



СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ ТРУБОСВАРОЧНОГО СТАНА

Ф. Н. КИСИЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, **Е. В. ШАПОВАЛОВ**, **Е. С. МЕЛЬНИК**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана система мониторинга и контроля сварочного процесса для трубосварочного стана, состоящая из трех подсистем: контроля проплавления с обратной стороны сварочной ванны, контроля формирования сварного шва трубы и слежения за стыком. Рассмотрены построение этих подсистем с использованием средств технического зрения, а также аппаратные и алгоритмические методы минимизации влияния оптических (блики, засветка от сварочной дуги) и механических (царапины, ржавчина, заусенцы) помех. Созданная система обеспечивает высокую точность измерений в режиме реального времени.

Ключевые слова: дуговая сварка, стыковое соединение, мониторинг процесса сварки, система технического зрения, автоматическое управление сварочным процессом, контроль проплавления, система слежения, контроль формирования шва, валик усиления

Применение системы мониторинга в сварочном производстве позволяет получать сварочную продукцию стабильного качества и уменьшить влияние человеческого фактора на сварочный процесс. Основной задачей мониторинга процесса сварки является формирование сварного шва с заданными геометрическими параметрами. В состав системы мониторинга входят следующие подсистемы: контроля основных сварочных параметров в процессе сварки, управления сварочным процессом, прогнозирования качества сварки и контроля геометрии сварного шва.

Контроль основных параметров таких, как ток, напряжение, скорость сварки, скорость подачи защитного газа, не вызывает особых сложностей, но в большинстве случаев этих параметров не достаточно для полноценного функционирования системы мониторинга. Зачастую дополнительно требуются данные о глубине разделки, зазоре, превышении кромок, форме разделки, пространственном положении линии стыкового соединения (ЛСС) относительно горелки, для получения которых целесообразно использовать средства технического зрения (СТЗ).

Сенсорные устройства, к которым относятся и СТЗ, позволяют выявить внешние возмущения процесса сварки, благодаря чему существует возможность не только прогнозировать качество процесса сварки, но и управлять его режимом.

Наиболее интересной и сложной задачей управления процессом сварки является разработка системы слежения. Решение этой задачи включает два этапа — определение координат ЛСС и наведение сварочного инструмента на стык.

Прогнозирование качества процесса сварки можно осуществлять с помощью математического моделирования. Для математической модели в качестве исходных используются те же данные, что и для подсистемы управления. В задачу моделирования входит прогнозирование формы валика усиления, а также вероятности появления дефек-

тов типа прожогов и непроваров. В этой области известны работы сотрудников Тульского государственного университета под руководством д-ра техн. наук В. А. Судника [1] и ИЭС им. Е. О. Патона [2]. Разработанные математические модели учитывают тепловые, термодинамические и гидродинамические процессы, происходящие в сварочной ванне. Эти работы носят скорее теоретический характер, поскольку в реальном масштабе времени в виду сложности моделей их практическое применение ограничено.

На практике для прогнозирования качества сварного соединения используют данные о глубине проплавления с обратной стороны сварочной ванны, полученные с помощью СТЗ [3].

Целью настоящей работы является рассмотрение проблем построения системы мониторинга технологического процесса дуговой сварки для трубосварочных станков.

В ИЭС им. Е. О. Патона создана система мониторинга сварочного процесса применительно к трубному производству, в которую входят три подсистемы: контроля проплавления с обратной стороны сварочной ванны, контроля формирования сварного шва трубы и слежения за стыком.

Подсистема контроля проплавления с обратной стороны сварочной ванны. В этой подсистеме в качестве контролируемых параметров используют площадь, ширину и длину жидкой фазы металла. Указанные параметры позволяют выявить возможность появления большого количества дефектов сварного соединения — непроваров, прожогов, отклонений от заданной геометрической формы. Определить глубину проплавления можно исходя из площади жидкой фазы металла с обратной стороны сварочной ванны, а по длине и ширине жидкой фазы металла можно оценить удельное тепловложение и обоснованно выбрать скорость сварки. Перечисленные параметры очень важны, поскольку позволяют учесть влияние температуры окружающей среды на сварочный процесс. Ширина сварочной ванны с обратной стороны и глубина проплавления контролируются встроенными в зону сварки термопарами или методом акустической эмиссии. Оба эти метода являются контактными, в связи с чем на практике они применяются ограничено.

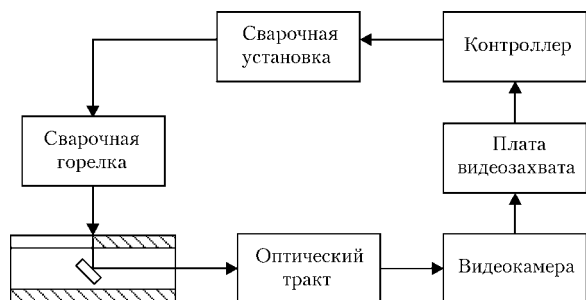


Рис. 1. Структурная схема подсистемы контроля проплавления при сварке

Специалисты ИЭС им. Е. О. Патона для измерения размеров жидкой фазы металла с обратной стороны сварочной ванны предложили использовать оптический метод. Структурная схема подсистемы контроля проплавления сваркой показана на рис. 1.

Указанный метод позволяет осуществить оценку температурного поля сварочной ванны изнутри трубы. Сенсор состоит из двух основных частей — зонда и видеокамеры. Плата видеозахвата предназначена для преобразования видеосигнала в цифровой. Контроллер выполняет видеообработку в реальном масштабе времени, в результате которой определяют «изотермические области» (рис. 2).

С помощью контроллера также выполняют оценку геометрических параметров (ширины, длины, площади) области изображения сварочной ванны с максимальной яркостью, которая соответствует жидкой фазе. На основании измерений обратной стороны сварочной ванны осуществляют управление параметрами сварки.

Подсистема контроля формирования сварного шва трубы. Наибольшую сложность представляет применение подсистемы контроля формирования сварного шва в технологическом процессе сварки трубы малого диаметра. Это обусловлено тем, что образовавшийся после сварки валик усиления имеет незначительную высоту (как правило, меньше миллиметра). Использование прецизионной системы измерения в заводских условиях практически невозможно из-за вибрации. Для контроля ширины валика усиления предложен хорошо известный метод светового сечения. Телевизионный сенсор состоит из двух блоков — оптического генератора световой плоскости и

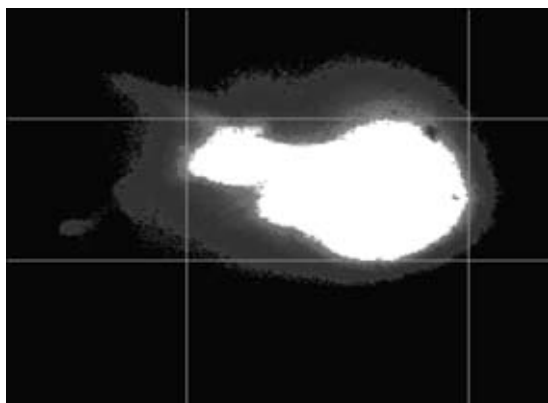


Рис. 2. Оценка температурного поля сварочной ванны изнутри трубы

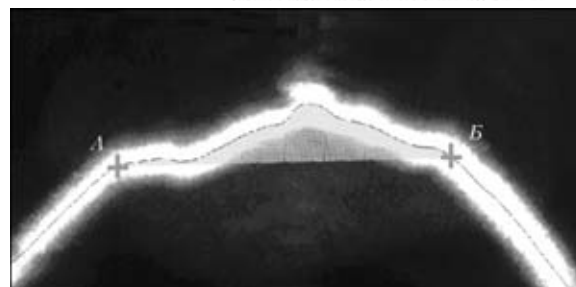


Рис. 3. Измерение параметров валика усиления: А, Б — см. объяснение в тексте

видеокамеры. Световая плоскость ориентирована под некоторым (триангуляционным) углом к оси визирования видеокамеры. При пересечении световой плоскости с поверхностью трубы образуется световая полоса, полностью повторяющая рельеф свариваемых поверхностей в зоне формирования сварного шва (рис. 3). Видеоизображение передается в блок обработки и управления, где после его фильтрации определяются основные геометрические параметры сварного шва.

Разработанная система предназначена для станков плазменной сварки нержавеющей труб без присадочной проволоки (рис. 4). Во время плазменной сварки образуется жидкая фаза металла. Поверхность жидкого металла при условии смачиваемости условно приобретает форму плоскости, искаженную макронеровностями, являющимися следствием динамических процессов в сварочной ванне. В задачу видеообработки входит нахождение точек (А, Б см. на рис. 3) встречи условной горизонтальной плоскости с поверхностью трубы, расстояние между которыми соответствует ширине валика усиления.

Подсистема работает в реальном масштабе времени. Рабочая длина волны оптического генератора световой плоскости составляет 630...670 нм. Видеокамера оснащена узкополосным интерференционным и поляризационным фильтром, что позволяет минимизировать влияние сварочной дуги и увеличить соотношение сигнал-шум. Отличительной особенностью указанной системы является ее инвариантность к различным видам помех таким, как сварочные брызги, царапины, ржавчина, нагар, заусенцы, следы фрезы или резца, блики, засветки от дуги и др.

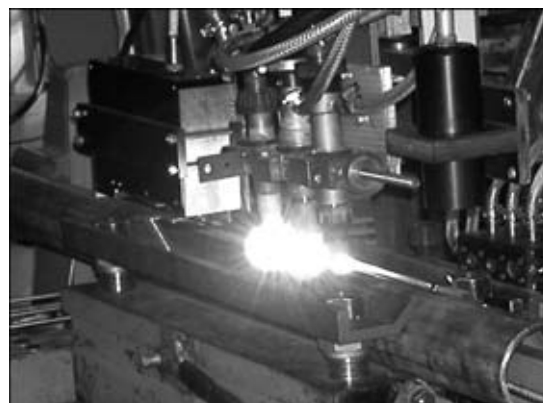


Рис. 4. Макет трубосварочного стана



По изображению валика усиления система автоматически определяет его площадь и высоту, а также геометрические характеристики подрезов.

Подсистема слежения за стыком. Для направления сварочной горелки по стыку реализована следящая система с обратной связью (рис. 5). Сигнал ошибки является разностью между координатами линии стыкового соединения и положения сварочного инструмента. В основу работы регулятора положен пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления, отражающий прямо пропорциональную зависимость значения управляющего воздействия от суммы взвешенных значений воздействия отклонения, интеграла и производной по времени от него.

В качестве датчика обратной связи для геометрической адаптации используется СТЗ. В основу ее положен телевизионный метод слежения за стыком с зазором, близким к нулю [4], базирующийся на возникновении светотеневого перехода при освещении стыка источником рассеянного света. Источник рассеянного света представляет собой светодиодную матрицу. Равномерность освещения достигается за счет того, что диаграммы направленности излучения светодиодов взаимно пересекаются, а расстояние от осветителя до свариваемых поверхностей намного превышает размеры светодиодов. В подсистеме слежения предусмотрено адаптивное управление яркостью источника рассеянного света в зависимости от коэффициента освещенности свариваемых поверхностей. Управление яркостью осуществляется с помощью контроллера, расположенного в корпусе сенсора. Обмен данными между контроллером управления яркостью и системой слежения реализуется на базе интерфейса RS 485.

Сварочная дуга является сильным источником оптических помех. Для защиты видеокамеры от оптических помех применяется интерференционный светофильтр, рабочая длина волны которого выбирается из следующих условий: видеокамера должна иметь достаточную чувствительность в диапазоне длин волн, пропускаемых интерференционным фильтром; световое излучение дуги при сварке по возможности минимальное в рабочем диапазоне интерференционного светофильтра.

Для обоснованного выбора рабочего диапазона интерференционных светофильтров изучены спек-

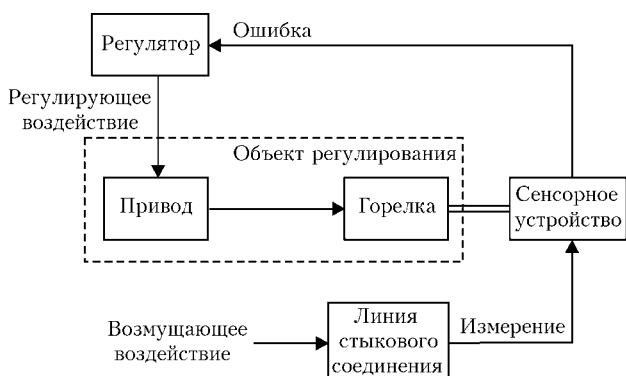


Рис. 5. Структура замкнутой системы управления

тральные характеристики аргонодуговой и плазменной сварки [5].

Стык, освещенный рассеянным светом, на изображениях имеет вид узкой темной полосы. Исходное изображение, представленное массивом чисел с целью усиления перепада яркости подвергается избирательно согласованной фильтрации. Различные дефекты в виде царапин, ржавчины, окалин, следов фрезы вблизи стыка являются случайными помехами, которые могут привести к значительным ошибкам при определении координат стыка. Для исключения ошибок при обнаружении стыкового соединения разработана математическая модель распознавания образа стыкового соединения, позволяющая значительно повысить вероятность обнаружения линии стыкового соединения на зашумленных изображениях. В математической модели реализован переход от цифрового изображения к пространству объектов. По имеющимся априорным данным выносятся решение о принадлежности объекта к одному из классов, соответствующему стыковому соединению или помехе (задача распознавания образов). Объекты, принадлежащие к классу стыкового соединения, объединяются в один, вычисляются параметры этого объекта, а далее объект заменяется аппроксимирующей прямой (рис. 6, 7).

Главным достоинством разработанной подсистемы является высокое быстродействие (до 25 кадров/с), что позволяет осуществлять слежение при скорости сварки до 100 м/ч. Как правило, системы слежения за стыком в сварочном производстве отличаются транспортным запаздыванием. Происходит накопление отклонений от заданной траектории на некотором участке, находящемся в данный момент в поле зрения видеокамеры. Отработка отклонений приводами направления сварочной горелки осуществляется с задержкой. Время задержки рассчитывается по формуле

$$t = \frac{l}{\vartheta},$$

где ϑ — скорость сварки; l — расстояние между электродом и осью визирования видеокамеры. Следовательно, чем меньше l , тем выше точность системы слежения. Обычно стремятся установить

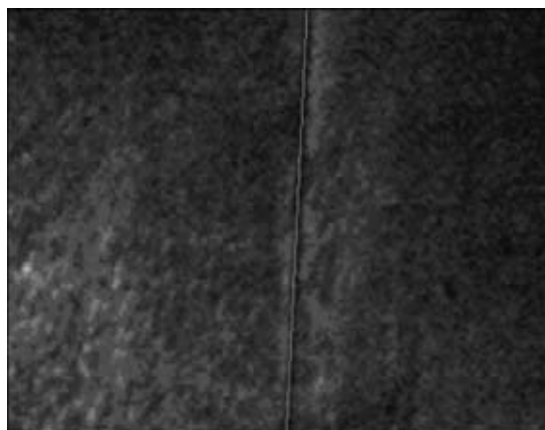


Рис. 6. Определение ЛСС с зазором, близким к нулю

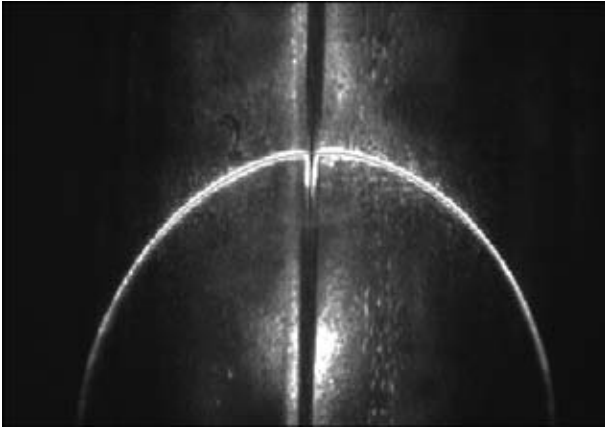


Рис. 7. Обработка изображения комбинированного телевизионного сенсора

систему слежения таким образом, чтобы значения l не превышали 100...150 мм.

В разработанной системе слежения указанный недостаток удалось устранить. Если допустить, что на расстоянии l траектория линии стыкового соединения прямолинейна, то отклонение горелки от траектории можно рассчитать по формуле

$$\Delta = l \operatorname{tg} \alpha + \frac{r}{\cos \alpha},$$

где α — угол между аппроксимирующей прямой и прямой, соединяющей ось визирования видеокамеры с центром электрода; r — расстояние от оси визирования видеокамеры до аппроксимирующей прямой.

Данный способ позволяет определить текущее отклонение горелки от линии стыкового соединения с погрешностью 0,1 мм. Для большинства сварочных процессов достаточно осуществлять наведение сварочного инструмента на стык с погрешностью, составляющей половину диаметра электрода. Чтобы избежать перехода системы слежения в колебательный режим, введены ограничения на чувствительность к изменению параметров объекта управления.

Если техническое задание для подсистемы слежения за стыком предусматривает слежение за

ЛСС по высоте, то сенсор дополнительно оснащается оптическим генератором световой плоскости, а значения высоты стыка определяют таким же образом, как и в триангуляционных СТЗ. Сложность заключается в обработке видеоизображений (рис. 7), поскольку источник рассеянного света создает помехи при выделении световой полосы. Данный метод разработан сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона и носит название комбинированного.

Для экспериментальной проверки адекватности математической модели управления технологическим процессом дуговой сварки искусственно вносили возмущения в режим сварки такие, как изменение положения и расстояния до ЛСС. Система управления незамедлительно компенсировала все внешние возмущения, при этом глубина проплавления оставалась постоянной, а центр сварочной горелки всегда находился над ЛСС.

Проведенные эксперименты показали высокую надежность разработанной автоматической системы мониторинга трубосварочных станков. Рассмотренные системы позволяют наилучшим образом строить автоматические системы управления сварочным производством и автоматизировать производство сварочных конструкций различного класса.

1. Судник В. А., Рыбаков А. С., Зайцев О. И. Математическое и программное обеспечение TIGSIM для анализа процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне // Материалы 4-й Всерос. науч.-техн. конф. «Компьютерные технологии в соединении материалов», г. Тула, 2004 г. — <http://comhightech.tsu.tula.ru/weldsim>.
2. Математические методы в сварке АН УССР. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — 176 с.
3. Intelligent method for sensing, modeling and control of pulsed GTAW: Pt 1: Bead-on-plate welding / S. B. Chen, Y. J. Lou, L. Wu, D. B. Zhao // Welding J. — 2000. — № 7. — P. 151–163.
4. Оптический сенсор для слежения за стыком при размерах зазора, близких к нулю / Ф. Н. Кисилевский, Г. А. Бутаков, В. В. Долиненко, Е. В. Шаповалов // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 51–52.
5. Кисилевский Ф. Н., Шаповалов Е. В. Определение оптимальной длины волны осветителя в системах технического зрения дуговой сварки // Там же. — 2003. — № 8. — С. 52–53.

The welding process monitoring and control system for a pipe welding mill has been developed. The system consists of three sub-systems: control of penetration from the back side of the weld pool, control of the pipe weld formation and weld tracking. Designs of these sub-systems using a technical vision system, as well as hardware and algorithmic methods for minimising the effect of optical (blinks and flashes due to the welding arc) and mechanical (scratches, rust, burrs) interferences, are considered. The system provides high real-time measurement accuracy.

Поступила в редакцию 19.04.2005,
в окончательном варианте 15.07.2005