

PACS numbers: 06.60.Vz, 07.05.Dz, 07.05.Mh, 07.05.Tr, 81.20.Vj

## **Пути повышения качества сварных соединений при контактной стыковой сварке оплавлением**

**Н. А. Коновалов, С. П. Ошкадёрв\*, С. И. Полосков\*\***

*ЗАО «Псковэлектросвар»,  
ул. Новаторов, 3,  
180022 Псков, Россия*

*\*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

*\*\*МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
05005 Москва, Россия*

Контактная стыковая сварка оплавлением обеспечивает высокую производительность и стабильно высокое качество сварных соединений при строительстве магистральных трубопроводов за счёт эффективных систем управления процессом сварки. Однако дальнейшее совершенствование процесса сварки может быть достигнуто только при сокращении объёма контроля качества соединений. Данная проблема может быть решена путём создания интеллектуальных систем управления. Проведённый анализ позволил синтезировать модифицированную архитектуру интеллектуальной системы управления процессом сварки и контроля с использованием эффективных методов искусственного интеллекта. Современный уровень развития методов компьютерного инженерного анализа позволяет существенно улучшить качество управления контактной стыковой сваркой оплавлением.

Контактна стикова зварка отопленням забезпечує високу продуктивність і стабільно високу якість зварних з'єднань при будівництві магистральних трубопроводів за рахунок ефективних систем управління процесом зварювання. Однак подальше підвищення ефективності процесу зварювання може бути досягнуто тільки при скороченні обсягу контролю якості стиків. Дана проблема може бути розв'язана шляхом створення інтелектуальних систем управління. Проведений аналіз уможливив синтезувати модифіковану архітектуру інтелектуальної системи управління процесом зварювання та контролю з використанням ефективних метод штучного інтелекту. Сучасний рівень розвитку метод комп'ютерного інженерного аналізу уможливило істотно поліпшити якість управління контактним стиковим зварюванням отопленням.

Contact flash-butt welding provides a high capacity and stable high quality of welding joints of the construction of trunk line through effective systems of welding-process control. However, further increasing of welding-process efficiency can be achieved only by reduction of joints' quality control. This problem can be solved by creation of intellectual management system. The analysis allows synthesizing modified architecture of welding-process intellectual-management system and control with using efficient methods of artificial intelligence. State-of-the-art of computer engineering analysis methods allows significantly improve quality of contact flash-butt welding management.

**Ключевые слова:** контактная стыковая сварка оплавлением, модель процесса сварки, интеллектуальная система управления.

*(Получено 23 июля 2013 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При строительстве магистральных трубопроводов основным технологическим процессом соединения труб является применение сварочных технологий. При их использовании возникает ряд проблем, связанных с производительностью применяемых процессов сварки и качеством сварных соединений. Использование контактной стыковой сварки с оплавлением стыкуемых торцов и последующей их объемной пластической деформацией осадкой (КССО) принципиально решает проблему производительности и обеспечивает высокое качество сварных соединений [1]. Однако для гарантирования высокой стабильности процессов необходимо применять высокотехнологическое оборудование и постоянно совершенствовать систему контроля над соблюдением регламентных параметров при выполнении сварочных работ. Объясняется это тем, что в соответствии с ISO 9001 сварка относится к «специальному процессу», результаты которого оценить путем испытаний и анализа качества готового изделия нельзя. Это значит, что гарантировать надежность и получать стабильные эксплуатационные свойства сварных соединений можно лишь при непрерывном поэтапном контроле всех операций при выполнении сварочных работ, что позволит обеспечить получение требуемых свойств металла сварных соединений и поднимет общий уровень технологической культуры.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Эффективность управления процессом КССО и обеспечение качества сварных соединений зависят от наличия методов и средств технического контроля по всей технологической цепочке получения соединения. На рисунке 1 показана очередность основных ста-

дий технологии формирования соединений, определяющих их ресурсный уровень.

Проведение технического контроля на всех стадиях технологического процесса КССО необходимо для получения требуемого качества сварных соединений. Оценка его прямыми методами механических испытаний металла сварных соединений, вырезанных непосредственно из строящегося трубопровода, возможна только в случае возникновения достаточно веских оснований. Оценка же качества соединений, полученных на контрольных или технологических образцах, не гарантирует полную адекватность полученных значений контролируемых параметров их реальным значениям, соответствующим условиям сборки при строительстве магистральных трубопроводов. Важно понимание и того, что используемые в настоящее время методы неразрушающего контроля, не всегда могут выявить специфические дефекты, которые присущи швам, выполненным методом КССО [2, 3]. К тому же, все известные методы оценки качества готовых соединений не позволяют обнаруживать появление брака непосредственно в процессе сварки, тем самым, исключая возможность своевременной корректировки режимов или настройки оборудования. Вот почему при совершенствовании технологии КССО следует использовать системы автоматизированного контроля, которые позволят предельно уменьшить или даже полностью исключить послеоперационный контроль. Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет решать подобные задачи.

Опыт эксплуатации оборудования для КССО показывает, что его совершенствование требует разработки нового поколения систем автоматизированного технического контроля и управления. Одним из наиболее перспективных путей их создания является совмещение технологических операций с регистрацией текущих значений



**Рис. 1.** Последовательность основных операций при стыковой сварке трубопроводов.

физических параметров процесса сварки. Этот путь в отличие от метода использования послеоперационного контроля, расширяя возможности автоматического управления процессами, не требует дополнительного времени и позволяет обеспечить воспроизводимость в пределах, обусловленных технологией границ. При этом появляется возможность контролировать состояние сварочного оборудования [4]. При выходе параметров сварки за допустимые границы система управления дает сигнал о необходимости корректировки режимов каждого поэтапного процесса. Таким образом, появляется возможность при управлении сварочной машиной, одновременно оценивать качество труда технологов, наладчиков, сварщиков. Объединение в единое целое и согласование компонентов управления и контроля позволяет обеспечивать стабильно высокое качество сварных соединений, экономию ресурсов и снижение до минимума трудовых затрат. Система управления, обеспечивая реализацию оптимального многопараметрического режима сварки и его документированный контроль, позволяет оперативно при необходимости проводить его корректировку.

Развитие программных средств и аппаратного обеспечения позволяет организовать в реальном времени интеграцию потоков информации при управлении процессами КССО [5, 6]. Основные задачи [7], решаемые при этом в системе управления процессом КССО, приведены в виде схемы на рис. 2.

Система управления процессом сводит воедино информацию о ходе его реализации, в том числе, о взаимодействии со сварщиком-оператором (организационная задача), об управлении исполнительными механизмами машины (логическая задача), об автоматическом регулировании процесса сварки по датчикам обратных связей (технологическая задача), о программном формировании перемещений при оплавлении (геометрическая задача), об идентификации состояния технологического оборудования (диагностическая задача), а также документирует процесс сварки стыков (архивная

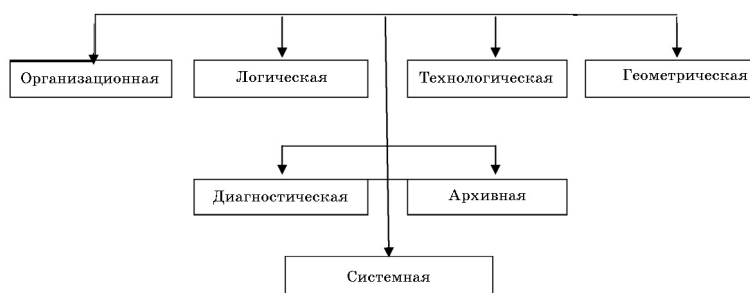


Рис. 2. Основные задачи в системе управления КССО.

задача) и координирует решение вышеперечисленных задач (системная задача).

Современная вычислительная техника, надежные и точные измерительные устройства и исполнительные механизмы позволяют на высоком техническом уровне управлять процессом сварки, осуществлять его оперативный контроль [8], визуализацию [9], протоколирование и архивирование [10, 11]. Вместе с тем высокая скорость протекания процессов обуславливает необходимость принятия оперативных решений по ряду неформализованных задач в условиях дефицита информации и ограниченного времени. Указанные решения до недавнего времени оставались в пределах компетенции интеллекта прямых исполнителей: сварщика-оператора, инженера-технолога и др. Современные достижения в области теории автоматического управления [12] и формализации слабоструктурированных задач позволяют реализовать очень сложные системы управления с заменой естественного интеллекта на искусственный.

В этой связи для КССО весьма перспективным является использование интеллектуальных интегрированных систем автоматизированного управления и технического контроля, которые способны оценить стабильность процесса непосредственно при сварке [13], и, при необходимости, корректировать ее параметры по датчикам обратных связей. Подобное инновационное решение основано на преобразовании информации о процессе сварки в необходимые управляющие решения воздействия с их последующим выполнением в условиях полного исключения субъективного «человеческого фактора». Подобные системы уже успешно прошли проверку и применяются при автоматической орбитальной дуговой сварке магистральных газопроводов на объектах ОАО «Газпром» [14, 15].

Проведенный анализ показал, что большое число параметров, влияющих на качество сварных соединений, и малый период времени между выполнением сварных соединений (менее 3 мин) приводит к тому, что системы управления и контроля, основанные только на детерминированных моделях контроля качества сварных соединений, малоэффективны [16]. Известно [17], что любая интеллектуальная система представляет объединенную информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения. Она может работать как во взаимосвязи с человеком, так и автономно, и способна на основе полученных сведений принимать решение к действию, синтезировать цель и находить рациональные способы ее достижения.

### **3. АРХИТЕКТОНИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

В настоящее время существуют три типа архитектурных реше-

ний при построении интеллектуальных систем управления:

- декомпозиционная архитектура, основывающаяся на принципе «распознавание–моделирование–планирование–осуществление»;
- реактивная или рефлексная архитектура, основанная на стратегии целенаправленной реализации решений за счет применения нейросетевых систем управления или систем, построенных на базе нечеткой логики;
- гибридная архитектура, интегрирующая в себе декомпозиционную и реактивную архитектуры.

Известно, что заданным требованиям по быстродействию удовлетворяют системы с гибридной архитектурой на базе искусственного интеллекта с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [4, 18, 19]. В работе [19] показано, что хорошо обученная ИНС способна оперативно с высокой долей вероятности, обнаруживать в реальном масштабе времени некачественное сварное соединение. Однако одной из проблем при создании ИНС является подтверждение адекватности нейросетевой модели по ряду показателей, в том числе оценке возможности функционирования в режимах, отличных от использованных при обучении сети [4]. Этот недостаток устраняется, если результаты проверок накапливаются в базе данных системы и периодически используются для обучения системы. Большим недостатком моделей на нейронных сетях является потребность репрезентативных баз данных о производственном процессе и результатах его контроля. В этой связи целесообразно использовать достоинства детерминированных моделей и искусственных нейронных сетей, сведя к минимуму их недостатки путем построения гибридной интеллектуальной системы. Модели на нейронных сетях целесообразно использовать, когда структура взаимосвязей между параметрами объекта полностью неизвестна или изменяется во времени. Технические системы имеют четко организованную систему взаимосвязей между большинством параметров системы. Поэтому в основу интеллектуальной системы следует положить детерминированную модель процесса [20]. Так как в теоретическую модель невозможно включить все факторы, влияющие на качество продукции, то их целесообразно учитывать моделью на нейронной сети. Результаты, получаемые обработкой данных на детерминированной модели, в этом случае являются одними из важнейших входных параметров нейронной модели. Возможен также вариант системы, в которой нейронная модель определяет эмпирические коэффициенты, вводимые в детерминированную модель для повышения её точности. Использование в предлагаемой комбинированной интеллектуальной системе, как детерминированной модели, так и модели на основе искусственного интеллекта обеспечивает эффективную работу модуля принятия решений.

На рисунке 3 представлена структурная схема комбинированной

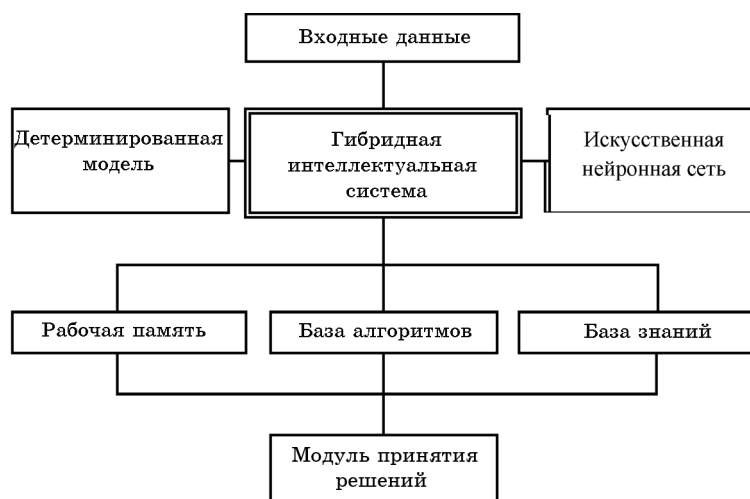


Рис. 3. Структурная схема комбинированной интеллектуальной системы.

интеллектуальной системы.

Рабочая память системы предназначена для обработки информации, поступающей от датчиков сварочной машины. База алгоритмов включает в себя алгоритмы предварительной обработки информации, определения функциональных зависимостей от измеряемых параметров, обеспечения полноты информации, установления порядка проведения математических операций и пр. База знаний содержит как априорную информацию о параметрах процесса сварки, требованиях к качеству сварных соединений, так и информацию, приобретенную на этапе обучения, а также полные и непротиворечивые знания, пополняемые в процессе функционирования системы.

Интеграция в единый комплекс имеющихся наработок по созданию интеллектуальной системы управления и контроля на основе интерпретации, адаптации и моделирования возможна и объективно необходима. Учитывая, что КССО можно рассматривать как термомеханический процесс, в который вовлечены взаимосвязанные электрическая (обеспечивающая нагрев зоны соединения джоулевым теплом) и механическая (обеспечивающая необходимую пластическую деформацию нагретого металла в зоне соединения) составляющие, то интеллектуальная система управления и контроля должна обеспечивать выбор оптимальных режимов обеих составляющих процесса сварки.

Техническая структура комбинированной интеллектуальной системы управления и контроля для КССО показана на рис. 4. Струк-

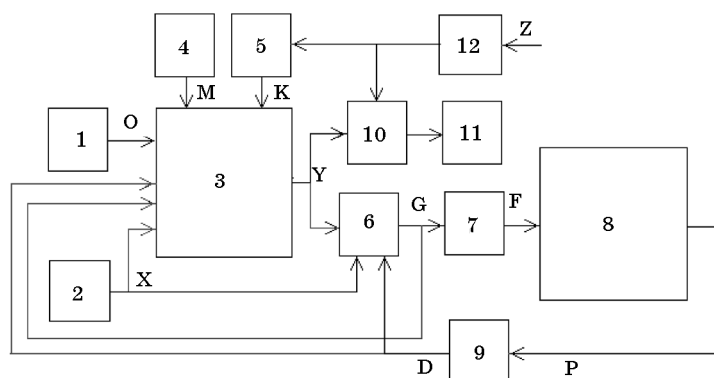


Рис. 4. Схема реализации КССО с элементами интеллектуальных технологий.

тура системы состоит из следующих информационных модулей: 1 — подсистемы ввода данных  $O$  об объекте сварки, учитывающие конструктивные характеристики свариваемого стыка и стали; 2 — подсистемы выбора параметров сварки  $X$ , определяющие функции изменения электрического напряжения, скорости оплавления и осадки; 3 — детерминированной модели КСО, вычисляющей в ходе сварки текущие значения распределения мощности тепловыделения, температур и деформации металла в стыке, а также критерии качества формирования соединения  $Y$ ; 4 — базы данных о теплофизических и термомеханических свойствах  $M$  свариваемой стали; 5 — базы эмпирических (калибровочных) коэффициентов  $K$ , обеспечивающих адекватность моделирования процесса при параметрах данной стыкосварочной машины; 6 — подсистемы оперативного анализа хода процесса и принятия решений об управляющем воздействии  $G$ , корректирующем параметры процесса в зависимости от текущих значений критериев качества шва  $Y$ ; 7 — блоков управления двигателем механизма перемещения при осадке и питающим напряжением; 8 — машины контактной сварки оплавлением; 9 — датчиков, сигналы  $D$  которых несут информацию о значениях сварочного тока, напряжения на стыке, скорости оплавления, усилия сжатия стыка; 10 — подсистемы финишного анализа качества формирования соединения, которая по результатам моделирования изменения температур и степени деформации металла, даёт прогноз механических свойств сварного соединения; 11 — подсистемы вывода результатов анализа; 12 — нейронная модель обработки данных  $Z$ , не учитываемых детерминированной моделью, уточняющая эмпирические коэффициенты и результаты детерминированной модели.

В режиме предварительного анализа производится выбор параметров сварки, при котором используется детерминированная модель процесса и виртуально воспроизводится процесс контактной



сварки оплавлением. Это позволяет до выполнения реальной сварки оценить качество формирования соединения при выбранном технологическом цикле сварки. В режиме непосредственного управления модель использует реальные значения параметров сварки, измеряемые датчиками. Результат моделирования даёт значения распределения температур и деформаций, близкие на данный момент к реальным текущим значениям в ходе сварки. На основе сравнения вычисленных значений температур и деформаций с соответствующими значениями заданного цикла сварки гибридная интеллектуальная система, в соответствии с принятой топологией (рис. 5), самостоятельно принимает решение о необходимых корректировках параметров сварки, либо передает их на органы управления и идентификации для подтверждения или корректировки их специалистами.

В процессе сварки датчики, установленные на сварочной машине, измеряют фактические параметры динамических составляющих протекания процесса сварки [21]. По завершении реального сварочного процесса блок финишного анализа качества формирования производит перерасчёт цикла сварки и делает прогноз механических свойств конкретного сварного соединения. Вся информация о процессе и предпринятых системой корректировочных действиях выводится на экран.

Предложенный подход обеспечит следующие дополнительные конкурентные преимущества КССО:

- удобное задание параметров режима сварочного процесса, отображаемых в виде таблиц и графиков на экране монитора компьютера;
- отображение на экране монитора состояния элементов оборудования в исходном положении, рабочего режима и нештатных ситуаций;
- пассивный или активный контроль параметров сварочного про-

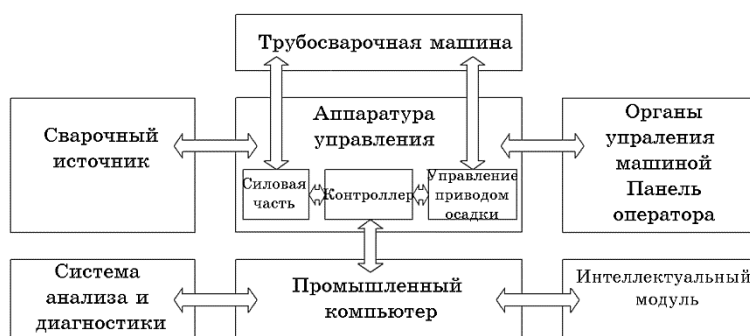


Рис. 5. Топология интеллектуальной системы управления КССО.

цесса;

– протоколирование результатов сварки каждого стыка.

Рассмотренные пути реализации интеллектуального управления и контроля качества сварных соединений будут использованы и в других типах оборудования КССО, например, при сварке рельсов, блюмсов и полос в металлургическом производстве и арматуры для изготовления железобетонных конструкций в строительстве. Практическая реализация предложенных подходов позволит создать эффективное инновационное средство управления оборудованием для контактной стыковой сварки, гарантированно обеспечивающее высокое и стабильное качество сварных соединений.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Развитие электронной вычислительной техники и методов компьютерного инженерного анализа позволяет существенно улучшить качество соединений и управление сварочными процессами, в том числе контактной стыковой сварки оплавлением, существенно снижая эмпирическую составляющую при оптимизации технологических режимов получения сварных соединений.
2. Проведенный анализ позволил синтезировать модифицированную топологию интеллектуальной системы управления процессами сварки и контроля, инвариантную по отношению к специфике функционирования.
3. В качестве основы интеллектуальной системы управления предложено использовать детерминированную модель высокоэффективного процесса контактной электросварки с оплавлением.
4. Обоснованы перспективные направления развития наиболее эффективных методов искусственного интеллекта для реализации управляющих воздействий при контактной стыковой сварке оплавлением.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Кучук-Яценко, *Контактная стыковая сварка с оплавлением* (Киев: Наукова думка: 1992).
2. С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов, В. Ф. Загадарчук и др., *Автоматическая сварка*, № 11: 23 (1984).
3. С. И. Кучук-Яценко, В. П. Радько, Б. И. Казымов и др., *Автоматическая сварка*, № 1: 39 (2007).
4. J. F. Sullivan and W. F. Savage, *Welding Journal*, 50, No. 5: 213 (1971).
5. Н. В. Подола, В. С. Гавриш, П. М. Руденко, *Автоматическая сварка*, № 7–8: 32 (1994).
6. Wang Rui, Sun Hexu, and Wang Hongwen, *J. Wuhan University Technol.*, No. 2: 1097 (2006).

7. Н. А. Коновалов, С. И. Журавлев, *Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа»* (Уфа: ГУП «ИПТЭ»: 2013), с. 204.
8. Е. М. Щевелев, А. Ф. Новицкий, Н. Н. Зуев и др., *Тяжелое машиностроение*, № 1: 18 (2007).
9. Lu Ning, Fu Yongling, Sun Xinxue, and Chen Zhanhui, *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, **33**, No. 8: 936 (2007).
10. А. Н. Белоусов, Л. А. Воскресенский, С. И. Полосков, *Сварочное производство*, № 5: 30 (1982).
11. Н. Н. Зуев, К. Н. Зуев, Е. М. Щевелев, А. М. Дзюба, *Компоненты и технологии*, № 9 (62): 188 (2006).
12. К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Гаврилов и др., *Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация* (Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова) (Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2007).
13. С. И. Журавлев, *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, № 8 (2013).
14. Э. А. Гладков, А. В. Малолетков, А. И. Гаврилов, Р. А. Перковский, *Сварка и диагностика*, № 3: 2 (2008).
15. Н. П. Алешин, Э. А. Гладков, А. И. Гаврилов и др., *Сварка и диагностика*, № 5: 48 (2011).
16. В. В. Кривин, *Автоматизация ограниченных детерминированных процессов* (Новочеркасск: Электротехника: 2003).
17. К. А. Пупков, В. Г. Коньков, *Интеллектуальные системы* (Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2003).
18. Б. Е. Патон, Н. В. Подола, В. С. Гавриш и др., *Автоматическая сварка*, № 12: 3 (1998).
19. W. Sha and K. L. Edwards, *Mater. Design*, **28**, No. 6: 1747 (2007).
20. С. И. Журавлев, Н. А. Коновалов, С. И. Полосков, *Сб. трудов XV международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (25–26 апреля 2013 г.)* (Санкт-Петербург: СПбГТУ: 2013), т. 2.
21. А. Е. Коротынский, Н. М. Махлин, С. И. Полосков, Г. Л. Павленко, *Сварочное производство*, № 3: 3 (2005).