

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ МОДУЛЬ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Э.А. Гладков, Р.А. Перковский, Ю.О. Толокнов, П.С. Демидов

Предложен способ слежения за продольными и кольцевыми стыками ответственных изделий при аргонодуговой сварке на основе использования телевизионного модуля слежения для распознавания взаимного положения стыка и электрода и выдачи управляющего сигнала на привод коррекции положения сварочной головки. Описана математическая модель для расчета относительного распределения освещенности в зоне сварки и расчета оптической системы с фильтром. На основе математической модели предложена оптическая система для снижения контраста изображения зоны сварки. Представлена аппаратная часть для ввода видеоизображения в ЭВМ и связи со сварочным оборудованием. Рассмотрены назначение и принципы работы алгоритмов программного обеспечения при работе модуля.

Ключевые слова: телевизионный модуль, оптический датчик, следящая система, автоматическая сварка.

TELEVISION TRACKING MODULE OF JOINTS DURING ARGON ARC WELDING OF RESPONSIBLE PRODUCTS

E.A. Gladkov, R.A. Perkovskiy, Y.O. Toloknov, P.S. Demidov

Method of tracking the longitudinal and circumferential joints of important products under argon arc welding using television module for detecting the relative position of the joint and the electrode and issuing control signal to the actuator position correction of the welding head is suggested. Mathematical model for calculating the relative luminance distribution in the weld zone and the calculation of the optical system with filter is described. Optical system based on the mathematical model and proposed to reduce the contrast of the image of the fusion zone is suggested. The hardware for input video signal into the computer and connection with welding equipment is described. The purpose and principles of software algorithms at module's work are described.

Keywords: television module, optical sensor, servo system, automatic welding.

Введение

Аргонодуговая сварка – прогрессивный метод создания неразъемных соединений металлов и сплавов для ответственных и дорогостоящих изделий атомной, авиационной, космической и пищевой промышленности. Состояние современного сварочного производства характеризуется постоянно повышающимися требованиями к качеству сварных соединений и производительности процесса. Удовлетворить данные условия в большинстве случаев удастся благодаря внедрению в производство автоматических установок или роботов. При этом в процессе автоматизации сварки возникают

две основные проблемы: проблема управления пространственным положением сварочной головки относительно стыка свариваемых деталей и проблема управления формированием сварного соединения. Выбор метода управления, включая систему слежения за стыком, определяется типом сварного соединения, формой разделки, пространственным положением шва и особенностями технологии [1]. В статье рассматриваются оптические датчики слежения за стыком на основе телекамер, обладающие следующими преимуществами:

– позволяют дистанционно и бесконтактно проводить измерения;

- имеют возможность работы как при горении сварочной дуги, так и без нее;
- обладают высокой точностью измерения,
- слабо чувствительны к типу свариваемого металла;
- позволяют дистанционно наблюдать за процессом.

Существующие телевизионные датчики требуют подстройки для каждого изделия, не обеспечивают работы вблизи дуги и требуют мощного дополнительного источника подсветки [2–4]. В качестве приемников изображения сцены сварки в датчиках используют твердотельные CMOS-камеры и ПЗС линейки и матрицы [5, 6], а для подсветки применяют лазерные диоды мощностью от 10 до 100 мВт и длиной волны от 500 до 1000 нм [7, 8]. Все системы производят измерение положения стыка на расстоянии от 30 до 100 мм от точки сварки и должны быть закреплены на сварочной головке для привязки к положению электрода. Разработка телевизионного датчика, использующего дугу в качестве подсветки зоны сварки, позволит упростить конструкцию датчика, максимально приблизить точку измерения к точке сварки и обеспечить наблюдение за зоной сварки.

В лаборатории «Автоматизация сварки» кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан телевизионный модуль слежения за стыком для аргонодуговой сварки кольцевых и продольных стыков ответственных изделий на предприятиях космической, авиационной и пищевой промышленности.

Целью данной работы является разработка и описание действия телевизионного датчика,

использующего дугу в качестве подсветки зоны сварки для упрощения конструкции датчика, максимального приближения точки измерения к точке сварки и обеспечения наблюдения за зоной сварки.

Функциональная схема и технические характеристики телевизионного модуля

Функциональная схема телевизионного модуля показана на рис. 1. Модуль содержит:

- телекамеру 1 со специальной оптической насадкой для снижения контраста изображения сцены сварки;
- плату 2 ввода телевизионного изображения сцены сварки в ЭВМ;
- персональный компьютер 3 для решения задач распознавания стыка в режиме реального времени;
- устройство связи с объектом (УСО) 4 со сварочным оборудованием для управления положением сварочной головки.

Все блоки модуля, кроме телекамеры с оптической насадкой, расположены в корпусе компьютера.

Телекамера установлена на сварочной головке со стороны стыка. В поле зрения телекамеры попадает электрод, дуга, стык и свариваемое изделие. Сигнал с телекамеры поступает в плату ввода видеоизображения в персональный компьютер, где один видеокادر переводится в цифровую форму и пересылается в оперативную память процессора. Программа обработки видеокадра распознает в каждом кадре взаимное положение стыка и электрода, вычисляет рассогласование между ними и выдает через описание действия и плату УСО управляющий



Рис. 1. Функциональная схема телевизионного модуля слежения за стыком:

1 – телекамера; 2 – блок ввода изображения; 3 – персональный компьютер; 4 – устройство связи с объектом

сигнал для поперечной коррекции сварочной головки с целью наведения сварочного электрода на центр стыка.

В представленной таблице приведены технические характеристики телевизионного модуля.

Математическая модель распределения освещенности в зоне сварки

Основное внимание при разработке следящей системы было уделено получению качественного изображения сцены сварки, по которому оператор может следить за процессом и за тем, как устойчиво работает замкнутая система слежения за стыком. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом исследованы оптические характеристики пяти основных зон сварки (электрод – дуга – ванна – стык – изделие) (рис. 2); построена математическая модель распределения освещенности в этих зонах и разработана насадка на объектив, снижающая контраст между яркой дугой и значительно более темной поверхностью металла.

Для определения распределения освещенности дугой выделенных участков зоны сварки были рассмотрены все компоненты, попадающие в поле зрения телекамеры (рис. 3).

При расчетах яркостей этих компонентов был принят ряд допущений:

- дуга имеет достаточно большую длину, т.е. можно пренебречь учетом процессов в приэлектродных областях;
- плазменный столб при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом можно считать прозрачным, однородным, объемным источником света теплового излучения;
- дуга имеет цилиндрическую форму;
- температура дуги постоянна по всему объему, дуга представляет собой прозрачный, объемный, неселективный в спектральном диапазоне работы телекамеры источник при температуре 16000 К диаметром, равным диаметру электрода;
- дуга обладает постоянной по всему объему излучательной способностью;
- неплавящийся вольфрамовый электрод рассматривается как ламбертовский излучатель, неселективный в спектральном диапазоне работы телекамеры источник теплового излучения;
- распределение спектральной плотности яркости изделия и стыка складывается из собственного теплового излучения, диффузно и зеркально отраженного излучения дуги и электрода.

Таблица

Технические характеристики телевизионного модуля

Ширина стыка, мм	0,2–5
Минимальный контраст изображения стыка	0,1
Диаметр электрода $d_{эл}$, мм	1–5
Максимальное смещение стыка и электрода, мм	± 15
Погрешность определения положения стыка, мм	0,1
Погрешность определения ширины стыка, мм	0,1
Время обработки кадра, мс	100
Выходной аналоговый сигнал, В	+/-10

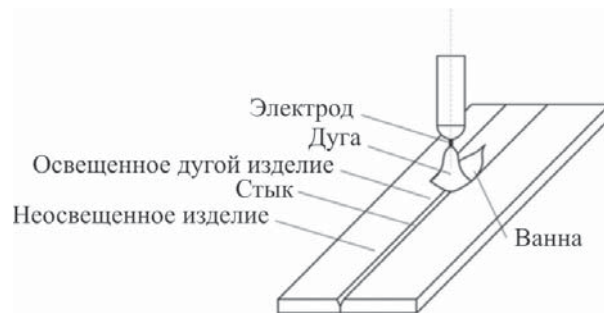


Рис. 2. Основные участки зоны сварки



Рис. 3. Вид поля зрения телекамеры

Математическая модель была построена на основе законов теплового излучения Планка и Стефана-Больцмана и геометрической оптики. В результате было получено распределение освещенности на поверхности фоточувствительной матрицы телекамеры с учетом ее спектральной чувствительности.

При расчете спектральной интенсивности излучения от электрода зависимость температуры электрода $T(z)$ от координаты z на оси электрода принята экспоненциальной на длине вылета электрода Z_e .

Исходя из этого, яркость электрода определяется выражением

$$L_1(z) = \frac{\varepsilon \sigma (T(z))^4 \xi(T)}{\pi},$$

где ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\xi(T)$ – коэффициент использования излучения фотоприемником со спектральной чувствительностью $V(\lambda)$ в диапазоне длины волны от λ_1 до λ_2 .

Коэффициент использования излучения фотоприемником определяется по формуле:

$$\xi(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{eV}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{eV}(\lambda) d\lambda},$$

где $M_{eV}(\lambda)$ – спектральная интенсивность излучения.

Спектральная интенсивность излучения, согласно закону Планка, определяется выражением:

$$M_{eV} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)},$$

где h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; c – скорость света.

Яркость дуги при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом определяется как яркость объемного прозрачного источника с распределением спектра излучения по закону Планка.

Если дуга обладает объемной мощностью излучения E_v и является прозрачной, то яркость излучения в направлении наблюдения будет зависеть от объемной излучательной способности дуги, координаты y и от расстояния от точки A до точки B (рис. 4).

Расчет яркости дуги $L_2(y)$ в направлении наблюдения проводим по формуле:

$$L_2(y) = \frac{\xi(T) E_v \sqrt{\left(\frac{d_{эл}}{2}\right)^2 - y^2}}{2\pi \cos \alpha};$$

$$E_v = \frac{4000 I_{св} U_{см.д.}}{\pi (d_{эл}^2)},$$

где E_v – объемная мощность излучения; $I_{св}$ – ток сварки; $U_{см.д.}$ – напряжение на 1 мм столбе дуги.

Сварочная ванна представляет собой расплавленный металл, излучение от которого складывается с излучением от дуги, сквозь которую его наблюдает телекамера. Примем, что излучение сварочной ванны соответствует тепловому излучению от источника, нагретого до температуры плавления металла и имеющего степень черноты согласно формуле Хагена-Рубенса

$$\varepsilon = 0,0347 \sqrt{r_0 T},$$

где r_0 – удельное сопротивление металла при 273°K (0°С), Ом×см.

Тогда яркость сварочной ванны определяется выражением:

$$L_3 = \frac{\varepsilon \sigma T^4 \xi(T)}{\pi},$$

Для определения яркости изделия, освещенного нагретым электродом, представим электрод на высоте H над поверхностью изделия в виде цилиндра с экспоненциальной зависимостью температуры от координаты z_e на длине вылета электрода и полусферы постоянной температуры на конце электрода (рис. 5).

Если определить эти две составляющие яркости вторичного источника света – при освещении изделия кончиком электрода L_{41} и от боковой поверхности электрода L_{42} , то яркость любой точки изделия как вторичного диффузно рассеивающего источника определяется выражением:

$$L_a = \frac{\rho E}{\pi},$$

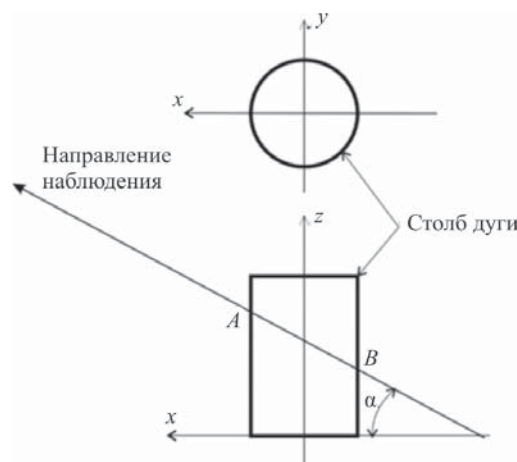


Рис. 4. Определение яркости излучения дуги в направлении наблюдения α

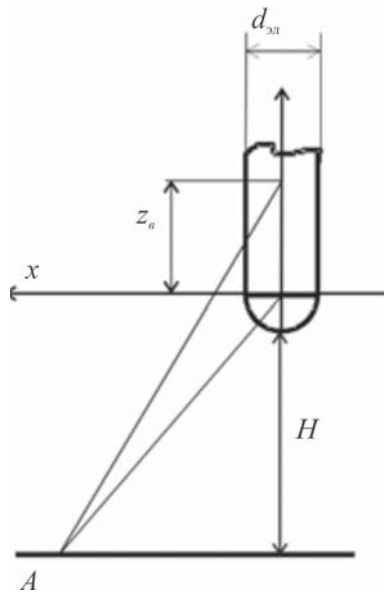


Рис. 5. Определение яркости изделия, освещенного электродом

где ρ – коэффициент диффузного отражения;
 $E = \frac{J \cos \gamma}{r^2}$ – освещенность в точке на расстоянии r от центра источника света до поверхности изделия; J – сила света источника; γ – угол падения света на поверхность изделия.

Значение яркости вторичного излучения из точки A при освещении кончиком электрода определяется выражением:

$$L_{4_1}(x) = \frac{\rho \varepsilon \sigma \cos \left(\arctg \left(\frac{x}{H} \right) \right) d_{эл}^2 T^4 \xi(T)}{8\pi(x^2 + (H + d_{эл}/2)^2)}.$$

Яркость точки A при освещении боковой поверхностью электрода в виде цилиндра диаметром $d_{эл}$ и температурой, экспоненциально уменьшающейся от нагретого края к месту крепления, определяется формулой:

$$L_{4_2}(x) = \frac{\rho \varepsilon \sigma d_{эл}}{4\pi} \int_{z=0}^{z_1} \frac{\cos \left(\arctg \left(\frac{x}{H+z} \right) \right) T^4(z) \xi(T) dz}{x^2 + (H+z)^2},$$

где $T(z)$ – распределение температуры на длине вылета электрода.

Расчетная схема для определения яркости поверхности изделия, освещенного дугой, приведена на рис. 6.

Дуга диаметром $d_{эл}$ и высотой h представляет собой светящийся прозрачный цилиндр

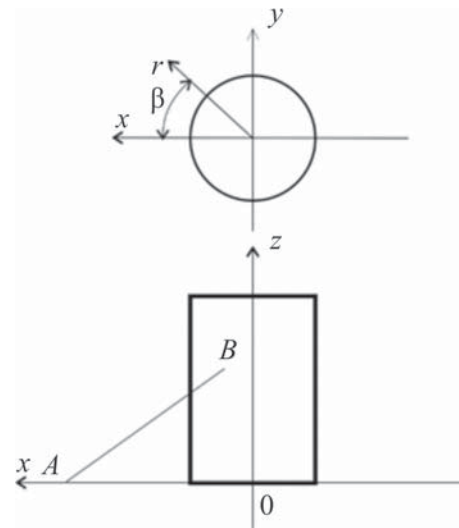


Рис. 6. Определение яркости изделия, освещенного дугой

с объемной мощностью излучения E_v . Каждая точка дуги B освещает точку изделия A (см. рис. 6). Полное расчетное выражение для определения яркости поверхности изделия, освещенного всем объемом дуги, определяется по формуле:

$$L_{4_3}(x) = \frac{\rho \xi(T) E_v}{4\pi^2} \cdot \frac{rz}{R_1(r, \beta, z)} \cdot dr d\beta dz;$$

$$R_1(r, \beta, z) = ((r \sin \beta)^2 + (x - r \cos \beta)^2 + z^2)^{3/2}.$$

На рисунке 7 показано расчетное относительное распределение яркости в зоне сварки нержавеющей пластин встык. Диаметр электрода 3 мм, сила тока 120 А. За единицу принята яркость дуги.



Рис. 7. Относительная яркость сцены сварки

Оптическая система, снижающая контраст изображения зоны сварки

Расчеты показали, что стандартная видеокамера не способна передать диапазон яркостей в 5 порядков.

Для выравнивания контраста сцены сварки, наблюдаемой видеокамерой, разработана специальная насадка на стандартный объектив, имеющая неравномерное пропускание по полю зрения. Оптическая схема фокусирующей системы, содержащей дополнительный светофильтр, показана на рис. 8.

Фокусирующий объектив диаметром входного зрачка d формирует в плоскости изображения видеобраз сцены сварки, находящейся в плоскости предмета объектива. Введение в объектив фильтра с пропусканием $\tau(y)$, установленного на расстоянии c_ϕ от объектива, изменяет коэффициент пропускания различных точек изображения. Это позволило, при соответствующем выборе фильтра и места его установки, ослабить пропускание объектива для наиболее ярких точек изображения зоны сварки (дуга, ванна). В геометрическом приближении, без учета aberrаций объектива, коэффициент пропускания по оси, параллельной поверхности изделия, будет постоянен, а по оси y определяться выражением:

$$\theta(y) = \frac{2 \int_{-d/2}^{d/2} \sqrt{(d/2)^2 - z^2} \tau(y + (z - y)) \left(\frac{a - c_\phi}{a} \right) dz}{\pi (d/2)^2},$$

где d – диаметр входного зрачка объектива.

Была разработана программа расчета, определены оптимальные положения и коэффициент пропускания светофильтра, при которых изображение может передаваться видеокамерой без амплитудных искажений. Для примера взят объектив $d = 10$ мм, $a = 300$ мм, поле зрения Y от -100 мм до $+100$ мм, светофильтр с пропусканием 0,001 расположен на расстоянии $c_\phi = 30$ мм ниже оптической оси объектива на 2 мм. Полученные значения относительной яркости изображения приведены на рис. 9, а, зависимость коэффициента пропускания такой оптической системы от координаты y – на рис. 9, б.

Как видно из рис. 9, в изображении яркость различных зон отличается примерно в 100 раз. Такое изображение может быть передано стандартной видеокамерой промышленной системы технического зрения. Внешний вид камеры с насадкой показан на рис. 10.

Программное обеспечение

Для обработки видеосигнала и формирования управляющего воздействия разработано специальное программное обеспечение, содержащее такие основные блоки:

- блок первичной обработки изображения;
- блок определения положения стыка;
- блок отображения;
- блок формирования сигнала рассогласования.

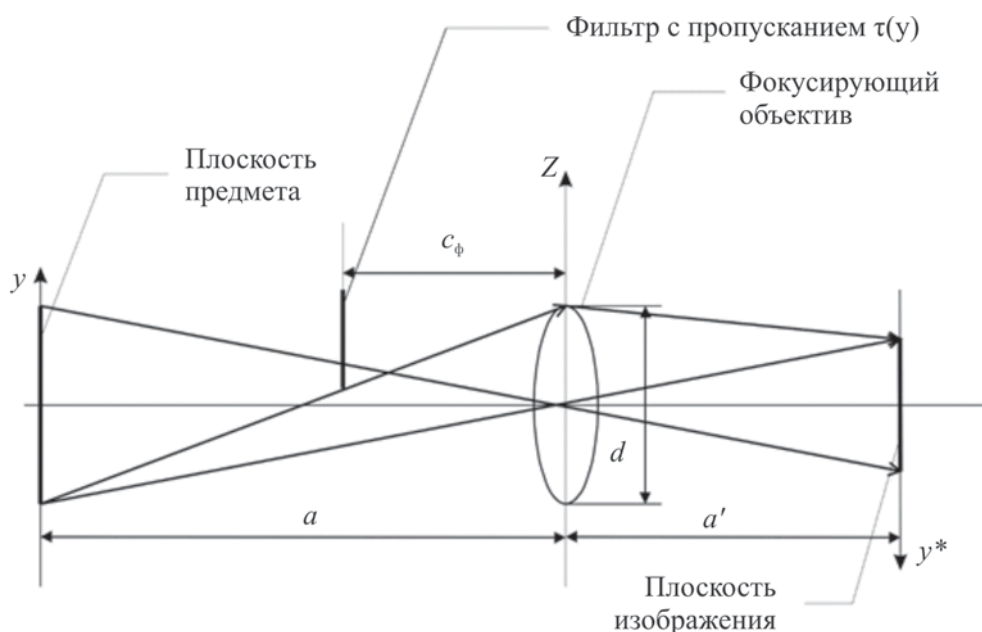


Рис. 8. Оптическая схема проекционной системы

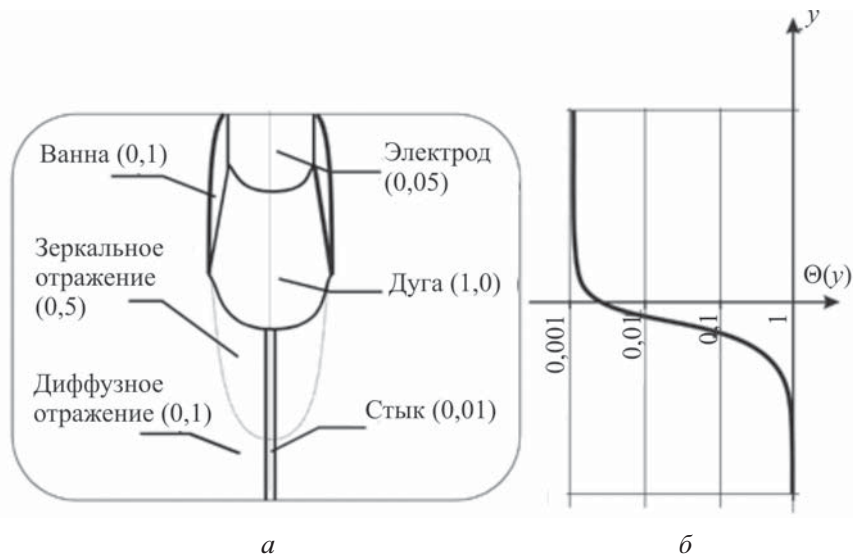


Рис. 9. Относительная яркость сцены сварки (а)
и зависимость для коэффициента пропускания (б)

Блок первичной обработки изображения служит для повышения отношения сигнал/шум и выделения из изображения двух поперечных сечений, в которых будет определяться положение электрода («сечение 1») и стыка («сечение 2»). В зависимости от размера изображения стыка и электрода задается число строк и точек, которые будут усреднены для дальнейшего распознавания изображения. Сигнал от каждой строки пропускается через оптимальный цифровой фильтр, что позволяет исключить влияние помех как с высокими пространственными частотами (искры, царапины, окалина), так и с низкими (неравномерная по полю засветка от дуги, разный коэффициент отражения свариваемых частей заготовки) [3].

Блок определения положения стыка использует корреляционный алгоритм [4]. За точное положение оси стыка принимается точка, соответствующая максимуму значения взаимокорреляционной функции между реальным изображением стыка, полученным с помощью телевизионной камеры, и его модельным изображением (маркерный стык). Было проведено исследование формы маркерного стыка для обеспечения максимальной вероятности обнаружения при изменении зазора в заданных пределах. Наилучший результат дала трапециевидальная форма маркерного стыка с шириной оснований равных минимальному и максимальному изображению зазора в стыке.



Рис. 10. Камера с насадкой:
1 – камера; 2 – насадка; 3 – фильтр

При установке камеры на сварочной головке положение электрода фиксировано на изображении, и сигнал рассогласования определяется по отклонению положения стыка от оси камеры. При неподвижной установке камеры положение электрода определяется алгоритмом, аналогичным стыку, но маркерная функция имеет прямоугольную форму с шириной, равной изображению электрода. В этом случае управляющий сигнал определяется в зависимости от разности положения электрода и стыка.

Блок отображения позволяет в реальном времени на мониторе отображать зону сварки,

цифровые значения и графики изменения во времени положения стыка и электрода, вычисленный сигнал рассогласования.

Блок формирования сигнала рассогласования вычисляет требуемое управляющее воздействие и выводит его через УСО на механизм поперечной коррекции сварочной головки. При отсутствии сигнала от стыка или электрода, определяемому по снижению ниже порогового значения максимального значения функции взаимной корреляции, запускается алгоритм пролонгации выходного сигнала, обеспечивающий устойчивое слежение при наличии прихваток.

Заключение

При идентификации объекта управления выделены пять компонентов сцены сварки (электрод – дуга – сварочная – ванна – стык), попадающие в поле зрения камеры и характеризующиеся различной площадью, температурой и спектральной яркостью излучения при сварке. На основе законов теплового излучения Планка и Стефана–Больцмана, законов геометрической оптики построена математическая модель, позволяющая рассчитать относительное распределение яркости излучения от различных компонентов сцены сварки. С использованием разработанной математической модели проведен расчет оптической насадки с фильтром, уменьшающим контраст изображения сцены сварки за счет изменения оптического коэффициента пропускания в зависимости от яркости отдельных точек на изображении сцены сварки.

Полученное изображение зоны сварки позволяет с помощью корреляционных алгоритмов определить положение электрода и стыка и выработать управляющее воздействие для поперечной коррекции положения электрода с целью его наведения на центр стыка.

Проведенные исследования и реализация замкнутой системы слежения при аргодуговой сварке позволили сделать вывод о возможности применения телевизионных систем слежения за стыком без использования дополнительных источников подсвета, что позволяет

упростить конструкцию датчика, максимально приблизить точку измерения дуги и обеспечить наблюдение за зоной сварки.

Список литературы

1. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудование при сварке. М.: Академия, 2006. – 432 с.
2. Гладков Э.А., Перковский Р.А. Видеокомпьютерный модуль (ВКМ-1) для слежения за траекторией стыка и управления формированием шва при сварке труб // Черная металлургия. 2000. № 1–2. С. 60–63.
3. Гладков Э.А., Перковский Р.А., Данилов А.В. Фильтрация помех в оптической следящей системе за стыком при дуговой сварке // Сварка и Диагностика. 2010. № 1. С. 44–47.
4. Гладков Э.А., Перковский Р.А., Невзоров В.А. Цифровая система слежения за стыком на ПЗС линейке при дуговой сварке // Технология машиностроения. 2009. № 4. С. 47–51.
5. Гладков Э.А., Перковский Р.А., Васькин Д.С., Шолохов М.А. Оптические системы контроля положения электрода в разделке стыка при MIG/MAG сварке // Сварка и Диагностика. 2012. № 6. С. 36–40.
6. Lucas B., Smith J. Keeping an electronic eye on automated Arc Welding. // Welding and Metal Fabrication. 2000. No. 4. P. 6–11.
7. Markus Heber, Martin Lenz, Matthias Ruther, Horst Bischof, Hartwig Fronthalen, Gerardus Croonen. Weld seam tracking and panorama image generation for on-line quality assurance. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. No. 65. P. 1371–1382.
8. ZHANG Ting, LI Kai, YANG Jing. Research on the Real-time Tracking Information of Three-dimension Welding Seam in Robotic GTAW Process Based on Composite Seam tracking control for mobile welding robot based on vision sensor. // Journal of Central South University. 2010. No. 17. P. 1320–1326.

Материал поступил в редакцию 03.02.15

ГЛАДКОВ Эдуард Александрович E-mail: 123777@bk.ru Тел.: (916) 590-70-04	Доктор технических наук, профессор кафедры технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана, Заслуженный деятель науки РФ. Сфера научных интересов: моделирование и управление процессами сварки плавлением. Автор более 250 статей, 25 изобретений, трех монографий.
ПЕРКОВСКИЙ Роман Анатольевич E-mail: proman@bmstu.ru Тел.: (916) 453-63-42	Кандидат технических наук, доцент кафедры технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сфера научных интересов: системы автоматического управления технологическими процессами. Автор 60 статей и 14 изобретений.
ТОЛОКНОВ Юрий Олегович E-mail: y.toloknov@mail.ru Тел.: (499) 149-21-56	Старший преподаватель кафедры технологии приборостроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: САПР, технологии приборостроения, информационные технологии. Автор 6 статей.
ДЕМИДОВ Павел Сергеевич E-mail: paveldem1992@mail.ru Тел.: (964) 578-28-06	Студент 6 курса кафедры технологии приборостроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.