

Ю.А. Зак

Fuzzy-логическая экспертная система для оценки глубины и качества сварочных швов в процессах роботизированной электрической сварки

Рассмотрена построенная на принципах нечеткой логики экспертная система оценки качества сварных швов роботизированного процесса электродуговой сварки. Приведены параметры состояния процесса, определяющие качество и геометрические параметры сварочного шва, а также технологические предпосылки принятия решений, объемы входной и выходной информации, компоненты базы знаний правила *Fuzzy*-логического вывода и алгоритмы дефазификации. Описаны структурные схемы алгоритмов диагностики и управления технологическим процессом роботизированной сварки.

Ключевые слова: роботизированная электродуговая сварка, качество сварочного шва, геометрия ванны расплавленного металла, нечеткие множества, *Fuzzy*-логический вывод.

Розглянуто побудовану на принципах нечіткої логіки експертну систему оцінки якості зварних швів роботизованого процесу електродугового зварювання. Подано параметри стану процесу, що визначають якість і геометричні параметри зварювального шва, а також технологічні передумови прийняття рішень, обсяги вхідної і вихідної інформації, компоненти бази знань, правила *Fuzzy*-логічного висновку і алгоритми дефазифікації. Описано структурні схеми алгоритмів діагностики та управління технологічним процесом роботизованого зварювання.

Ключові слова: роботизоване електродугове зварювання, якість зварювального шва, геометрія ванни розплавленого металу, нечіткі множини, *Fuzzy*-логічний висновок.

Введение. В технологическом процессе роботизированной электродуговой сварки [1–4] металлическая ванна жидкого металла и столб дуги со всех сторон тщательно закрыты слоем флюса. Часть флюса расплавляется, и вокруг дуги появляется газовая полость, а на поверхности расплавленного металла – ванна жидкого шлака. Во время сварки под флюсом происходит глубокое проплавление основного металла. В качестве устройства манипулирующего электродом используется промышленный робот. В процессе поступательного движения электрода происходит затвердевание шлаковой и металлической ванн с возникновением сварного шва, покрытого твердой шлаковой коркой. Используя механизмы перемещения, обеспечивается траектория и требуемая скорость перемещения рабочего органа, в процессе которого осуществляется подача и попадание проволоки в дугу, а также перемещение рабочего органа вдоль шва. Ток к электроду, напряжение и сила которого должны обеспечить требуемые параметры и вид сварочного шва, идет через токопровод. Применение промышленных роботов для автоматической сварки должно обеспечить, требуемые геометрию и качество сварочного шва, а также оптимизацию соотношения между скоростью движения рабочего органа и электрическими параметрами сварочной дуги.

Целью построения системы управления роботизированным процессом электродуговой сварки есть [1, 3, 4] обеспечение бесперебойного хода технологического процесса и достижение при этом заданного профиля и требуемых качественных, прочностных и эстетических характеристик и показателей сварочного шва. Обеспечение требуемых качественных показателей сварных конструкций достигается при выполнении ограничений на производительность роботизированного комплекса (скорость движения рабочего органа робота) и оптимизацию экономических параметров процесса (минимизация энергозатрат, стоимости потребляемого газа и используемого соединительного провода).

Постановка задачи. Структура и основные компоненты системы управления

На ход технологического процесса существенное влияние оказывают следующие параметры [1–4, 6]: вид материала и толщина свариваемых конструкций, геометрия сварочного шва, используемый сварочный газ, вид и диаметр соединительной проволоки, управление тепловым режимом, электрические параметры сварки (ток, напряжение), качество технологической подготовки конструкций в месте сварочного шва.

Наиболее существенные управляющие параметры при этом – скорость сварки (скорость движения рабочего органа робота), сила и на-

пряжение тока, скорость подачи соединительной проволоки, положение рабочего органа (сварочной горелки), частота и амплитуда колебаний рабочего органа и их ориентация относительно геометрии сварочного шва.

Система управления роботизированным процессом электродуговой сварки заключается в следующем [1, 3–5]: технологическими регламентами процесса и требованиями к сварным конструкциям устанавливаются вид и толщина материалов свариваемых деталей, геометрия сварочного шва и качество механической обработки свариваемых частей, вид и параметры сварочной дуги, диаметр и материал соединительной проволоки, управление тепловым режимом.

Посредством системы сенсоров определяются скорость движения рабочего органа V_{org} (в м/мин), сила тока сварки I (в А), напряжение U (в В) и скорость подачи соединительной проволоки v_{Dr} (в м/мин). По результатам мониторинга сенсорной системой сбора и обработки информации могут быть измерены электрические параметры сварочного процесса, а также на основе обработки оптических данных определены геометрия (высота и ширина) сварочного шва и позиции рабочего органа. Все это предоставит возможность внести необходимые коррективы значений управляющих параметров в зависимости от геометрических параметров образуемой ванны расплавленного металла.

Важнейшие параметры состояния процесса, определяющие качество сварочного шва: t – глубина, b – ширина и h – высота сварочного шва, которые измеряются в мм [1, 2]. Для обеспечения требуемого качества сварочного шва эти параметры состояния процесса должны поддерживаться в определенных пределах, определяемых нижним и верхним граничным значением.

Анализ современных систем контроля и управления процессом роботизированной электродуговой сварки

На качество сварочного шва существенное влияние оказывают такие управляющие параметры, как мощность (напряжение и сила тока) подаваемой энергии, скорость движения (подачи проволоки), высота, частота и амплитуда коле-

бания сварочной горелки. Известно большое количество отечественных и зарубежных публикаций [1–9]) по построению сенсорных систем контроля качества сварочного шва и систем управления процессами роботизированной сварки.

Разработанные бесконтактные системы технического зрения (СТЗ) триангуляционного типа [6, 8] отличаются высокой точностью, информативностью и надёжностью. Они устойчиво работают и при горящей сварочной дуге, выдавая все необходимые данные для автоматического слежения за стыком, анализируя состояние шва по ширине, форме и площади его поперечного сечения. Камера направлена на область шва, создавая его доступное изображение. Эти системы *технического зрения* работают в реальном масштабе времени, используя метод светового сечения. Они способны отслеживать траекторию стыка с зазорами, близкими к нулю, обеспечивать автоматическое совмещение с точностью 0,2 мм траектории перемещения сварочной головки и траектории стыка и могут быть использованы при всех процессах дуговой сварки в условиях поперечных колебаний сварочной головки. Графическое отображение ванны расплавленного металла отмечает изменения и отклонение от заданного программой контура, которые интерпретируются как неправильное положение, требующее изменение в поведении процесса сварки.

На основе информации от таких оптических сенсоров, позволяющих осуществить оптический и спектральный анализ ванны расплавленного металла, построены системы адаптивного управления процессом сварки по принципу обратной связи.

Fuzzy-контроллеры, используемые в процессах роботизированной сварки, построенные по принципу простых ПИД-регуляторов [9, 10], используются для регулирования температуры, а также других параметров сварочных процессов. Однако методы многопараметрической нечеткой логики [11–14] позволяют в настоящее время решать и более сложные задачи анализа и прогнозирования качества сварочного шва на основе всей полученной от сенсоров информации.

В статье рассматривается построенная на принципах нечеткой логики экспертная система оценки качества сварных швов, на основе которой могут быть решены и более сложные задачи оптимизации процесса сварки на основе выбора правильного соотношения между установленными параметрами источника тока и системой управления сварочным роботом (положением, скоростью движения, амплитудой и частотой колебания сварочной горелки). Структура системы и основные компоненты управления роботизированным процессом электродуговой сварки представлены на рис. 1.



Рис. 1

Информационное обеспечение и технологические предпосылки экспертной системы определения качества сварочного шва

На основе следующих входных данных, полученных от оптических датчиков в процессе автоматизированной сварки, и расчетных входных параметров экспертная система должна сделать заключение о качестве (глубине) сварочного шва в некотором s -м сечении $t(s)$, идентифицировав его одним из термов выбранных лингвистических переменных выходных параметров системы:

- $F_U(s)$ – площадь перекрытия ванны расплавленного металла (в мм^2),
- $F_W(s)$ – площадь вогнутости покрытия ванны расплавленного металла (в мм^2),

- $h(s)$ – высота и $b(s)$ – ширина перекрытия сварочного шва (в мм),
- $\sigma(s)$ – величина отклонения центра площади расплавленного металла от расчетного центра шва (в мм).

Блок-схема алгоритма классификации представлена на рис. 2.



Рис. 2

При этом принимаются следующие предпосылки: так как длина сварочного шва и время сварки не очень велики, то основные технологические параметры (электрические параметры, скорость движения сварочного робота, скорость подачи и диаметр электродов, условия теплопроводности и др.) в процессе сварки остаются постоянными. Следовательно, объем поступающего расплавленного металла в каждый временной интервал также постоянный.

Неравномерность ширины сварочного шва, смещение центра площади расплавленного металла от центра шва, отклонение от расчетного значения расстояния электродов от свариваемой конструкции могут изменить коэффициент потерь и распределение расплавленного металла относительно сварочного шва и изменить соотношение между величиной перекрытия и глубины проникновения металла. Эти изменения отражаются в параметрах, определяющих качество сварочного шва. При этом входные параметры могут быть использованы в качестве исходных данных для прогнозирования этих изменений.

Если предположить, что поступающий объем расплавленного металла $W_G(s)$ в каждом s -м

сечении постоянен, могут быть приняты следующие гипотезы:

- увеличение площади перекрытия (выпуклой части) ванны расплавленного металла сокращает ту часть его объема $W_G(s)$, которая должна поступать в глубину шва;

- при наличии вогнутости ванны расплавленного металла, возможно, увеличивается глубина проникновения расплавленного металла (провара), и некоторый объем металла находится за нижней кромкой шва;

- при увеличении отклонения центра сварочного электрода от центра шва $\sigma(s)$ растет коэффициент потерь металла и сокращается объем расплавленного металла, образующего шов;

- если соотношение между шириной $b(s)$ и глубиной $h(s)$ ванны расплавленного металла очень большое, то можно предположить, что глубина сварного шва недостаточно велика и недостаточный объем металла попал в область соединения конструкции. При малом значении отношения $b(s)/h(s)$, вероятно, глубина провара $t(s)$ велика, и может иметь место наличие металла за нижней кромкой шва.

В качестве входных переменных используются следующие параметры:

- $F_U(s)$ и $F_D(s) > 0$ – соответственно площадь перекрытия и впадины (вогнутости) сварочного шва или ванны расплавленного металла (если $F_D(s) > 0$, то принимается $F_U(s) = -F_D(s)$),

- отношение $\eta(s) = \frac{b(s)}{h(s)}$ и параметр $\sigma(s)$.

Выходными параметрами системы диагностики есть:

- $F_D(s)$ – площадь объема металла, проникшего в глубину сварочного шва,

- $t(s)$ – глубина сварочного шва (глубина проникновения металла).

Лингвистические переменные и термы. Нечеткие множества

Разобьем диапозоны D изменения входных и выходной переменных на несколько интервалов (соответственно L или K), и введем соответствующие лингвистические переменные.

Для этих интервалов должны выполняться соотношения

$$d_{j-1,1} < d_{j1}, \quad d_{j-1,2} < d_{j2},$$

$$j = 2, \dots, L \quad \text{или} \quad j = 2, \dots, K, \quad (1)$$

$$[d_{11}, d_{12}] \cup [d_{21}, d_{22}] \cup \dots$$

$$\dots \cup [d_{j1}, d_{j2}] \cup \dots \cup [d_{K1}, d_{K2}] = D, \quad (2)$$

$$[d_{j-1,1}, d_{j-1,2}] \cap [d_{j1}, d_{j2}] = \emptyset, \quad j = 2, \dots, K. \quad (3)$$

Каждый интервал изменения переменной ($f_j(x_j)$ и $f_j(y_j)$, $j = 2, \dots, L$ или $j = 2, \dots, K$) может быть представлен термом некоторой лингвистической переменной и нечетким множеством с соответствующей функцией принадлежности с установленными параметрами ($\mu_{A_j}(x)$ или $\mu_{B_j}(y)$). Операторы фаззификации позволяют вычислить значение термина лингвистической переменной и показатель, определяющий принадлежность этого значения данному лингвистическому интервалу $\mu_{A_j}(x)$. Каждая входная и выходная переменная разбита на пять лингвистических интервалов: BN , NN , ZE , NP , BP . Здесь и в решающих правилах приняты следующие обозначения: BN – очень низкое значение, NN – низкое значение, ZE – нейтральное (среднее) значение, NP – большое значение, BP – очень большое значение.

В качестве примера на рис. 3. приведены функции принадлежности, термы и интервалы различных состояний, а также величины перекрытия входной лингвистической переменной – «площадь поверхности ванны расплавленного металла» – $F_U(s)$.

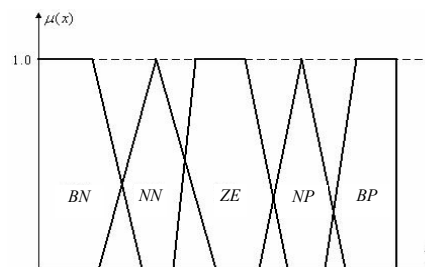


Рис. 3

Правила Fuzzy-логического вывода

Если правило Fuzzy-логического вывода основано на применении логической операции «И» (&) [9, 10, 12–14], как например,

$$R(i): \text{ЕСЛИ } (x_1 \in [d_{11}, d_{12}] \& x_2 \in [d_{2,j-1}, d_{2j}] \& x_3 \in [d_{3,p-1}, d_{3p}]), \quad (4)$$

$$\text{ТОГДА } (y_1 \in [d_{1,r-1}, d_{12}] \& y_2 \in [d_{2,l-1}, d_{2l}]),$$

тогда для вычисления результирующего значения функции принадлежности к различным термам выходных переменных используются соответствующие операторы *Fuzzy*-логики как в виде *t*-норм

$$\mu_{B_r}(y_p) = \min\{\mu_{A_j}(x_1), \mu_{A_k}(x_2), \mu_{A_p}(x_3)\}, p = 1, 2; \quad (5)$$

$$\mu_{B_r}(y_p) = \{\mu_{A_j}(x_1) \cdot \mu_{A_k}(x_2) \cdot \mu_{A_p}(x_3)\}, p = 1, 2. \quad (6)$$

Результат выполнения каждого *Fuzzy*-логического правила принимается во внимание только в том случае, если $\mu_{B_r}(y_p) \geq \varepsilon_p$.

База знаний экспертной системы, т.е. правила логического вывода, для каждой выходной переменной представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Входные переменные $F_U(s)/\sigma(s)$	Площадь объема металла, проникшего в глубину сварочного шва $F_D(s)$				
	<i>BN</i>	<i>NN</i>	<i>ZE</i>	<i>NP</i>	<i>BP</i>
<i>BP</i>	<i>NN</i>	<i>BN</i>	<i>BN</i>	<i>BN</i>	<i>BN</i>
<i>NP</i>	<i>NN</i>	<i>NN</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>BN</i>
<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NN</i>	<i>NN</i>
<i>NN</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>
<i>BN</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>

В табл. 1 представлены логические соотношения в форме (4) для определения значения лингвистического интервала выходной переменной $F_D(s)$ в зависимости от принадлежности к различным лингвистическим интервалам входных переменных $F_U(s)$ и $\sigma(s)$.

В табл. 1 отражены логические правила для выбора лингвистического интервала выходной переменной $t(s)$ в зависимости от значений лингвистических интервалов входных переменных $F_U(s)$ и $\eta(s)$. В каждой клетке определено некоторое правило *Fuzzy*-логического вывода. Так, в табл. 1 на пересечении второй строки и третьего столбца определяется следующее правило:

ЕСЛИ площадь перекрытия расплавленного металла – $F_U(s)$ равна *NN*, т.е. (низкое значение) и величина отклонения центра площади

расплавленного металла от расчетного центра шва – $\sigma(s)$ равна *ZE*, т.е. нейтральное (среднее) значение,

ТОГДА площадь объема металла, проникшего в глубину сварочного шва – $F_D(s)$, равна *ZE*, т.е. нейтральное (среднее) значение.

Таблица 2

Входные переменные $F_U(s)/\eta(s)$	Глубина проникшего металла $t(s)$				
	<i>BN</i>	<i>NN</i>	<i>ZE</i>	<i>NP</i>	<i>BP</i>
<i>BP</i>	<i>ZE</i>	<i>NN</i>	<i>NN</i>	<i>BN</i>	<i>BN</i>
<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NN</i>	<i>NN</i>	<i>BN</i>
<i>ZE</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NN</i>	<i>NN</i>
<i>NN</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>
<i>BN</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>BP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>

Структурная схема работы алгоритма представлена на рис. 4.



Рис. 4

Так как в базе знаний количество логических правил больше числа лингвистических интервалов каждой из выходной переменной, то несколько различных правил могут приводить к одному и тому же результату (см. табл. 1 и 2). При этом значения функции принадлежности к этому лингвистическому интервалу, как правило, различные.

Следующим шагом *Fuzzy*-логического вывода есть вывод на основе результатов всех этих правил общего заключения. Этот этап решения выполняется на основе *S*-норм, на-

пример, *Fuzzy*-логических операторов «ИЛИ». Если в результате выполнения различных логических операторов R_l^q , $q=1, \dots, Q$ получены различные значения функций принадлежности $\mu_{y_l^q}(y) = \mu_Y(y_l | R_l^q)$ к одному и тому же l -му терму некоторой лингвистической переменной выходного параметра, то результирующее значение $\mu_Y(y_l)$ принадлежности к этому интервалу вычисляется по формуле $R_l = \text{accop}(R_l^1, R_l^2, \dots, R_l^q, \dots, R_l^Q)$,

$$\mu_{y_l}(y) = \max \left[\mu_{y_l^1}(y), \mu_{y_l^2}(y), \dots, \mu_{y_l^q}(y), \dots, \mu_{y_l^Q}(y) \right],$$

$$l = 1, \dots, L = 5. \quad (7)$$

Вычисления (7) выполняются для каждого лингвистического интервала всех выходных переменных.

В качестве алгоритмов дефаззификации могут быть использованы следующие два алгоритма:

- Если необходимо определить только наименование лингвистического интервала, то алгоритм дефаззификации определяет только номер или имя этого лингвистического интервала по формуле

$$l^*(Y) = \arg \max(\mu_{y_1}(y), \dots, \mu_{y_l}(y), \dots, \mu_{y_L}(y)), \quad (8)$$

т.е. выбирается интервал (терм) с максимальным значением функции принадлежности к этому интервалу.

- В случае необходимости определить фактическое значение выходной переменной используется подробно описанный [14, 15] метод определения центра тяжести (*Center of Gravity – COG*)

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^L \int_l y \cdot \mu_{B_l}(y) \cdot dy}{\sum_{l=1}^L \int_l \mu_{B_l}(y) \cdot dy}. \quad (9)$$

В формуле (9) принимаются во внимание только активные правила, для которых справедливо $\mu_{B_l}(y) > \varepsilon$.

Заключение. На основе информации от оптических сенсоров, позволяющих осуществить анализ геометрии ванны расплавленного ме-

талла и методов многопараметрической нечеткой логики, предложена экспертная система оценки качества сварочного шва. На основе полученной информации могут быть решены задачи наиболее эффективного выбора соотношения между установленными параметрами источника тока и системой управления сварочным роботом (положением, скоростью движения, амплитудой и частотой колебания сварочной горелки), обеспечивающие требуемые качественные характеристики сварочного шва.

Результаты *Fuzzy*-логического вывода используются в системах автоматизированного управления роботизированной электродуговой сваркой металлических конструкций.

1. *Dilthey U.* Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Band I. Schweiß- und Schneidtechnologien – VDI-Verlag GmbH, 1994. – 286 p
2. *Ruge J.* Handbuch der Schweißtechnik. Band 2. Verfahren und Fertigung. – Springer-Verlag, 1993. – 292 p.
3. *Гладков Э.А.* Управление процессами и оборудованием при сварке – М.: Академия, 2006. – 432 с.
4. *Гладков Э.А., Малолетков А.В.* Управление технологическими параметрами сварочного оборудования для дуговой сварки: Учеб. пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 148 с.
5. *Цыбульский Г.А.* Адаптивное управление в дуговой сварке. – К.: Сталь, 2014. – 171 с.
6. *Гладков Э.А., Перковский Р.А., Малолетков А.В.* Компьютерно-телевизионный комплекс для управления и прогнозирования качества сварки // Сварочное производство. – 1997. – № 7. – С. 17–20.
7. *Гладков Э.А., Перковский Р.А., Киселев О.Н.* Бесконтактный датчик величины проплавления при дуговой сварке // Там же. – 2013. – № 11. – С. 19–23.
8. *Цыбульский Г.А.* Корректирующее управление траекторным движением. – К.: Сталь, 2012. – 161 с.
9. *Mamdani E.H., Assilian S.* An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // Int. J. of Man-Machine Studies. – 1975. – N 7. – P. 1–13.
10. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proc IEEE. – 1974. – P. 121–159.
11. *Neher J.* Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen. – Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Hrsg.: Stuttgart, Fraunhofer IPA, 2002. – 263 p.

12. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 169 с.
13. *Обработка* нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. // М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
14. *Зак Ю.А.* Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных. *Fuzzy-технологии.* – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 352 с.
15. *Зак Ю.А.* Альтернативные алгоритмы дефаззификации в условиях перекрытия различных по величине лингвистических термов // Системные исследования и информационные технологии. – 2015. – № 1. – С. 111–120.

Поступила 09.04.2015

Тел. для справок: +49 241 543-255 (Аахен, Германия)

E-mail: yuriy_zack@hotmail.com

Сайт: www.optimorum.de

© Ю.А. Зак, 2015

УДК 62.523

Yu.A. Zack

Fuzzy-Logic Expert System for Estimating the Depth and the Quality of the Welds in the Electric Welding Robot Processes

Keywords: welding arc robot, the quality of the weld geometry molten metal bath, fuzzy sets, Fuzzy-logic output.

Introduction. The existing vision systems operate in the real time. The graphic image of the melted metal bath reflects the changes and deviations from a reference contour generated by a program, which is interpreted as the inaccuracies-deviations used to change the behavior of the welding process.

Purpose. The control system of the robotic electric arc welding process is used to ensure a smooth running of the technological process and, at the same time, to achieve a given profile and the required quality, durability and aesthetic characteristics and parameters of the weld. The required quality of the welded structures should be achieved under the constraints on the productivity of the robotic complex (speed of the working body of the robot) and the optimization of the economic parameters of the process (minimization of power consumption, cost of the consumed gas and connecting cable). This is achieved through the right balance between the established parameters of the power supply unit and the welding robot control system (position, speed, amplitude and frequency of vibrations of the welding torch).

Methods. The offered expert system for assessing the quality of welds, using the information from the optical sensors, as well as from the sensors of the position of the welding torch and the parameters of the power unit, is based on the principles of fuzzy logic.

Results. The state parameters of the process, determining the quality and the geometric parameters of the electric arc weld, are obtained. Technological preconditions of decision making, volumes of the input and output information, the components of the knowledge base, and the rules of Fuzzy-logic inference and defuzzy algorithms are determined. The block-schemes of the diagnostics and control of the technologic process of the robotic welding are described.

Conclusion. The results of the Fuzzy-logic inference are used in automated control systems of the robotic electric arc welding of metallic structures.

●

Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Подписной индекс 71008