

УДК 620.179:620.19:621.791.763

Прогнозирование качества сварных соединений по данным мониторинга процесса контактной стыковой сварки оплавлением

Н.А. Коновалов, В.А. Ерофеев, С.И. Полосков

Контактная стыковая сварка оплавлением — высокопроизводительный процесс сварки стыков трубопроводов большого сечения. Проблемой использования этого способа является низкая достоверность отбраковки сварных швов по данным мониторинга, фиксирующего фактические значения параметров при выполнении сварки, что не всегда определяет качество сварки. Для повышения достоверности отбраковки предложено оценивать качество сварки путем параллельного компьютерного моделирования процесса сварки. Исходными данными при параллельном моделировании являются параметры, непосредственно измеряемые в ходе сварки. Модель процесса сварки учитывает свойства свариваемого сплава, геометрию стыка и характеристики машины. При этом модель отображает физические явления формирования шва, а к моменту завершения сварки — показатели качества шва. Модель представляет собой программу, вводимую в управляющий компьютер сварочной машины, и реализуется интеллектуальной системой управления. Точность прогноза качества определяется точностью данных о свойствах свариваемого материала.

Данный подход позволяет существенно повысить достоверность оценки качества продукции сварных соединений по результатам мониторинга параметров процесса сварки.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, качество, модель процесса сварки, мониторинг, интеллектуальная система управления, сварное соединение.

Predicting the quality of weld joints by monitoring the process of contact flash-butt welding

N.A. Konovalov, V.A. Erofeev, S.I. Poloskov

Contact butt welding is a high-performance welding process intended for joining large-diameter pipelines. The main drawback of this method is that welding quality is difficult to estimate properly; therefore, the rejection of weld joints is not reliable. To improve the reliability of rejection, it is proposed to estimate the quality of weld joints by means of parallel computer simulation of the welding process. The parameters that can be measured directly during welding represent input data for the parallel computer simulation. The model takes into account the properties of welded alloys, the geometry of joints, and the characteristics of the machine. At the same time, it describes physical phenomena of the weld for-



КОНОВАЛОВ
Николай Алексеевич
(ЗАО «Псковэлектросвар»)

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



ЕРОФЕЕВ
Владимир Александрович
(Тулский государственный университет)

EROFEEV
Vladimir Aleksandrovich
(Tula, Russian Federation,
Tula State University)



ПОЛОСКОВ
Сергей Иосифович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

POLOSKOV
Sergey Iosifovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

tion and yields the weld quality by the end of welding. The model is software to be installed on the control computer of a welding machine. It is implemented by an intelligent control system. The quality prediction accuracy depends on the accuracy of welded material properties. This approach makes it possible to significantly improve the reliability of estimating the quality of weld joints from the results of monitoring of welding process parameters.

Keywords: contact butt welding, quality, model of welding process, monitoring, intelligent control system, weld joint.

Контактная стыковая сварка оплавлением (КССО) — высокопроизводительный процесс, который целесообразно использовать при сварке стыков большого сечения объектов ответственного назначения [1]. Характерными примерами таких объектов являются рельсовые пути железных дорог, магистральные газо- и нефтепроводы и др. Стабильно высокое качество сварных соединений, получаемых КССО, обеспечивается нагревом и созданием требуемого температурного поля в свариваемом стыке и последующим формированием сварного соединения пластической деформацией нагретых торцов во время осадки. С учетом необходимости практически одновременного обеспечения данных процессов оборудование для реализации процессов КССО объединяют в единый комплекс, главными составными частями которого являются: сварочная машина с центратором или фиксатором свариваемых стыков, аппаратура управления и устройства осадки (силового воздействия); агрегат для зачистки контактных поверхностей; гартосниматель (наружный или внутренний); оборудование для термической обработки сварного соединения. В «полевых» условиях, как правило, используются передвижные электростанции.



Рис. 1. Основные элементы структуры комплекса КССО

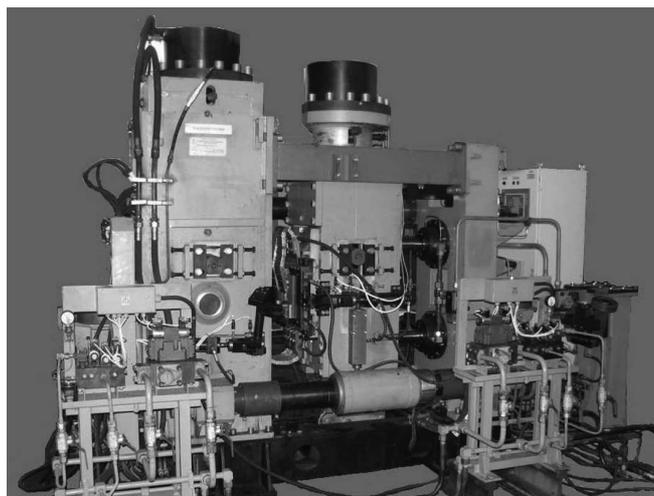


Рис. 2. Стационарная рельсосварочная машина для КССО

Основные элементы структуры комплекса КССО показаны на рис. 1.

Стационарная рельсосварочная машина для КССО изображена на рис. 2, мобильная машина для КССО стыков труб магистральных трубопроводов в «полевых» условиях — на рис. 3.



Рис. 3. Мобильная машина для КССО магистральных трубопроводов

КССО — единственный метод сварки неповоротных стыков, в полной мере отвечающий требованиям автоматизации всего процесса, так как от начала до конца выполняется в автоматическом режиме без участия сварщика-оператора, роль которого сводится к подготовке и настройке сварочной машины к работе. Но даже автоматизация процесса сварки не исключает вероятность возникновения дефектов сварных соединений. Однако, если большинство проблем КССО стыков рельс к настоящему времени успешно решены, то сварке трубопроводов больших диаметров пока присущ целый ряд проблем, обусловленных как условиями выполнения сварочных работ, так и особенностями процесса [2]. Основными проблемами являются: большая площадь контактных поверхностей, массогабаритные размеры сварочных машин и вспомогательного оборудования, необходимость использования при сварке в «по-

левых» условиях передвижных электростанций мощностью более 1 000 кВт. Поскольку такие электростанции имеют значительные габаритные размеры и массу, в «полевых» условиях применяют источники с заниженными энергетическими возможностями, а саму сварку выполняют на нижнем пределе физической реализуемости процесса, что не может не сказываться на качестве сварки. При неинтенсивном нагреве и, как следствие, неэффективном оплавлении на торцах свариваемых труб могут остаться участки с нерасплавившемся или закристаллизовавшимся еще до стадии осадки окисленным металлом. Поэтому из-за неоптимального термического цикла сварки в стыке возникают специфические дефекты типа «матовых пятен» (оксидных пленок) и несплошностей, а зачастую наблюдается снижение ударной вязкости на локальном участке в центре шва, либо в зоне термического влияния (ЗТВ).

Характерные дефекты сварных соединений представлены на рис. 4.

Помимо неоптимального термического цикла сварки на образование несплошностей влияет и недостаточная осадка в продольном направлении. В частности, несплавления из-за различных по толщине и по площади оксидных пленок появляются в зоне соединения при грубом нарушении процесса оплавления до осадки, либо неэффективного выдавливания окисленного металла из стыка при осадке. В зависимости от условий появления их влияние на механические свойства соединения может отличаться. Кроме того, из-за специфики выполнения работ в «полевых» условиях трудно обеспечить качественную подготовку сборки сты-

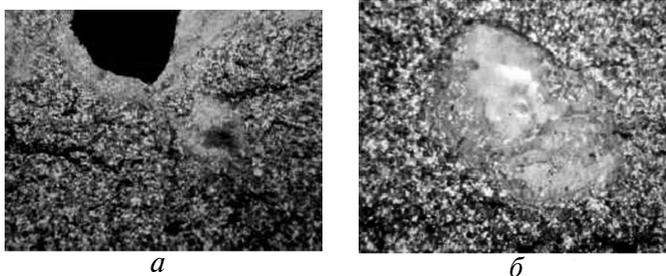


Рис. 4. Дефекты в зоне соединения на поверхности изломов, выполненных с отклонением от оптимального режима сварки:

a — несплошность; *б* — оксидная пленка

ков. Поэтому при сближении кромок может возникать их недопустимое смещение, и, как следствие образование сварного соединения с заниженной толщиной стенок и концентраторами напряжений в зоне перехода от основного металла к шву (рис. 5) даже поле удаления грата. Перечисленные дефекты снижают прочность сварных соединений.

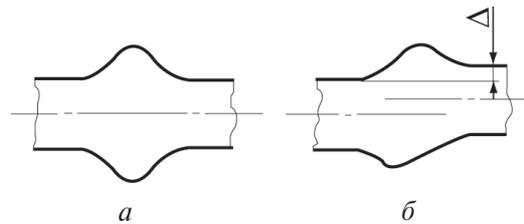


Рис. 5. Формирование шва при КССО:

a — без смещения; *б* — со смещением

На воспроизводимость качества сварных соединений влияет также и надежность оборудования. Основными причинами возникновения дефектов сварных соединений, обусловленных отказами сварочного оборудования, являются ошибки, допущенные при конструировании, брак при изготовлении, естественные процессы износа и старения материалов.

Провести механические испытания сварных соединений, вырезанных непосредственно из строящегося трубопровода, можно только в случае достаточно веских оснований, тогда как при контроле качества соединений на контрольных или технологических образцах сложно обеспечить полную идентичность условий сборки образцов, режимов сварки как на строящемся трубопроводе. Трудоемкость радиографического и ультразвукового методов контроля превышают трудоемкость КССО, что ограничивает их использование. Случайный отбор стыков для выборочного контроля также не гарантирует отсутствие дефектов в остальных стыках.

Стандартом ISO-9001 сварка определена, как специальный процесс, результаты которого не могут быть полностью проверены последующим осмотром и испытанием изделия, поэтому необходим непрерывный контроль параметров процесса. Рекомендовано использовать систему регистрации и хранения параметров процесса, в первую очередь энергетических, и хранить информацию в форме, доступной для

компьютерной обработки [3]. Поэтому методической основой современных методов контроля качества сварных соединений являются задачи статистического анализа точности [4], решаемые системами компьютерного мониторинга, при котором осуществляется измерение и запись значений параметров технологического процесса при производстве каждого изделия. Качество сварки оценивают по отклонению этих параметров от нормативного значения в каждый момент времени процесса.

Для отбраковки по данным мониторинга определяют ряд показателей, косвенно указывающих на возможность формирования дефектного соединения. Результаты мониторинга обрабатываются специальными программами, например, программой Pro Weld Data [5], используемой в установках Kemppi Pro и Kemppi Pro Evolution для дуговой сварки плавящимся электродом. Подобные программы позволяют сортировать данные по разным параметрам и оценивать формирование отдельных швов, что открывает новые перспективы для контроля качества сварочных процессов.

Используются похожие программы и для обработки результатов КССО [6]. Для этого машины КССО оснащаются компьютерными системами управления, которые не только контролируют технологические параметры сварки, но и предоставляют оператору информацию о ходе процесса, документируют и сохраняют информацию о сварке каждого стыка [7]. Мониторинг производится непрерывным измерением и фиксированием значений наиболее значимых параметров процесса. Традиционно при КССО контролируют и фиксируют мгновенные значения сварочного тока и напряжения, скорость оплавления, давление в гидравлической системе механизма перемещения сварочной машины (рис. 6).

Однако подобный анализ отдельных параметров процесса позволяет осуществлять только косвенную оценку качества сварных соединений. Это обусловлено тем, что отбраковка по выходу отдельных параметров за допустимые диапазоны не всегда эффективна, так как дефекты возникают вследствие комбинации случайных отклонений множества параметров

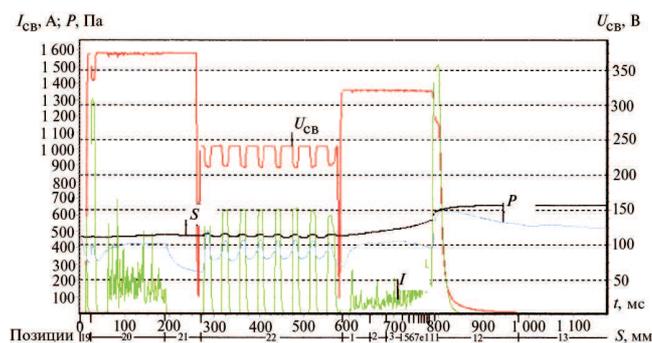


Рис. 6. Результат мониторинга основных параметров процесса КССО

процесса. При этом отдельные отклонения могут частично компенсировать друг друга, значительные, но короткие по времени могут вызвать меньшее изменение свойств изделия, чем небольшие, но длительные отклонения. Влияние отклонений неодинаково на разных стадиях процесса.

В этой связи существует проблема повышения достоверности выявления дефектных стыков, так как отбраковка по отклонению значений параметров за допустимый уровень не всегда достоверно свидетельствует о наличии или отсутствии дефектов. Поэтому целесообразно использовать не сами отклонения, а их количественные характеристики [8], приведенные на рис. 7:

- *мгновенные аномально большие отклонения.*

На рис. 6 видны кратковременные броски тока, вызванные короткими замыканиями. Можно принять, что мгновенные отклонения отдельных параметров, превышающие 50% заданного уровня, могут вызвать появление дефектов в шве. Если такие отклонения не единичны, то вероятность появления дефектов нарастает пропорционально сумме длительностей указанных отклонений и может оцениваться по временному критерию τ , определяемому соотношением

$$\tau = \int_0^t dt \text{ при } |x(t) - x_0| > \Delta x, \quad (1)$$

где $x(t)$ — результат мониторинга параметра x ; x_0 — заданное значение параметра x ; Δx — допуск на значение параметра x , соответствующий порогу появления дефекта;

Результат анализа данных мониторинга процесса КССО

Параметр	Значение			Результат
	Минимальное допустимое	Истинное	Максимальное допустимое	
Напряжение $U_{1св}$, В	380,0	387,3	440,0	—
Давление осадки, бар	200,0	250,64	260,0	В допуске
Длительность 1-го этапа оплавления, с	45,0	53,88	65,0	—
Скорость на 1-м этапе оплавления, мм/с	0,14	0,14	0,16	—
Длительность 2-го этапа оплавления, с	120,0	140,05	160,0	—
Скорость на 2-м этапе оплавления, мм/с	0,18	0,18	0,2	—
Длительность 3-го этапа оплавления, с	5,0	8,52	15,0	—
Скорость на 3-м этапе оплавления, мм/с	0,22	0,23	0,25	—
Длительность форсировки, с	5,0	8,52	15,0	В допуске
Наличие короткого замыкания $t > 0,3$ с	—	Нет	—	—
Длительность контакта, с	1,0	2,0	2,2	—
Скорость $V_{кон}$, мм/с	1,0	0,9	1,5	Не в допуске
Время осадки под током, с	0,5	0,92	1,5	В допуске
Величина осадки, мм	11,0	11,94	20,0	—
Средняя скорость осадки на первых 5 мм, мм/с	40,0	54,25	90,0	—
Проскальзывание на осадке	—	Нет	—	—

• *среднее значение отклонения параметров от заданного значения* за весь период сварки

$$s_0 = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - x_0) dt. \quad (2)$$

Здесь T — длительность сварки изделия.

Даже небольшие значения среднего отклонения параметра процесса могут вызвать появление дефектного соединения;

• *среднеквадратичное отклонение параметров от заданного значения*

$$s = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T (x(t) - x_0)^2 dt}. \quad (3)$$

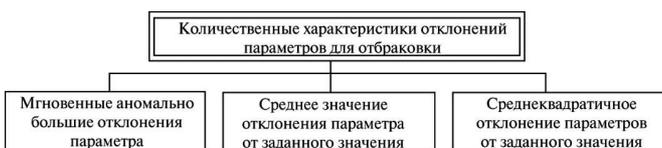


Рис. 7. Количественные характеристики отклонений параметров для отбраковки

Поскольку среднеквадратичное отклонение характеризует стабильность параметра, то вероятность возникновения дефектов больше при сварке стыка с нестабильными параметрами процесса.

Очевидно, что система оценки качества по отклонению параметров процесса не может иметь высокую достоверность, поскольку большинство стандартов, например, DNV-OS-F101. Offshore standard. Submarine pipeline systems, требуют обеспечить не параметры сварки, а заданные механические свойства сварных соединений. Поэтому необходимо связать параметры с механическими свойствами металла шва и ЗТВ. Известны статистические модели, связывающие механические свойства сталей с их химическим составом и термическим циклом сварки [9, 10]. Это позволяет связать контролируемые параметры с механическими свойствами металла шва. Однако проблемой является то, что параметры сварки оказывают различное влияние на качество сварки. Поскольку номинальные значения параметров разнятся, то

удобно использовать относительные значения их отклонений:

$$\varepsilon_0 = s_0 / x_0; \quad \varepsilon = s / x_0. \quad (4)$$

Обобщенный критерий по недопустимым отклонениям имеет вид

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (5)$$

где i — номер параметра; n — количество учитываемых параметров.

Обобщенный критерий отбраковки по средним относительным значениям отклонений описывается выражением

$$E_0 = \sum_{i=1}^n k_i \varepsilon_{0,i}. \quad (6)$$

Здесь k_i — коэффициент влияния i -го параметра на качество шва.

Обобщенный критерий по среднеквадратичным значениям отклонений имеет вид

$$E^2 = \sum_{i=1}^n (k_i \varepsilon_{0,i})^2. \quad (7)$$

Проблемой является определение коэффициентов влияния k_i параметров на качество сварки. Так как случайные отклонения обычно невелики, а зависимость показателя качества Y от параметра x_i допустимо полагать линейной, то эти коэффициенты можно определить для конкретного процесса по результатам двух натуральных опытов:

$$k_i = \frac{Y_2 - Y_1}{x_{i,2} - x_{i,1}} \frac{x_{i,2} + x_{i,1}}{Y_2 + Y_1}. \quad (8)$$

Однако выполнение предварительных экспериментальных исследований для каждого варианта сварки затрудняет создание системы контроля, встраиваемой в сварочное оборудование. Поэтому необходим детерминированный подход к построению системы, основанной на физико-математическом моделировании процесса. Так, для расчета термического цикла сварки достаточно решить уравнение теплопроводности для свариваемой конструкции с источником теплоты, параметры которого определяются путем измерения мощности, по-

требляемой сварочной машиной [11]. Более точный расчет дает компьютерное моделирование всех существенных явлений при КССО. Исходными данными для детерминированной модели являются сведения о геометрии свариваемого стыка, свойствах свариваемой стали, характеристики сварочной машины, а также сигналы датчиков, используемых при мониторинге процесса. В результате моделирования определяются распределение температур, деформаций и скорости охлаждения металла, что позволяет рассчитать структуру и механические свойства сварного соединения.

Использование методов экспертных оценок при анализе факторов, определяющих качество сварных соединений в процессе КССО, позволило определить, что интегральным путем улучшения методов и средств управления и контроля процесса КССО является повышение достоверности отбраковки сварных швов по данным мониторинга с одновременным совершенствованием сварочного оборудования и технологий. В этой связи одним из наиболее перспективных вариантов создания систем автоматизированного технического контроля является совмещение его операций с управлением текущих значений параметров процесса в интеллектуальной системе управления (ИСУ) [12].

Такая система должна обеспечить решение следующих задач:

- принятие решений, соответствующих реальным ситуациям процесса;
- прогнозирование качества сварных соединений непосредственно в процессе сварки;
- обеспечение адаптивности алгоритмов управления в ситуациях, когда имеющейся информации недостаточно для принятия решений;
- создание условий самообучения ИСУ для совершенствования ее работы.

Для этого ИСУ должна самостоятельно определять количественные характеристики отклонений параметров для отбраковки по ГОСТ Р 50779.70—99 (ИСО 2859.0—95). Сама же ИСУ процессом КССО должна разрабатываться в соответствии с ГОСТ 24.104—85 «Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования» и ГОСТ

34.003—90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения», а ее эффективность должна оцениваться как по показателям надежности самой системы, так и эффективности получаемого результата — сварного соединения. В этой связи в ИСУ должно быть предусмотрено два режима работы — предварительного анализа и непосредственного управления. Это требует разработки специального программного обеспечения.

В режиме предварительного анализа до выполнения реальной сварки оценивается качество формирования соединения при выбранном

технологическом цикле сварки и производится выбор оптимальных параметров сварки. Для этого применяется детерминированная модель процесса и виртуально воспроизводится процесс КССО. В режиме непосредственного управления модель использует реальные значения параметров сварки, измеряемые датчиками. На основе сравнения вычисленных значений температур и деформаций с заданным циклом сварки система самостоятельно принимает решение о необходимых корректировках параметров сварки, либо передает их на органы управления и идентификации для подтверждения или корректировки их специалистами.

Алгоритм программы ИСУ КССО для выполнения предварительного прогноза и для обработки данных мониторинга КССО:

Ввод данных о размерах стыка и марки стали
Ввод программы выполнения сварки

Чтение из базы данных о химическом составе и теплофизических свойствах свариваемой стали

Определение шага сетки, определение строения пространства и шага времени моделирования

Решаемая задача Предварительный прогноз

Обработка данных мониторинга

Цикл времени оплавления

Изменение скорости оплавления в соответствии с заданной программой

Опрос данных датчиков тока и напряжения сварочной машины и перемещения стыка

Решение уравнений электрических параметров процесса и теоретический расчет мощности тепловыделения в стыке

Определение фактической мощности тепловыделения в стыке

Расчет геометрии стыка по программе изменения скорости оплавления

Расчет геометрии стыка по данным датчика перемещения стыка при оплавлении

Решение уравнения теплопроводности для зоны формирования соединения и определение распределения температуры металла

Определение теплофизических свойств металла

Расчет текущих значений критериев качества оплавления

пока не исчерпана программа изменения параметров процесса оплавления

Цикл времени осадки

Решение уравнений напряженного состояния и пластической деформации металла при осадке стыка в соответствии с заданной программой

Расчет пластических деформаций по значениям датчика перемещений и определение напряженного состояния

Оценка вероятности возникновения дефектов стыка

пока не закончена программа изменения параметров при осадке

Цикл времени охлаждения

Решение уравнения теплопроводности и определение термического цикла охлаждения металла

Расчет структуры и механических свойств металла по химическому составу стали и термическому циклу сварки

пока стык не охладится до температур завершения полиморфных превращений

Формирование протоколов предварительного прогноза или мониторинга

Техническая реализация предлагаемой системы мониторинга и контроля процесса сварки сводится к дополнительной разработке специального программного обеспечения для промышленного компьютера, входящего в аппаратуру управления современными машинами КССО, и оснащения машины системой датчиков обратных связей.

Рассмотренная система мониторинга, контроля и управления машиной контактной стыковой сварки оплавлением обеспечит гарантированное прогнозирование качества сварных соединений еще до завершения процесса сварки.

Выводы

1. Проблемой контроля качества контактной стыковой сварки оплавлением является низкая достоверность отбраковки сварных швов по отклонению параметров от нормы, вследствие неоднозначной связи результатов мониторинга с качеством сварки.

2. Для повышения достоверности отбраковки следует оценивать качество сварки путем параллельного компьютерного моделирования процесса в ходе выполнения сварки по текущим данным мониторинга.

3. Техническая реализация системы мониторинга и контроля процесса сварки сводится к дополнительной разработке специального программного обеспечения для промышленного компьютера, входящего в аппаратуру управления и оснащения машины КССО системой датчиков обратных связей.

Литература

[1] Кучук-Яценко С.И., Мосендз И.Н., Казымов Б.И. Программирование режимов контактной сварки оплавлением деталей с большими развитыми сечениями. *Автоматическая сварка*, 1987, № 6, с. 14–18.

[2] Журавлев С.И., Коновалов Н.А., Полосков С.И. Технологические особенности контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов больших диаметров. *Сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Современные проблемы машиностроения*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2013, с. 180–185.

[3] Berglund S., Strand U. Quality assurance in automatic welding. *Svetsaren*, 2000, no. 1, pp. 29–32.

[4] Scotti A., Ponomarev V. *Soldagem MIG/MAG: melhor en-tendimento, melhor desempenho*. SanPaulo: Artliber Editora, 2008. 284 p.

[5] ООО «Сибирь-технология-сервис». URL: <http://www.zao-ctc.ru/kemppi-monitoring.html> (Дата обращения 14 августа 2013).

[6] Шевелев Е.М., Новицкий А.Ф., Зуев Н.Н., Гольдельман А.Л., Семенов И.Л. Системы управления для стыковочных машин четвертого поколения с функциями допускового контроля, диагностики и визуализации. *Тяжелое машиностроение*, 2007, № 1, с. 18–21.

[7] Lv Q., Tan K., Dai X., Zhang X. Research on application of high-speed data acquisition system for AC rail flash-butt welding. *Applied Mechanic and Materials*, 2013, vol. 239–240, pp. 884–888.

[8] Колесников М.В., Ерофеев В.А. Методика выборки для контроля качества наплавки медных поясков на стальные корпуса. *Сварка и Диагностика*, 2011, № 1, с. 50–53.

[9] Касаткин О.Г., Зайффарт П. Влияние химического и фазового состава зоны термического влияния на ее механические свойства при дуговой сварке низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, 1984, № 2, с. 5–10.

[10] Зайффарт П., Касаткин О.Г. Расчетные модели для оценки вязкости разрушения низко- и среднелегированного металла шва в зависимости от его состава и структуры. *Сварочное производство*, 1995, № 6, с. 10–12.

[11] Журавлев С.И., Коновалов Н.А., Полосков С.И. Концепция физико-математической модели процесса контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов. *Сб. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике*. СПб.: СПбГТУ, 2013, т. 2, с. 175–178.

[12] Ho G.T.S., Lau H.C.W., Lee C.K.M., Ip A.W.H., Pun K.F. An intelligent production workflow mining system for continual quality enhancement. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 28, issue 7–8, pp. 792–809.

References

[1] Kuchuk-Iatsenko S.I., Mosendz I.N., Kazymov B.I. Programirovanie rezhimov kontaktnoi svarki oplavleniem detalei s bol'shimi razvitymi secheniiami [Programming modes fusion welding of parts with large cross-sections developed]. *Avtomaticheskaja svarka* [The Paton Welding Journal]. 1987, no. 6, pp. 14–18.

[2] Zhuravlev S.I., Konovalov N.A., Poloskov S.I. *Tekhnologicheskie osobennosti kontaktnoi stykovoii svarki oplavleniem truboprovodov bol'shikh diametrov* [Technological features of butt fusion welding of large diameter pipelines]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii Sovremennye problemy mashinostroeniia* [Collection of scientific works 7 of the International Scientific and Technical Conference Modern Problems of Mechanical Engineering]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University publ., 2013, pp. 180–185.

[3] Berglund S., Strand U. Quality assurance in automatic welding. *Svetsaren*. 2000, no. 1, pp. 29–32.

[4] Scotti A., Ponomarev V. *Soldagem MIG/MAG: melhor en-tendimento, melhor desempenho*. SanPaulo, Artliber Editora, 2008. 284 p.

[5] *Sibir'-Tehnologija-Servis* [Siberia-Technology-Service]. Available at: <http://www.zao-ctc.ru/kemppi-monitoring.html> (accessed 14 August 2013).

[6] Shchevelev E.M., Novitskii A.F., Zuev N.N., Gol'del'man A.L., Semenov I.L. Sistemy upravleniia dlia stykosvarochnykh mashin chetvertogo pokoleniia s funktsiiami dopuskovogo kontroliia, diagnostiki i vizualizatsii [Control systems for butt-welding machines with features of the fourth generation of tolerance control, diagnostics and visualization]. *Tiazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2007, no. 1, pp. 18–21.

[7] Lv Q., Tan K., Dai X., Zhang X. Research on application of high-speed data acquisition system for AC rail flash-butt welding. *Applied Mechanic and Materials*, 2013, vol. 239–240, pp. 884–888.

[8] Kolesnikov M.V., Erofeev V.A. Metodika vyborki dlia kontrolya kachestva naplavki mednykh poiaskov na stal'nye korpusa [Detection method of sampling for quality control of quality of bronze overlay on steel body]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2011, no. 1, pp. 50–53.

[9] Kasatkin O.G., Zaiffart P. Vliianie khimicheskogo i fazovogo sostava zony termicheskogo vliianiia na ee mekhanicheskie svoystva pri dugovoi svarke nizkolegirovannykh stali [Influence of chemical and phase composition of the HAZ on its mechanical properties during arc welding of low-alloy steels]. *Avtomaticheskaja svarka* [The Paton Welding Journal]. 1984, no. 2, pp. 5–10.

[10] Zaiffart P., Kasatkin O.G. Raschetnye modeli dlia otsenki viazkosti razrusheniia nizko- i srednelegirovannogo metalla shva v zavisimosti ot ego sostava i struktury [Computational models to evaluate the fracture toughness and low weld metal srednelegirovannyye depending on its composition and structure]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 1995, no. 6, pp. 10–12.

[11] Zhuravlev S.I., Konovalov N.A., Poloskov S.I. *Kontseptsia fiziko-matematicheskoi modeli protsessa kontaktnoi stykovoii svarki oplavleniem truboprovodov* [The concept of physical-mathematical model of the butt fusion welding of pipelines]. *Sbornik trudov 15 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Fundamental'nye i prikladnye issledovaniia, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologii v promyshlennosti i ekonomike* [15 Proceedings of the international scientific-practical conference Fundamental and applied research, development and application of high technology in the industry and the economy]. St. Petersburg, SPbGTU publ., 2013, vol. 2, pp. 175–178.

[12] Ho G.T.S., Lau H.C.W., Lee C.K.M., Ip A.W.H., Pun K.F. An intelligent production workflow mining system for continual quality enhancement. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, vol. 28, issue 7–8, pp. 792–809.

Статья поступила в редакцию 28.08.2013

Информация об авторах

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

ЕРОФЕЕВ Владимир Александрович (Тула) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов». Тульский государственный университет (300012, Тула, Российская Федерация, Ленина пр., д. 92, e-mail: va_erofeev@mail.ru).

ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: si_poloskov@mail.ru).

Information about the authors

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

EROFEEV Vladimir Aleksandrovich (Tula) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Welding, Molding, and Technology of Construction Materials». Tula State University (Tula State University, Lenin pr., 92, 300012, Tula, Russian Federation, e-mail: va_erofeev@mail.ru).

POLOSKOV Sergey Iosifovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Welding Technology and Diagnostics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: si_poloskov@mail.ru).