



УДК 621.791.03-52

## КАЛИБРОВКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ СВАРКИ

В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена методика калибровки оптической системы, предназначенной для оценки распределения температурного поля в зоне сварки. Калибровка позволяет компенсировать все собственные и установочные погрешности компонентов сенсорного блока.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, автоматизация, температурное поле, зона сварки, мультиспектральная пирометрия, калибровка видеокамер, эталон, сопряженные точки

Важным и перспективным направлением в области автоматизации процессов дуговой сварки является использование датчиков, фиксирующих процесс образования сварного соединения. Особый интерес вызывает измерение распределения температурного поля в зоне формирования сварного соединения. Для решения данной задачи наиболее подходящим является использование приборов, обеспечивающих бесконтактное измерение температуры — оптических пирометров. По сравнению с контактными методами измерения температуры пирометрические отличаются следующими преимуществами:

- высоким быстродействием, которое определяется типом приемника излучения и схемой обработки сигналов;
- возможностью измерения температуры динамических объектов и элементов оборудования, находящихся под высоковольтным потенциалом;
- возможностью измерения высоких температур, при которых применение контактных средств измерения либо невозможно, либо время их работы очень невелико.

Различают одно- и мультиспектральные пирометры. Односпектральные принимают излучение в одном спектральном диапазоне, который может быть достаточно широким. Далее по измеренному значению мощности излучения определяется температура. Мультиспектральные пирометры, которые также известны как пирометры спектрального отношения и цветные, принимают излучение в двух и более спектральных диапазонах. Температура объекта определяется путем сравнения мощностей излучения в различных диапазонах.

Применение односпектральных оптических пирометров для измерения температурных характеристик в зоне сварки является нецелесообразным, поскольку при этом необходимо априорно

знать значение коэффициента излучения поверхности объекта. По своей природе поверхность металла в зоне сварки не может иметь постоянного коэффициента излучения. Поверхность расплавленного металла образует гладкое зеркало, излучательная способность которого может быть менее 0,1, а излучательная способность шлака, плавающего на поверхности, может достигать значений 0,9...0,95. Кроме того, односпектральные пирометры в значительной степени подвержены влиянию пыли и загрязняющих веществ.

В отличие от односпектральных пирометров мультиспектральные не зависят от коэффициента излучения и механические помехи в зоне измерения практически не влияют на их работу, поэтому они наиболее подходят для измерения распределения температур сварочной ванны и околошовной зоны. В то же время мультиспектральные пирометры представляют собой довольно сложные и дорогостоящие приборы, стоимость которых соизмерима с ценой специализированного сварочного комплекса. Поэтому возникает необходимость в разработке более простых и доступных устройств, предназначенных для оценки распределения температурного поля в зоне сварки.

Китайские ученые [1] предложили конструкцию так называемого двухцветного (двухспектрального) сенсора, который состоит из одной видеокамеры и двух светофильтров с разной длиной волны пропускания, расположенных на вращающемся барабане перед объективом. В контроллере устройства сравниваются два изображения, снятые через разные светофильтры, на основании чего определяется распределение температур в зоне сварки. Такая оптическая система, кроме сложности ее конструктивного исполнения и проблем, связанных с синхронизацией затвора видеокамеры с вращением барабана, имеет еще один существенный недостаток — запаздывание на время полуоборота барабана. Заявленный такт работы такого сенсора составляет 0,5 с, что существенно ограничивает область его возможного применения.

В ИЭС им. Е. О. Патона также ведутся работы над созданием оптической системы для оценки





распределения температурного поля с использованием двухцветной пирометрии, схема которой представлена на рис. 1. Конструктивно сенсорный блок состоит из двух видеокамер, расположенных под углом  $90^\circ$  относительно друг друга, перед объективами которых установлены узкополосные светофильтры с разной длиной волны пропускания. Между видеокамерами находится светоделительный кубик, разделяющий излучение от нагретого объекта на два потока, один из которых проходит через кубик без изменений, а второй преломляется под прямым углом. Таким образом, видеокамеры «видят» один и тот же участок объекта через разные светофильтры. Изображения исследуемого объекта синхронно передаются контроллеру оптической системы, где на их основе производится оценка распределения температур. Такт работы системы соответствует периоду обновления кадров стандартного телевизионного сигнала и составляет 40 мс.

В идеальном случае для расчета распределения температур в зоне сварки необходимо сопоставлять точки на изображениях с одинаковыми координатами. Однако на практике координаты одного и того же участка объекта измерения на изображениях могут существенно отличаться. Это связано с тем, что при сборке сенсорного блока могут возникнуть незначительные угловые или линейные погрешности установки компонентов, которые в сумме приводят к существенной погрешности взаимного ориентирования осей визирующей видеокамер. Кроме того, внутренние параметры заводских изделий, таких как видеокамеры и объективы, могут не полностью соответствовать паспортным данным, что также приводит к существенным погрешностям при анализе и обработке видеосигналов. Отсюда возникла необходимость в калибровке сенсорного блока.

В данном случае задачу калибровки можно разбить на следующие подзадачи:

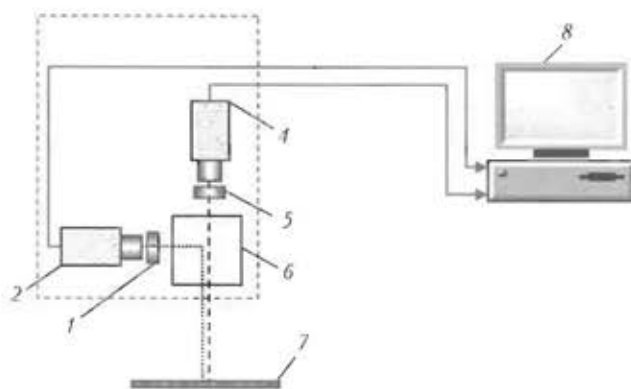


Рис. 1. Схема системы для оценки распределения температурного поля в зоне сварки: 1, 5 — светофильтры; 2, 4 — видеокамеры; 3 — сенсорный блок; 6 — светоделительный кубик; 7 — объект измерения; 8 — контроллер

— формирование математической модели, в которую входят модели видеокамер и эталона;

— определение координат характерных точек на изображениях эталона для двух видеоканалов;

— поиск параметров моделей видеокамер, при которых отклонение между измеренными характерными точками эталона и их моделями будет минимальным;

— формирование матрицы для сопряжения точек на изображениях, полученных от двух видеокамер.

Для определения пространственного положения видеокамер применяется методика калибровки с использованием в качестве эталона плоского шаблона, которая более подробно рассмотрена в работе [2]. На поверхность шаблона нанесена равномерная сетка с известными размерами ячеек. Математическая модель оптической системы включает описание положения видеокамер относительно эталона и преобразования из систем координат видеокамер в системы координат соответствующих изображений. Положения видеокамер относительно системы координат эталона однозначно определяются матрицами пространственных преобразований  $A_{k1}$  и  $A_{k2}$ , которые включают углы поворота  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и линейные смещения  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  видеокамер относительно точки начала координат опорной системы, которая совпадает с центральной точкой сетки на поверхности эталона. Переход от систем координат камер к изображениям осуществляется с помощью преобразования перспективы. Таким образом, если положение точки в опорной системе координат задать вектором  $r_0$ , то векторы, определяющие координаты данной точки в системах координат изображений первой и второй видеокамер  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$ , можно найти из соотношений

$$r_{i1} = P[r_0 A_{k1}^{-1}] \quad \text{и} \quad r_{i2} = P[r_0 A_{k2}^{-1}],$$

где  $P$  — функция преобразования перспективы. Справедливы также и обратные преобразования.

В качестве характерных точек на изображениях эталона используются узловые точки сетки. Для автоматического определения координат узловых точек используются методы распознавания образов на цифровых изображениях, описанные в работе [3]. На рис. 2 показан результат нахождения узловых точек сетки на изображениях, полученных от видеокамер сенсорного блока. Изображения сетки эталона имеют разную ориентацию из-за собственных и установочных погрешностей компонентов сенсорного блока.

Для определения параметров видеокамер, при которых графические модели сетки соответствуют действительным изображениям сетки эталона, выполняется итеративное измерение параметров



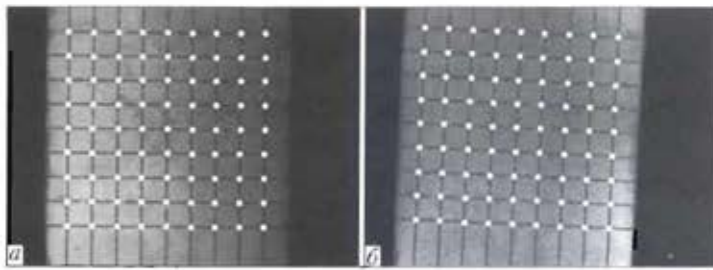


Рис. 2. Результат нахождения точек сетки на двух изображениях (а, б)

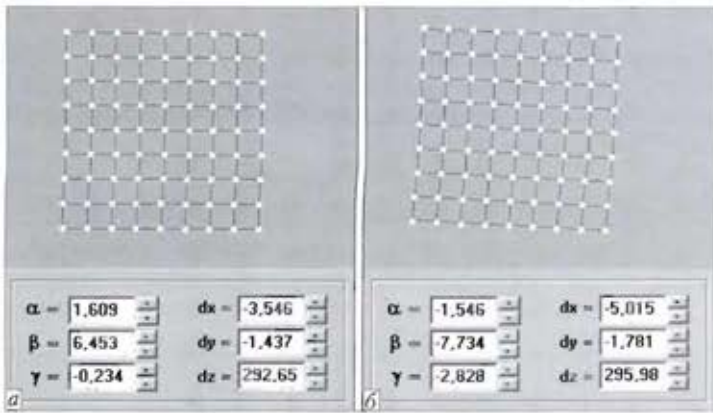


Рис. 3. Результаты калибровки видеокамер 2, 4 (а, б)

моделей видеокамер до получения минимальных среднеквадратических отклонений между измеренными узловыми точками и узловыми точками смоделированной сетки. На начальном этапе изменение угловых и линейных параметров производится со значительным шагом. Если среднеквадратическое отклонение на двух соседних итерациях не изменяется, то шаг уменьшается. Итеративный процесс заканчивается, если изменение шага не приводит к уменьшению среднеквадратического отклонения. На рис. 3 показаны результаты совмещения моделей сетки с измеренными точками и соответствующие численные результаты калибровки для каждой видеокамеры.

С помощью матрицы  $A_{K1}$  и обратного перспективного преобразования для любой точки на первом изображении можно рассчитать ее смещения относительно точки начала отсчета оптической системы. В то же время с помощью матрицы  $A_{K1}^{-1}$  и прямого перспективного преобразования несложно определить положение точки на втором изображении, которая соответствует

точке на поверхности эталона с ранее найденными смещениями. Таким образом, для каждой точки на первом изображении можно найти сопряженную ей точку на втором изображении.

Для визуальной оценки корректности результатов калибровки сенсорного блока используется механизм наложения полупрозрачных изображений. При этом на точки первого изображения накладываются соответствующие сопряженные точки из второго изображения. На рис. 4 показаны два исходных изображения нити лампы накаливания и инвертированный результат наложения с использованием поиска сопряженных точек. Исходные изображения нити накаливания имеют разную ориентацию, но при наложении наблюдается практически полное совпадение фрагментов. Кроме визуальной оценки, можно также численно рассчитать и сравнить координаты сопряженных точек в опорной системе координат. При численном анализе отклонения между координатами сопряженных

точек не превышают  $\pm 1$  пикселя.

Если в ходе проверки результатов калибровки сенсорного блока получен положительный результат, то формируется матрица сопряжения точек. Индексы матрицы соответствуют координатам точек на изображении от первой видеокамеры. Каждый элемент матрицы содержит два целых значения, которые представляют собой координаты сопряженных точек на изображении от второй видеокамеры. В дальнейшем данная матрица используется при сравнении изображений объектов, полученных с помощью двух видеокамер оптического блока.

Оценка распределения температурного поля в зоне сварки с использованием одной видеокамеры и вращающего диска со светофильтрами в общем случае является обоснованной, поскольку сравниваются точки изображений с одинаковыми координатами. Но при этом видеосъемка двух изображений, по которым осуществляется оценка температурного поля, выполняется в разные мо-



Рис. 4. Визуальная оценка калибровки: а, б — исходные изображения; в — инвертированное наложение





менты времени и в разных местах, что при значительных скоростях сварки приводит к существенным погрешностям измерения. Разработанная методика калибровки, которая использует две видеокамеры и сравнивает изображения зоны сварки, полученные практически одновременно, дает более качественную оценку распределения температур в масштабе реального времени.

A procedure is proposed for calibration of an optical system designed for evaluation of temperature field distribution in the welding zone. Calibration allows compensation of the inherent and setting errors of sensor block components.

Поступила в редакцию 29.11.2006

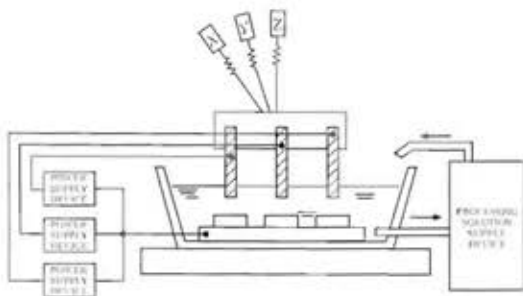
УДК 621.791(088.8)

## ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА\*

**Карманное устройство для нанесения флюса.** Устройство содержит баллончик, заполненный флюсом. На переднем торце баллончика установлена проницаемая для флюса головка, в которой закреплена щетка. Флюс через головку попадает на щетку, с помощью которой его наносят на паяемую поверхность. Щетка закрыта колпачком, который задерживает частицы флюса, когда устройство не используется. Устройство может оснащаться механизмом, вытесняющим флюс через головку. Патент Великобритании 2416503. В. Moffat.



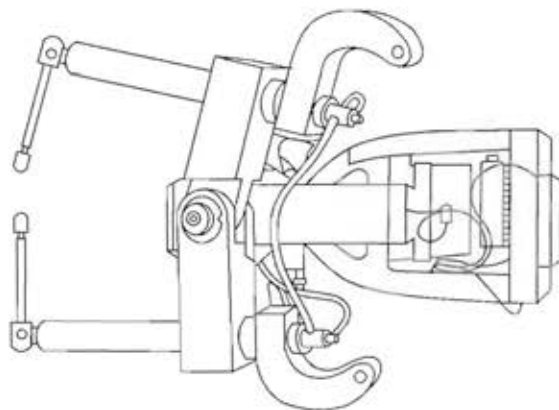
**Способ и установка для обработки поверхности электрическим разрядом** предназначена для модифицирования лежащего на ней слоя путем формирования электрического разряда между электродом, изготовленным из модифицирующего материала или вещества, которое является его источником, и подлежащим обработке металлом. В состав установки входят изолированные один относительно другого электроды, каждый из которых подключен к отдельному источнику питания, предназначенному для работы только с данным электродом. На каждый электрод поступает разрядный импульс независимо от соответствующего источника питания. Патент Германии 19883021. У. Takashi, G. Akihito (Mitsubishi Denki K. K., Tokio).



\* Приведены сведения о патентах, опубликованных в реферативном журнале «Изобретения стран мира» № 2 за 2007 г.

1. Zhang H., Pan J. Real-time measurement of welding temperature field and closed loop control of penetration // China Welding. — 1999. — 8, № 2. — P. 127-134.
2. Киселевский Ф. Н., Колюда В. А. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 57-58.
3. Фор А. Восприятие и распознавание образов / Пер. с франц. А. В. Серединского; под ред. Г. П. Катыса. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.

**Сварочные клещи** содержат два подвижных рычага, каждый из которых состоит из первой детали, на которой закреплен электрод; второй детали и шарнира, соединяющего первую и вторую детали с возможностью поворота вокруг базовой оси. На второй детали закреплен шарнирный рычаг. Клещи, кроме того, содержат шарниры, соединяющие рычаг со второй деталью, а также приводной механизм, который воздействует на рычаги через соединительные шарниры. Патент Германии 10202518. К. Axel, S. Holger (Siemens Ag).



**Способ механизированной сварки в  $CO_2$  с низкочастотной модуляцией сварочной ванны.** Изобретение относится к сварке металлов плавящимся электродом в среде защитных газов, а именно к способу механизированной сварки в среде углекислого газа с низкочастотной модуляцией сварочной ванны и может найти применение в машиностроении при изготовлении сварных пространственных конструкций. Сварку осуществляют с низкочастотной модуляцией сварочной ванны «точками». Размер и перекрытие сварных точек задают системой управления. Во время импульса сварку ведут на возрастающей вольт-амперной характеристике (ВАХ) дуги и жесткой ВАХ источника питания с образованием сварочной ванны заданного объема. Сварочную ванну за время паузы частично кристаллизуют, для чего сварку ведут на жесткой ВАХ дуги и внешней крутопадающей ВАХ источника питания. В результате получают качественные сварные соединения тонколистовых металлов во всех пространственных положениях. Патент России 2293630. В. Т. Федько, О. Г. Брунов, А. В. Крюков и др. (Томский политехнический университет).