

Технология и технологические машины

УДК 621.791: 004.89

Пути реализации интеллектуального управления и контроля качества сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением

Н.А. Коновалов

Контактная стыковая сварка оплавлением обеспечивает высокую производительность и стабильно высокое качество сварных соединений при строительстве магистральных трубопроводов за счет эффективных систем управления процессом сварки. Однако дальнейшее повышение эффективности процесса сварки может быть достигнуто только при сокращении объема контроля качества соединений. Данная проблема может быть решена путем создания интеллектуальных систем управления.

Проведенный анализ позволил синтезировать модифицированную архитектуру интеллектуальной системы управления процессом сварки и контроля эффективными методами искусственного интеллекта.

Результаты исследования с учетом современного уровня развития методов компьютерного инженерного анализа позволят существенно улучшить качество управления контактной стыковой сварки оплавлением.

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

Implementation of intelligent quality control of welded joints in flash-butt resistance welding

N.A. Kononov

Flash-butt resistance welding exhibits high efficiency and provides high-quality welded joints in pipelines due to the effective control of a welding process. However, the further improvement of welding efficiency can only be



КОНОВАЛОВ
Николай Алексеевич
(ЗАО «Псковэлектросвар»)

KONOVALOV
Nikolay Alekseevich
(Pskov, Russian Federation,
CJSC «Pskovelectrosvar»)

achieved by reducing the cost of quality control of joints. This problem can be solved by means of intelligent control techniques. In this study, a modified architecture of an intelligent control system was synthesized by efficient methods of artificial intelligence to manage and control a welding process. The results of research with due regard for the up-to-date methods of computer engineering analysis will significantly improve the quality control in flash-butt resistance welding.

Keywords: welding process model, intelligent control system, artificial intelligence, flash-butt resistance welding.

Сварочные технологии, применяемые при строительстве магистральных трубопроводов, являются основным технологическим процессом соединения труб. Главные задачи при строительстве магистральных трубопроводов с использованием сварочных технологий — более высокая производительность применяемых процессов сварки и качество сварных соединений. В этой связи при строительстве трубопроводов весьма перспективно использование контактной стыковой сварки оплавлением (КССО) — способа соединения стыков труб с местным нагревом и оплавлением стыкуемых торцов и последующей объемной пластической деформацией (осадкой). В условиях промышленного применения высокотехнологичное оборудование для КССО при минимальном участии персонала обеспечивает стабильно высокое качество сварных соединений [1]. Однако для обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений недостаточно только применять прогрессивную технологию сварки, необходимо также постоянно совершенствовать систему контроля за выполнением сварочных работ. Это обусловлено тем, что в соответствии с ISO 9001 сварка относится к «специальному процессу», результаты которого нельзя оценить путем испытаний и анализа качества готового изделия (конечной продукции). Поэтому гарантированная надежность и работоспособность сварных соединений может быть обеспечена только поэтапным контролем всех стадий выполнения сварочных работ. Тщательное отслеживание качества на всех этапах сварочных работ обеспечивает на только требуе-

мые свойства сварных соединений, но и оказывает дисциплинирующее воздействие на исполнителей всей технологической цепочки проведения работ.

В этой связи эффективность управления процессом КССО в значительной мере определяется наличием методов и технических средств обеспечения качества сварных соединений на всех стадиях процесса их изготовления (рис. 1). Поэтому при проведении сварочных работ особо острым становится вопрос технического контроля стадий технологического процесса КССО, а на завершающем этапе — непосредственно качества сварных соединений. Провести механические испытания сварных соединений, вырезанных непосредственно из строящегося трубопровода, можно только в случае достаточно веских оснований. При контроле качества соединений на контрольных или технологических образцах сложно обеспечить полную идентичность условий сборки образцов, режимов сварки как на строящемся трубопроводе. Используемые в настоящее время методы неразрушающего контроля, в силу тех или иных причин, не могут выявить специфические дефекты, которые присущи швам, выполненным КССО [2, 3]. Кроме того, данные методы позволяют регистрировать качество уже выполненных соединений, что исключает возможность обнаружения брака непосредственно в процессе сварки и своевременную корректировку режимов или настройку оборудования. В этой связи для КССО весьма перспективным является использование систем автоматизированного кон-



Рис. 1. Базовые операции процесса КССО

троля, которые в максимальной степени обеспечат уменьшение объема или даже исключение послеоперационного контроля. Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет решать подобные задачи.

Накопленный опыт эксплуатации оборудования для КССО показывает, что его дальнейшее совершенствование невозможно без разработки нового поколения систем автоматизированного технического контроля и управления. Одним из наиболее перспективных вариантов создания систем автоматизированного технического контроля сварных соединений является совмещение его операций с контролем текущих значений физических параметров процесса КССО. В отличие от послеоперационного контроля данный метод не требует дополнительного времени и, кроме того, расширяет возможности автоматического управления процессами сварки, так как позволяет не только обеспечивать воспроизводимость процесса сварки в обусловленных технологией границах, но и контролировать состояние сварочного оборудования [4]. При выходе контролируемых или регулируемых параметров за допустимые границы система управления должна вовремя проинформировать сварщика для предотвращения появления брака, либо самостоятельно скорректировать режимы, с предоставлением в последующем исчерпывающей информации для обслуживающего персонала. Таким образом, система управления должна не только управлять сварочной машиной, но и оценивать качество труда (технолога, наладчика, сварщика). Объединение в единое целое и согласование друг с другом компонентов управления и контроля обеспечивает стабильно высокое качество сварных соединений, экономию ресурсов и снижение к минимуму трудовых затрат.

В этой связи развитие программных средств и аппаратного обеспечения позволяет по-новому организовать интеграцию потоков информации в системе управления процессом КССО [5, 6]. Основные задачи [7], решаемые при этом системой управления процессом КССО, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Задачи интеграции потоков информации в системе управления процессом сварки

Система управления процессом КССО интегрирует 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), программном формировании перемещений при оплавлении (геометрическая задача), выполняет идентификацию состояния технологического оборудования (диагностическая задача), документирование процесса сварки стыков (архивная задача), координацию решения перечисленных выше задач (системная задача).

Существующие в настоящее время средства вычислительной техники, а также 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]. Однако скорость протекания подобных процессов обуславливает необходимость принятия мгновенных решений по целому ряду неформализованных задач в условиях неполноты информации и различных видов неопределенности за ограниченное время. Указанные решения до недавнего времени оставались прерогативой естественного интеллекта: сварщика-оператора, инженера-технолога, т. е. человека. 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 интеллектуаль-

ных интегрированных систем автоматизированного управления и технического контроля, которые могут самостоятельно оценить стабильность процесса непосредственно при сварке [13] и при необходимости корректировать параметры процесса сварки по датчикам обратных связей. Подобные системы — инновационное решение, основанное на естественном преобразовании информации о процессе сварки в необходимые управляющие воздействия, решения о конкретном выборе которых и последующая реализация осуществляется при полном исключении так называемого человеческого фактора. Подобные системы успешно применяются при автоматической дуговой орбитальной 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 — это объединенная информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающая как во взаимосвязи с человеком (коллективом людей), так и автономно, способная на основе сведений и знаний синтезировать цель, принимать решение к действию и находить рациональные способы достижения цели.

В настоящее время существуют три типа архитектурных решений построения интеллектуальных систем управления:

1) декомпозиционная архитектура, основывающаяся на принципе: «распознавание — моделирование — планирование — осуществление»;

2) реактивная (рефлексная) архитектура, основанная на стратегии целенаправленной реализации задачи за счет применения нейросетевых систем управления или систем, построенных на базе нечеткой логики;

3) гибридная архитектура, интегрирующая в себе декомпозиционную и реактивную (рефлексную) архитектуры.

Известно, что заданным требованиям по быстрой реакции удовлетворяют системы с гибридной архитектурой на базе искусственного интеллекта с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) [4, 18, 19]. Как показано в работе [19] хорошо обученная ИНС способна оперативно и 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 системы и периодически используются для обучения системы. Большим недостатком моделей на нейронных сетях является потребность репрезентативных баз данных о производственном процессе и результатах контроля. В этой связи целесообразно использовать достоинства детерминированных моделей и ИНС, сведение к минимуму их недостатков путем построения гибридной интеллектуальной системы. Модели на нейронных сетях целесообразно применять, 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]. Поскольку в теоретическую модель невозможно включить все факторы, влияющие на качество продукции, то факторы в полном объеме может учесть только модель на основе нейронной сети. Результаты, получаемые путем обработки данных на детерминированной модели, в этом случае являются одним из важнейших входных параметров нейронной модели. Возможен также вариант системы, в которой нейронная модель определяет эмпирические коэффициенты, вводимые в детерминированную модель для

повышения ее точности. Использование в предлагаемой комбинированной интеллектуальной системе, как детерминированной модели, так и модели на основе искусственного интеллекта, обеспечивает эффективную работу модуля принятия решений.

Структурная схема комбинированной интеллектуальной системы представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема комбинированной 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, порядок проведения математических операций и пр. База знаний содержит как априорную информацию о параметрах процесса сварки, требования 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. С учетом того, что КССО – это термомеханический процесс, состоящий из двух взаимосвязанных частей (электрической, обеспечивающей нагрев зоны соединения током и механической, обеспечивающей необходимую пластическую деформацию металла в зоне соединения), интеллектуальная система управления и контроля должна обеспечивать выбор оптимальных режимов обеих составляющих процесса сварки.

Архитектура комбинированной интеллектуальной системы управления и контроля КССО показана на рис. 4.

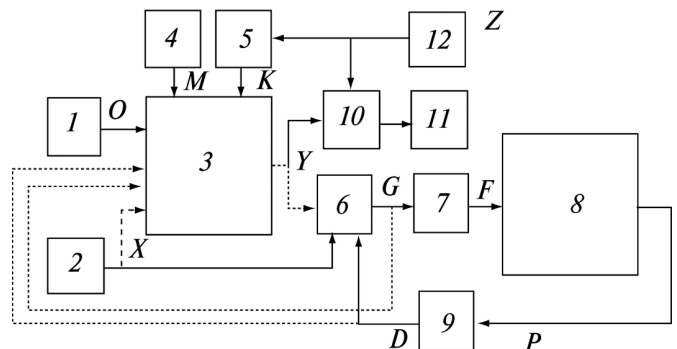


Рис. 4. Реализация КССО с элементами интеллектуальных технологий в двух режимах: - - - — предварительного анализа процесса; ... — непосредственного управления процессом

Структура 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 напряжения, скорости оплавления и осадки;

3 — детерминированной модели КССО, 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 о управляющем воздействии G , корректирующем параметры процесса в зависимости от текущего значения критериев качества шва Y ;

7 — блоков управления двигателем механизма перемещения (осадки) 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 дает прогноз механических свойств сварного соединения;

11 — подсистемы вывода результатов анализа;

12 — нейронной модели обработки данных Z , не учитываемых детерминированной моделью, уточняющей эмпирические коэффициенты и результаты детерминированной модели.

Предусмотрено два режима работы системы: режим предварительного анализа процесса (связи - - -) и режим непосредственного управления процессом (связи ····).

В режиме предварительного анализа выбираются параметры сварки. При этом используется детерминированная модель процесса и виртуально воспроизводится процесс контактной сварки оплавлением, что 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. Результатом моделирования являются значения распределения температур и деформаций, близкие на данный момент к реальным текущим значениям сварки. На основе сравнения вычисленных значений температур и деформаций с заданным циклом сварки гибридная интеллектуальная система, в соответствии с принятой топологией (рис. 5), самостоятельно принимает реше-

ние 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 перерасчет цикла сварки и создает прогноз механических свойств конкретного сварного соединения. Вся информация о процессе и предпринятых системой корректировочных действиях выводится на экран.

Предложенный подход обеспечит следующие 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, рабочем режиме, при сбоях и авариях;
- пассивный или активный контроль параметров сварочного процесса;
- протоколирование результатов сварки каждого стыка.

Несомненно, рассмотренные пути реализации интеллектуального управления и контроля качества сварных соединений будут использованы и в других типах оборудования КССО, например, сварки рельсов, или блюмсов и полос в металлургическом производстве. При этом практическая реализация предложенных подходов позволит создать эффективное инновационное средство управления оборудованием для контактной стыковой сварки, гарантированно обеспечивающее стабильное качество сварных соединений.

Выводы

1. Развитие электронной вычислительной техники и методов компьютерного инженерного анализа позволяет существенно улучшить качество управления сварочными процессами, в том числе КССО.

2. Проведенный анализ позволил синтезировать модифицированную архитектуру интеллектуальной системы управления процессами

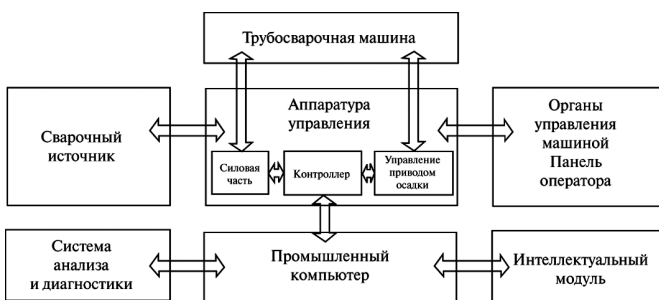


Рис. 5. Топология интеллектуальной системы управления КССО

сварки и контроля, инвариантную по отношению к специфике функционирования.

3. В качестве основы интеллектуальной системы управления предложено использовать детерминированную модель процесса сварки оплавлением.

4. Показаны направления перспективного развития наиболее эффективных методов искусственного интеллекта, применяемых для реализации управляющих воздействий при КССО.

Литература

1. Папков О.С., Хоменко В.И. Контактные установки для сварки газонефтепродуктопроводов. М.: Высш. шк., 1989. 240 с.
2. Образование «матовых пятен» в соединении, выполненном контактной сваркой / С.И. Кучук-Яценко, Б.И. Казымов, В.Ф. Загадарчук и др. // Автоматическая сварка. 1984. № 11. С. 23–26.
3. Особенности обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле соединений труб, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В.П. Радько, Б.И. Казымов и др. // Автоматическая сварка. 2007. № 1. С. 39–43.
4. Sullivan J.F., Savage W.F. Effect of phase control during flashing on flash weld defects // *Welding Journal*. 1971. Vol. 50. No. 5. P. 213–221.
5. Подола Н.В., Гавриш В.С., Руденко П.М. Компьютерная диагностика контактной сварки // Автоматическая сварка. 1994. № 7–8. С. 32–35.
6. Wang Rui, Sun Hexu, Wang Hongwen. Development of full automatic flash butt welding with digital control // *Journal of Wuhan University of Technology*. 2006. Issue 2. P. 1097–1101.
7. Коновалов Н.А., Журавлёв С.И. Аппаратное обеспечение процессов контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов // *Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа» / ГУП «ИПТЭ»*. Уфа, 2013. С. 204–206.
8. Создание автоматической программируемой системы управления для стыкосварочных машин четвертого поколения с функциями допускового контроля, диагностики и визуализации / Е.М. Шевелев, А.Ф. Новицкий, Н.Н. Зуев и др. // *Тяжелое машиностроение*. 2007. № 1. С. 18–21.
9. Method of eliminating synchronism control error in flash butt welding of bill / Lu Ning, Fu Yongling, Sun Xinxue, Chen Zhanhui et al. // *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2007. Vol. 33. No. 8. P. 936–939.
10. Белоусов А.Н., Воскресенский Л.А., Полосков С.И. О системе технической диагностики сварочных автоматов // *Сварочное производство*. 1982. № 5. С. 30–32.
11. Зуев Н.Н., Зуев К.Н., Шевелев Е.М., Дзюба А.М. Автоматические программируемые системы управления электро-сварочным оборудованием с функциями допускового контроля, диагностики и визуализации // *Компоненты и технологии*. 2006. № 9 (62). С. 188–192.
12. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Гаврилов и др. / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 632 с.
13. Kim G-H., Kang S-I. Estimation of weld bead shape and the compensation of welding parameters using a hybrid intelligent

system // *Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*. 2005. Vol. 9. Issue 6. P. 1379–1386.

14. Гладков Э.А., Малолетков А.В., Гаврилов А.И., Перковский Р.А. Методические аспекты применения нейросетевых моделей для прогнозирования качества сварки плавлением // *Сварка и Диагностика*. 2008. № 3. С. 2–7.

15. Реализация адаптивных технологий сварки кольцевых стыков магистральных трубопроводов / Н.П. Алешин, Э.А. Гладков, А.И. Гаврилов и др. // *Сварка и Диагностика*. 2011. № 5. С. 48–54.

16. Кривин В.В. Автоматизация ограниченных детерминированных процессов. Новочеркасск: Электротехника, 2003. 76 с.

17. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 348 с.

18. Оценка качества контактной сварки с помощью нейронных сетей / Б.Е. Патон, Н.В. Подола, В.С. Гавриш и др. // *Автоматическая сварка*. 1998. № 12. С. 3–10.

19. Sha W., Edwards K.L. The use of artificial neural networks in materials science based research // *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. Issue 6. P. 1747–1752.

20. Журавлёв С.И., Коновалов Н.А., Полосков С.И. Концепция физико-математической модели процесса контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов // *Сб. трудов XV международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике»*. СПбГТУ. СПб., 2013. Т. 2. С. 175–178.

21. Коротынский А.Е., Махлин Н.М., Полосков С.И., Павленко Г.Л. Сравнение методов оценки тепловой мощности процесса дуговой сварки // *Сварочное производство*. 2005. № 3. С. 3–6.

References

1. Papkov O.S., Khomenko V.I. *Kontaktnye ustanovki dlia svarki gazonefteproduktoprovodov*. [Contact-arc oil and gas pipelines]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1989. 240 p.
2. Kuchuk-Iatsenko S.I., Kazymov B.I., Zagadarchuk V.F. *Obrazovanie «matovykh piaten» v soedinenii, vypolnennom kontaktnoi svarkoi* [Education «opaque spots» in the compound, the contact welding]. *Avtomaticheskaja svarka* [The Paton Welding Journal]. 1984, no. 11, pp. 23–26.
3. Kuchuk-Iatsenko S.I., Rad'ko V.P., Kazymov B.I. *Osobennosti obnaruzheniia defektov pri ul'trazvukovom kontrole soedinenii trub, vypolnennykh kontaktnoi stykovoi svarkoi oplavleniem* [Features of defects in ultrasonic testing of pipe joints made by butt fusion welding]. *Avtomaticheskaja svarka* [The Paton Welding Journal]. 2007, no. 1, pp. 39–43.
4. Sullivan J.F., Savage W.F. Effect of phase control during flashing on flash weld defects. *Welding Journal*. 1971, vol. 50, no. 5, pp. 213–221.
5. Podola N.V., Gavrish B.C., Rudenko P.M. *Komp'uternaia diagnostika kontaktnoi svarki* [Computer diagnostics of welding]. *Avtomaticheskaja svarka* [The Paton Welding Journal]. 1994, no. 7–8, pp. 32–35.
6. Wang Rui, Sun Hexu, Wang Hongwen. Development of full automatic flash butt welding with digital control. *Journal of Wuhan University of Technology*. 2006, issue 2, pp. 1097–1101.
7. Konovalov N.A., Zhuravlev S.I. *Apparatnoe obespechenie protsessov kontaktnoi stykovoi svarki oplavleniem truboprovodov* [Hardware processes butt fusion welding of pipelines]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i metody obespecheniia nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefteproduktov i gaza»* [International scientific and practical conference «Problems and methods to ensure reliability and safety of transport of oil and gas»]. GUP «IPTE» publ., Ufa, 2013, pp. 204–206.

8. Shchevelev E.M., Novitskii A.F., Zuev N.N., Gol'del'man A.L., Semenov I.L. Sozdanie avtomaticheskoi programmiruemoi sistemy upravleniia dlia stykosvarochnykh mashin chetvertogo pokoleniia s funktsiiami dopuskovogo kontroliia, diagnostiki i vizualizatsii [Create a self-programmable control system for butt-welding machines with features of the fourth generation of tolerance control, diagnostics and imaging]. *Tiazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2007, no. 1, pp. 18–21.
9. Lu Ning, Fu Yongling, Sun Xinxue, Chen Zhanhui et al. Method of eliminating synchronism control error in flash butt welding of bill. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2007, vol. 33, no. 8, pp. 936–939.
10. Belousov A.N., Voskresenskii L.A., Poloskov S.I. O sisteme tekhnicheskoi diagnostiki svarochnykh avtomatov [A system of technical diagnostics of welding machines]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 1982, no. 5, pp. 30–32.
11. Zuev N.N., Zuev K.N., Shchevelev E.M., Dziuba A.M. Avtomaticheskie programmiruemye sistemy upravleniia elektrosvarochnym oborudovaniem s funktsiiami dopuskovogo kontroliia, diagnostiki i vizualizatsii [Automatic programmable control systems with welding equipment features, the qualification of control, diagnostics and visualization]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies]. 2006, no. 9 (62), pp. 188–192.
12. Pupkov K.A., Egupov N.D., Gavrilov A.I. *Nestatsionarnye sistemy avtomaticheskogo upravleniia: analiz, sintez i optimizatsiia* [Time-dependent automatic control systems: analysis, synthesis and optimization]. Moscow, Bauman Press, 2007. 632 p.
13. Kim G-H., Kang S-I. Estimation of weld bead shape and the compensation of welding parameters using a hybrid intelligent system. *Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*. 2005, vol. 9, issue 6, pp. 1379–1386.
14. Gladkov E.A., Maloletkov A.V., Gavrilov A.I., Perkovskii R.A. Metodicheskie aspekty primeneniia neirosetevykh modelei dlia prognozirovaniia kachestva svarki plavlaniem [Methodological aspects of the use of neural network models to predict the quality of fusion welding]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2008, no. 3, pp. 2–7.
15. Alyeshin N.P., Gladkov E.A., Gavrilov A.I., Perkovskii R.A., Rahmatullin T.A. Realizatsiia adaptivnykh tekhnologii svarki kol'tsevykh stykov magistral'nykh truboprovodov [Realization of adoptive pipe-lines circular joints welding technology]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2011, no. 5, pp. 48–54.
16. Krivin V.V. *Avtomatizatsiia ogranichennykh determinirovannykh protsessov* [Automation limited deterministic processes]. Novocherkassk, Elektrotehnika publ., 2003. 76 p.
17. Pupkov K.A., Kon'kov V.G. *Intellektual'nye sistemy* [Intelligent Systems]. Moscow, Bauman Press., 2003. 348 p.
18. Paton B.E., Podola N.V., Gavrish V.S. Otsenka kachestva kontaktnoi svarki s pomoshch'iu neironnykh setei [Assessment of quality of welding using neural networks]. *Avtomaticheskaiia svarka* [The Paton Welding Journal]. 1998, no. 12, pp. 3–10.
19. Sha W., Edwards K.L. The use of artificial neural networks in materials science based research. *Materials and Design*. 2007, vol. 28, issue 6, pp. 1747–1752.
20. Zhuravlev S.I., Konovalov N.A., Poloskov S.I. *Kontseptsiiia fiziko-matematicheskoi modeli protsessa kontaktnoi stykovoii svarki oplavlaniem truboprovodov* [Concept of physical and mathematical models of contact flash-butt welding process of pipelines]. *Sbornik trudov 15-th mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye issledovaniia, razrabotka i primenenie vysokikh tekhnologii v promyshlennosti i ekonomike»* [Proceedings of the 15-th International Scientific-Practical Conference «Fundamental and applied research, development and application of high technology in the industry and the economy»]. SPbGTU publ., Saint Petersburg, 2013, vol. 2, pp. 175–178.
21. Korotynskii A.E., Makhlin N.M., Poloskov S.I., Pavlenko G.L. Sravnenie metodov otsenki teplovoi moshchnosti protsessa dugovoi svarki [Comparison of methods for assessment of thermal power arc welding process]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 2005, no. 3, pp. 3–6.

Статья поступила в редакцию 22.05.2013

Информация об авторе

КОНОВАЛОВ Николай Алексеевич (Псков) — Советник генерального директора ЗАО «Псковэлектросвар» (180022, Псков, Российская Федерация, ул. Новаторов, д. 3, e-mail: konovalov@tmet.ru).

Information about the author

KONOVALOV Nikolay Alekseevich (Pskov) — Advisor to General Director of CJSC «Pskovelectrosvar» (Novatorov str., 3, 180022, Pskov, Russian Federation, e-mail: konovalov@tmet.ru).