ускорения и амплитуды движения электродов. При отклонении от заданных параметров (амплитуды, частоты, ускорения) возникает сигнал, подаваемый в систему управления, корректирующую процесс работы сварочных клещей. В ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ разработана система контроля КСУ КС 02 и методика управления машиной КТС с помощью нейронной сети по допустимым отклонениям параметров сварочного оборудования (сварочного тока и напряжения между электродами) [3]. С целью стабилизации действующего значения сварочного тока в условиях влияния таких возмущений, как колебание питающей сети, подготовка деталей, изменение давления в пневматической сети машины, износ электродов предложен способ микропроцессорного управления КТС, для которого разработаны специальные вычислительные алгоритмы [8].

Усилия сжатия электродов измеряют с помощью специальных тензометрических проволочных датчиков, которые обычно крепятся к нижней консоли электродержателя, либо манометрических датчиков, устанавливаемых в рабочей камере цилиндра механизма сжатия. В сварочном оборудовании компании Milco Manufacturing датчик давления установлен между серводвигателем контактной машины и подвижным электродом. Это позволило однозначно принимать сигнал с датчика об изменении нагрузки между электродами вследствие расширения и последующего плавления сварной точки, исключив ошибку обратного хода клещей пневматического привода [9].

Преимуществом рассмотренных методов контроля, которые основаны на регистрации электрических, временных и механических параметров оборудования КТС, является большое количество разработанных систем и регуляторов, которые часто составляют единое целое с машиной и устанавливаются на заводах-изготовителях сварочного оборудования. С помощью данной аппаратуры

можно стабилизировать режим сварки, но недостатком является то, что регистрация электрических и физических параметров режима сварки позволяет вести только косвенную оценку качества сварного соединения. Это, в свою очередь, требует разработки сложного математического аппарата для установления зависимостей между измеряемыми параметрами и качеством КТС. При этом с учётом сложного влияния множества независимых факторов на формирование литого ядра, как показано на рис. 2, при выведении зависимостей и построении моделей необходимо учитывать взаимосвязь этих факторов. Численное моделирование КТС, в котором используют механическую, электрическую, тепловую и металлургическую модели формирования сварного соединения, требует значительных вычислительных мощностей, однако позволяет сократить время и сэкономить средства при разработке технологии КТС [10].

Для контроля процесса КТС также используются неразрушающие методы контроля, основанные на регистрации различных физических и электромагнитных полей объекта контроля. Например, для обнаружения образования зоны расплавления в процессе сварки применяют ультразвуковые методы. Немецкая компания "Vogt Ultrasonic GmbH" разработала ультразвуковую систему SpotLine для контроля и управления работой машины КТС [11]. В качестве датчиков используются два ультразвуковых преобразователя, которые устанавливаются в канале охлаждения возле рабочей части каждого сварочного электрода (рис. 3). В процессе сварки излучаются продольные ультразвуковые волны с частотой повторения 500 Гц, которые проникают через рабочую (контактную) поверхность электрода в материал соединяемых деталей.

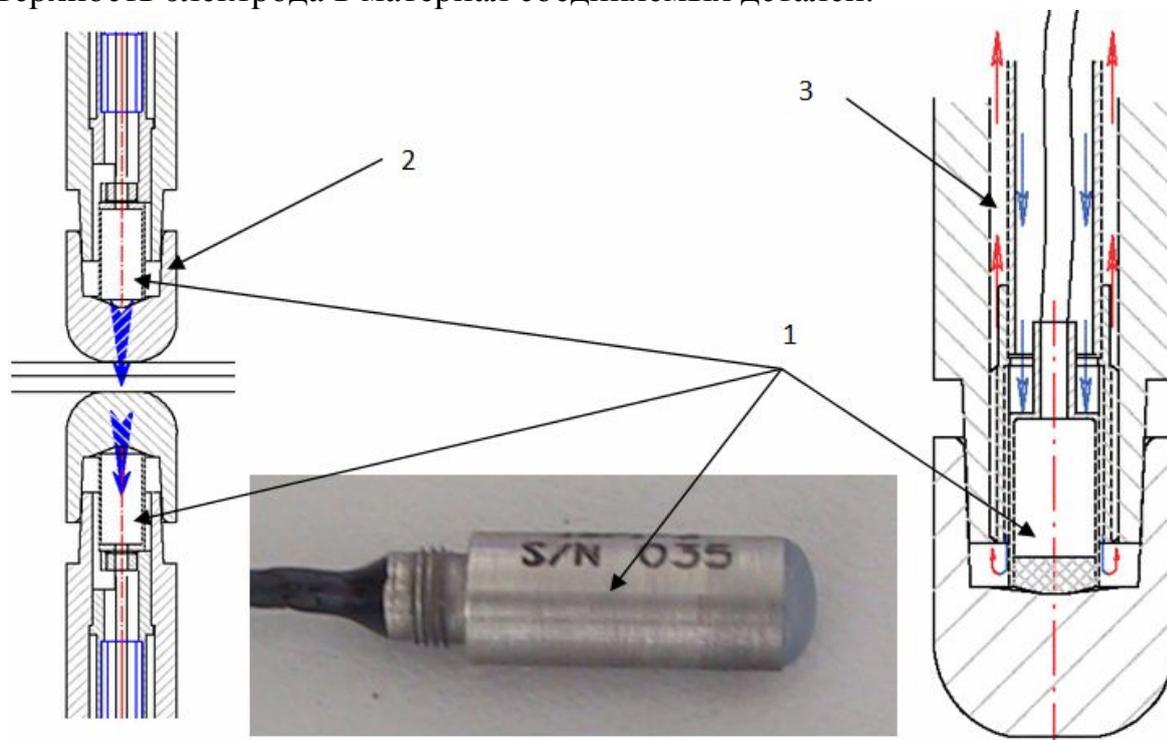


Рис. 3. Активный ультразвуковой метод контроля процесса КТС: 1) ультразвуковой преобразователь; 2) сменный наконечник сварочного электрода; 3) канал охлаждения

Ультразвуковая волна, прошедшая сварное соединение, попадает на приемник, установленный на втором электроде. Информация, полученная отраженным акустическим сигналом, используется для температурной компенсации, проверки наличия акустического контакта и работы датчиков. О качестве сварного соединения судят по полученному А-скану. К недостаткам данного способа можно отнести сложность изготовления специальных электродов. Если электроды установлены несоосно, это препятствует передаче ультразвуковой волны и затрудняет получение результата. Электроды, имеющие большую конусность формы рабочей поверхности, также влияют на результат контроля.

В работах [12, 13] представлены системы контроля качества контактной точечной сварки с помощью акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ можно принимать на протяжении всего сварочного цикла, регистрируя опускание, подъем сварочных электродов и время действия сварочного тока. На стадии охлаждения могут образовываться наружные и внутренние трещины, раковины, развитие которых характеризуется появлением коротких импульсов сложной формы и большой амплитуды [14, 15]. Данный способ контроля процесса сварки вводится как дополнительный к существующим методам прогнозирования надежности сварного соединения. Это обусловлено малым количеством экспериментальных результатов, а также сложностью надежного и однозначного приёма сигналов АЭ на фоне шумов, обусловленных работой сварочного оборудования. Кроме того, требуется разработка сложного математического и статистического аппарата принятия решения по результатам АЭ контроля [16].

Для контроля процесса КТС используется также вихретоковый метод, который основан на корреляционной зависимости изменений удельной электрической проводимости зоны сварки от наличия или отсутствия дефектов этих соединений. При проведении вихретокового контроля в процессе сварки преобразователь надевается на электрод контактной машины. Изменение вносимого сопротивления накладного преобразователя будет зависеть от изменения электропроводности и изменении магнитной проницаемости под электродами из-за влияния теплового поля при сварке. Для реализации данного способа разработана специальная автоматическая установка [17]. В её функции входит: регистрация величины напряжения преобразователя и передача сигнала на ЭВМ через аналого-цифровой преобразователь, подача импульса управления на отключение регулятора цикла сварки при достижении диаметра литого ядра номинального значения. Представленная автоматическая установка за счёт управления временем сварки обеспечивает формирование литого ядра требуемых размеров, что позволяет повысить качество соединений.

Так как в настоящее время не существует теоретических методов установления зависимости удельной электрической проводимости от дефектности сварного соединения, то задача решается экспериментальным путем [2], что можно отнести к недостаткам данного метода.

Ещё одним методом неразрушающего контроля, используемым для диагностики процесса КТС, является тепловой. Распределение теплового поля в об-

ласти сваривания регистрируют с помощью термографической камеры [18]. Для оперативного контроля КТС предложена термосенсорная диагностика (ТСД), которая позволяет интегрально оценивать качество сварного соединения [19]. При использовании ТСД снимаются интенсивности остаточного теплового излучения объекта контроля и электродов в широком спектральном диапазоне. Используя методы математической обработки сигналов, полученных с помощью набора термодатчиков с точечным поверхностным термочувствительным элементом, можно сделать выводы о многих параметрах процесса сварки, таких как: контроль состояния электродов, отображение тепловой картины объекта сварки, слежение в реальном времени за процессом сварки и т.п.

Недостатками тепловых методов контроля являются инерционность показаний при проведении измерений контактным способом, также эти методы имеют большую зависимость температуры поверхности деталей от ряда переменных факторов: качества подготовки поверхности, шунтирования тока, интенсивности охлаждения, ширины нахлестки, темпа сварки.

### Алгоритм работы системы управления процессом КТС

В результате проведённого анализа используемых методов контроля процесса КТС предложен следующий алгоритм работы системы управления (рис. 4).

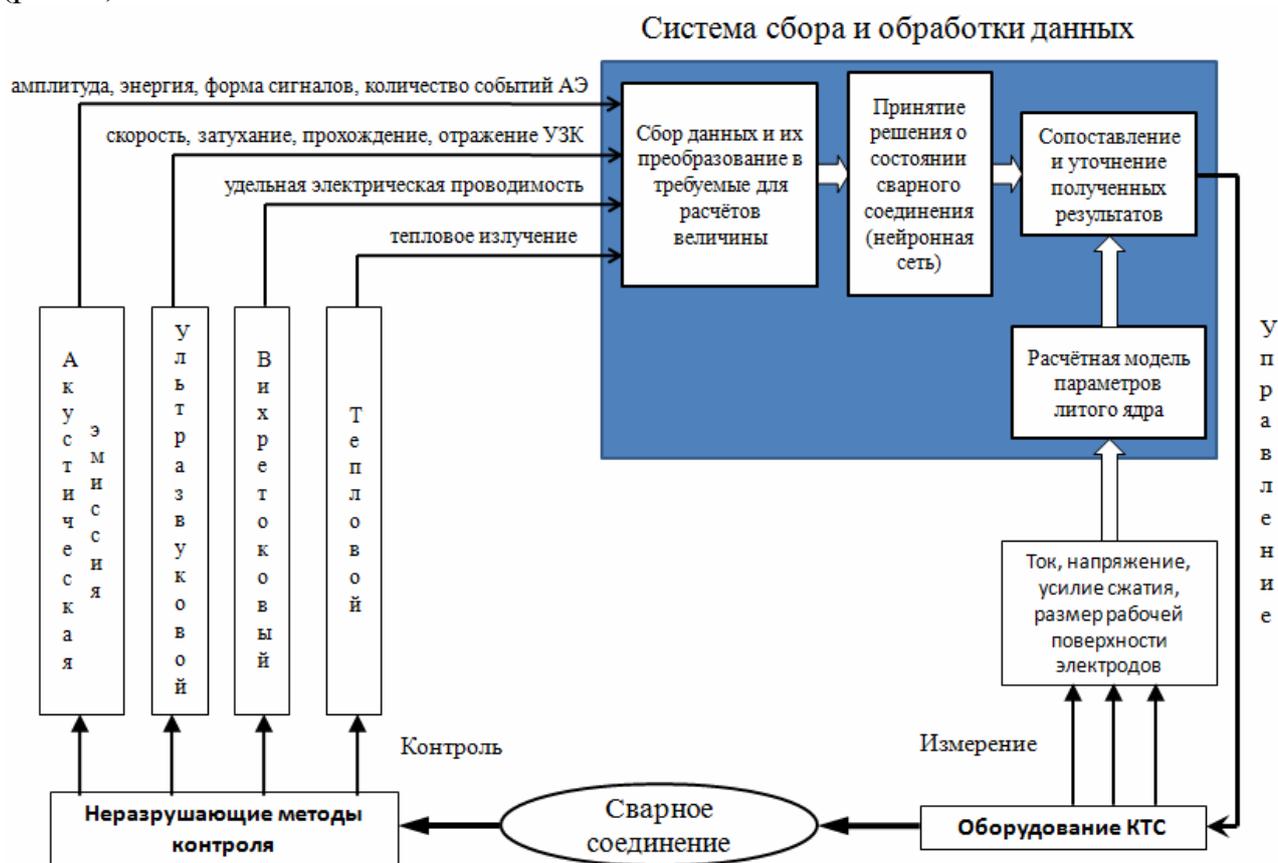


Рис. 4. Алгоритм работы системы управления и контроля процесса КТС

Алгоритм работы системы предполагает использование одновременно четырёх методов НК, в каждом из которых выделены свои информативные признаки; параллельно проводятся измерения параметров оборудования КТС. Все полученные данные обрабатываются специализированной системой, в состав которой входит программное обеспечение, позволяющее получить параметры ядра по расчетным моделям. Анализ и сопоставление результатов контроля, измерений и моделирования позволяет принимать решения об управлении процессом КТС.

### **Выводы**

В результате проведённого анализа показано, что универсального метода контроля процесса контактной сварки нет. Каждый отдельно взятый метод имеет свои преимущества и недостатки и решает ограниченный круг задач. Соответственно при разработке современных средств контроля процесса КТС необходимо уже сейчас предусматривать возможность использования нескольких методов контроля.

Так как процесс сварки достаточно кратковременен, то для обработки больших объёмов данных, чтобы управлять процессом в реальном времени, потребуется использование быстродействующего оборудования (электронных компонентов систем управления), а также оптимизация алгоритмов принятия решений для сокращения времени вычислений.

Учитывая, что некоторые методы позволяют контролировать один и тот же параметр либо прямо, либо косвенно, перспективным является установление и развитие корреляционных зависимостей между разными методами контроля КТС, что позволит разработать критериальные правила для управления процессом сваривания.

### **Литература**

1. 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.
2. Дерун Е. Н. Вихрегоковый контроль точечных сварных соединений / Е. Н. Дерун. – Старая Русса: СПК (филиал) НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2010. – 142 с.
3. 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.
4. Контроль качества с помощью персональных компьютеров / Т. Макино, М. Охаси, Х. Докэ, К. Макино; Пер. с яп. А. Б. Орфенова; Под ред. Ю. П. Адлера. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
5. Koskimäki Heli Junno. Application of the extended KNN method to resistance spot welding process identification and the benefits of process information / Koskimäki Heli Junno, Laurinen Perttu, Naapalainen Eija, Tuovinen Lauri, Röning Juha // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – № 5. – P. 2823 – 2830.
6. Óscar Martínez. Quality prediction of resistance spot welding joints of 304 austenitic stainless steel / Óscar Martínez, Pilar De Tiedra, Manuel López, Manuel San-Juan, Cristina García, Fernando Martín, Yolanda Blanco // Materials and Design. – 2009. – V. 30, №1. – P. 68 – 77.

7. Verfahren zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen: патент Германии № 102007002319.9, МПК8 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.
8. Климов А. С. Параметрическая стабилизация контактной сварки / А. С. Климов, А. В. Комиренко, А. Н. Анциборов, В. С. Климов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2010. – № 2. – С. 104 – 109.
9. Method and Apparatus for Electrical Resistance Spot Welding Using Electrical Servo Actuator: патент 7145097 США, МПК7 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.
10. Kevin R. Chan Save time and money with resistance welding simulation software / Kevin R. Chan // Welding journal. – 07.2008. – P. 32 – 36.
11. Vogt G. Inline-process and quality control of spotwelds of car bodies – Ultrasonic sensors integrated in resistance welding electrodes / G. Vogt // 17th World conference on nondestructive testing: conference proceedings. – Shanghai, China, 2008. – P. 1 – 6.
12. Acoustic emission spot welding controller: пат. 3824377 США: МПК7 H 03k 21/34 / Kenneth R. Notvest ; заявитель и патентообладатель Trodyne Corporation, Teterboro, N.J. – заявл. 10.05.72 ; опубл. 16.07.74 – 9 с.
13. Luo Zhen. Chaos analysis of acoustic emission signals in spot welding process / Luo Zhen, Wang Rui, Shan Ping, Dong An // China Welding. – 2009. – V. 18, №1. – P. 73–78.
14. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. – К.: Издательство «ИНДПРОМ», 2008. – 816 с.
15. Tomas Kek. Analysis of AE during resistance spot welding / Tomas Kek, Ivan Polajnar, Janez Grum // The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»: conference proceedings, Ljubljana, Slovenia, September 1-3, 2009. – P. 243-250.
16. Степанова Л. Н. Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа / Л. Н. Степанова, К. В. Канифадин, С. А. Лазненко // Дефектоскопия. – 2010. – №1. – С. 73 – 83.
17. 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 05.07.2012 г.)
18. Verfahren und Prüfsystem zur zerstörungsfreien Prüfung von Materialverbindungen, insbesondere von Widerstandsschweißverbindungen: патент Германии № 102007050005.1, МПК8 G01N 25/72 (2006.01) / Daimler AG, Greiner Glaudia. – заявл. 17.10.07; опубл. 23.04.09 – 19 с.
19. 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.

*Надійшла до редакції  
14 червня 2012 року*

© Шаповалов Е. В., Галаган Р. М., Клишар Ф. С., Запара В. И., 2012