

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

*Черниговский государственный технологический университет, Чернигов, Украина

**Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого, Черкассы, Украина

Анотація. У статті розглядається концепція багатопараметричного адаптивного керування процесом електронно-променевого зварювання на основі застосування технологій візуалізації. Представлені моделі області спостереження за технологічним процесом, методи отримання інформаційних ознак, оцінка їх якості та способи інтерпретації в задачах керування параметрами зварювального процесу.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, технічний зір, методи візуалізації, адаптивне управління.

Аннотация. В статье рассматривается концепция многопараметрического адаптивного управления процессом электронно-лучевой сварки на основе применения технологий визуализации. Представлены модели области наблюдения за технологическим процессом, методы получения информационных признаков, оценка их качества и способы интерпретации в задачах управления параметрами сварочного процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, техническое зрение, методы визуализации, адаптивное управление.

Abstract. The article deals with the concept of multiparameter adaptive control of the process of electron-beam welding. The article also focuses on the observation field models, methods of information signs obtaining, quality evaluations and their interpretations in the tasks of welding parameters control.

Keywords: electron-beam welding, computer vision, visualization methods, adaptive control.

1. Введение

Современные технологии сварочного производства предоставляют возможности для изготовления узлов, к которым выдвигаются повышенные требования к качеству соединения. Однако максимальное проявление преимуществ конкретной технологии требует обеспечения определенных условий протекания технологического процесса. Природа процессов и роль конкретных факторов, ведущих к образованию соединения в процессе сварки, остаются окончательно не установленными. Кроме обеспечения проплавления в зоне стыка заготовок с необходимыми параметрами глубины и ширины, обычно выдвигается и требование минимизации зоны термического влияния на свариваемый материал с целью минимизации ухудшения его физико-механических свойств вследствие рекристаллизации. Данное утверждение является справедливым и в отношении такого вида сварки, как электронно-лучевая, что находит отражение в особенностях конструкции технологического оборудования и структуры алгоритмов управления [1].

Технологический процесс электронно-лучевой сварки определяется параметрами заготовки детали (параметры материала, параметры качества подготовительных технологических операций), параметрами технологического оборудования, параметрами технологического процесса (траектория перемещения электронного луча, скорость перемещения, сила тока). Для достижения высоких показателей качества сварного соединения, решения задачи минимизации побочного воздействия технологического процесса на структуру обрабатываемого материала необходимо обеспечить надежность функционирования сварочного комплекса и контроль технологического процесса.

В настоящее время управление технологическим процессом на конечном участке сварки осуществляется посредством параметров траектории перемещения. Сущность управления заключается в согласовании траектории перемещения центра электронного луча с текущим положением осевой линией стыка свариваемых деталей [1]. Другие параметры технологического процесса на элементарном участке траектории движения (скорость перемещения, сила тока электронного пучка) задаются на этапе формирования технологического процесса и в ходе его отработки остаются неизменными. Предполагается, что геометрия заготовки и физико-химические свойства материала на элементарном участке сварного процесса являются прогнозируемыми и стабильными. Управление процессом сварки не учитывает также возможные флуктуации параметров сварочного оборудования (электронной пушки, привода, системы фокусирования электронного луча, блока питания и т.д.).

Однако реальные условия протекания технологических процессов в общем случае характеризуются изменчивостью параметров всех составляющих производственной системы, метрические характеристики и значимость которых могут быть различными в зависимости от вида и конкретных параметров технологического воздействия. Нестабильность параметров производственной системы является причиной появления дефектов изделия. В процессе электронно-лучевой сварки с дефектами сопряжены следующие причины:

- отклонение центра электронного луча от осевой линии стыка заготовок детали;
- аномалии распределения плотности энергии по сечению электронного луча;
- неравномерности структуры материала по объему заготовки детали в зоне формирования сварного шва;
- флуктуации или дрейф силы тока относительно оптимального значения.

Приведенный перечень показывает, что эти причины связаны как со свойствами объекта обработки, так и со средствами технологического воздействия, а также влиянием возмущающих факторов среды. Для указанного вида обработки они могут стать причиной возникновения дефектов следующего характера:

- локальные непровары;
- смещение сварного шва относительно оси стыка заготовок;
- изменение ширины зоны теплового влияния и периода релаксации, ведущее к изменению структуры материала в зоне сварного шва;
- образование неоднородностей в объеме сварного шва с различными метрическими параметрами (геометрические размеры, частота появления на единичном участке сварки, степень отклонения от эталонного значения параметра).

Перечисленные дефекты могут иметь различную степень значимости при определении качества детали. Кроме того, они могут иметь обратимый или необратимый характер. Данное обстоятельство должно приниматься во внимание при принятии решения о возможности и целесообразности постобработки с целью приведения показателей качества изделия к уровню установленных требований.

Очевидным представляется предположение о том, что повышение показателей качества управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки и, как следствие, повышение качества сварных изделий возможно за счет использования большего числа управляющих параметров. Включение в модель управления, наряду с траекторией перемещения электронного луча по сварному стыку, параметров скорости перемещения и силы тока должно обеспечить адаптивное управление с компенсацией флуктуации всех перечисленных параметров процесса.

При обеспечении многопараметрического адаптивного управления процессом электронно-лучевой сварки возникает необходимость решить ряд задач:

1. Задача наблюдения за пятном.
2. Задача слежения за стыком.

3. Задача фокусировки электронного луча.
4. Задача управления скоростью при наличии аномалий.
5. Задача управления силой тока при наличии аномалий.

2. Общая модель управления процессом

Достижение более высоких показателей адаптивности системы управления возможно обеспечить модификацией процедур формирования управляющих воздействий на основе данных мониторинга технологической зоны. При этом мониторинг может быть организован по различным каналам наблюдения. Технологические особенности сварки позволяют ожидать эффективного использования потенциальных возможностей мониторинга зоны формирования сварного шва по визуальному каналу.

В зоне сварки происходят тепловые явления, вызывающие образование расплава в ванне, движущейся вдоль линии стыка заготовок. Тепловое поле, наблюдающееся в зоне сварки, зависит от ряда факторов, к которым можно отнести энергетические, геометрические и временные параметры электронного пучка, характеристики материала заготовок и качество стыка между ними, скорость перемещения электронного луча относительно стыка, параметры вакуума в сварочной камере. Отклонение текущих параметров процесса от оптимальных может стать причиной появления неоднородностей теплового поля в зоне взаимодействия электронного луча с поверхностью детали и в зоне теплового влияния. Поэтому оценка пространственных и спектральных характеристик теплового поля может быть использована для корректировки параметров различных составляющих производственной системы, оказывающих влияние на тепловые эффекты процесса.

Сварка сопровождается излучением в зоне формирования сварного шва в широком диапазоне частот, в том числе в инфракрасном и видимом диапазонах, которое может быть зафиксировано с помощью видеокамеры. Энергетические и спектральные характеристики теплового излучения абсолютно черного тела, каким можно считать в первом приближении свариваемую деталь, зависят лишь от температуры и описываются законами Вина, Стефана-Больцмана, Планка [2]. Перечисленные законы устанавливают, в частности, зависимость от температуры частоты, на которой наблюдается максимальная интенсивность излучения, количества излучаемой энергии и интенсивности излучения по спектральным составляющим.

Решая обратную задачу, параметры теплового поля в области формирования сварного соединения можно установить по спектральным характеристикам изображений технологической зоны, полученных с помощью средств технического зрения.

Источником информации для принятия решений при управлении процессом сварки может быть световое пятно, образующееся в зоне сварки. Значимыми параметрами изображения являются яркость пятна и его геометрия, а также их временные характеристики. Такой подход к трактовке данных мониторинга позволяет использовать видеонаблюдения в качестве канала обратной связи для управления по интегральному показателю сварочного процесса – плотности энергии электронного луча.

Таким образом, наблюдаемыми параметрами видеомониторинга технологической зоны формирования сварного соединения являются оптические характеристики светового пятна в зоне сварки. Предполагается, что наблюдаемые параметры находятся в зависимости от параметров управления технологическим процессом.

Параметрами управления для процесса электронно-лучевой сварки являются сила тока электронного луча, настройки его фокусировки, траектория перемещения центра луча по сварному стыку и скорость перемещения на элементарном участке. Кроме того, такими параметрами могут быть уровень вакуума в сварочной камере и текущие характеристики стыка заготовок.

Применение каналов видеонаблюдения и систем технического зрения в целом для задач управления производственными процессами имеет ряд преимуществ. Во-первых, это бесконтактный способ получения первичного сигнала, что позволяет минимизировать влияние вспомогательных операций на контролируемый процесс. Во-вторых, используется высокий потенциал информативности видеоданных, предоставляющих комплексную информацию о технологическом процессе. Получаемая видеоинформация может использоваться при формировании массивов данных для систем прогнозирования состояний компонентов производственной системы, создавать базу для определения статистических оценок, использования экспертных систем и т.п. Наличие такой информации позволяет применять в адаптивных алгоритмах регуляторы с прогнозирующими свойствами. В-третьих, системы видеонаблюдения могут быть построены из качественных компонентов относительно невысокой стоимости. Они характеризуются гибкостью применения, высокой степенью интегрированности видеосенсоров в компьютерные системы управления производственными процессами. Следует отметить также достаточно высокий уровень развития технологий обработки растровых изображений, позволяющий проводить обработку и использование видеоданных технологических данных в реальном масштабе времени.

3. Цели и средства видеомониторинга сварочного процесса

Наблюдение за пятном сварочной ванны и зоны термического влияния сварочного процесса в общем случае должно обеспечивать выполнение следующей последовательности операций:

- получение изображения зоны сварки;
- сегментация изображения;
- интерпретация результатов обработки изображения.

Для получения первичной видеоинформации могут быть применены сенсоры различной структуры и принципа действия, чувствительные к изменению интенсивности и спектра излучения в актуальном для конкретной задачи частотном диапазоне.

Типовым решением в системах технического зрения (СТЗ) является применение сенсора на основе приборов с зарядной связью (ПЗС). Элементы ПЗС-матрицы формируют сигналы, пропорциональные яркости исходного изображения. Однако применение видеосенсоров данного типа для видеомониторинга зоны сварочного процесса должно учитывать наличие на объекте наблюдения областей с очень высокой яркостью. В связи с этим необходимо обеспечивать соответствующий динамический диапазон сенсора либо проводить трансформацию светового потока из области наблюдения в пределах оптического тракта СТЗ.

Учитывая сложность механизмов формирования визуальных эффектов, в СТЗ необходимо принимать меры по снижению влияния различных помех, связанных с бликами, тенями, засветками, изменением конфигурации отражающих поверхностей, преобразованиями спектра и т.п. В системах СТЗ, применяемых в сварочном производстве, используют структурированную лазерную подсветку технологической зоны [3]. При этом для повышения соотношения сигнал-шум в объективе видеокамеры устанавливаются поляризационный светофильтр с плоскостью поляризации, параллельной плоскости поляризации лазерного излучателя. При выборе наиболее эффективного оптического диапазона наблюдения учитывается также уровень паразитных влияний, создаваемых источником энергетического воздействия. Однако следует заметить, что сужение динамического диапазона камеры может отрицательно сказаться на информативности видеоданных в части отображения температурного поля.

Наряду с аппаратными усовершенствованиями, для снижения уровня оптических искажений в зоне сварочного процесса применяются программные методы фильтрации исходного изображения, в том числе с адаптивными свойствами [3].

В настоящее время наблюдается тенденция объединения в структуре датчиков как функций получения изображения, так и функций его предварительной обработки. Такой подход реализован, в частности, в датчиках технического зрения серии FQ компании Omron [4, 5]. Указанные датчики предназначены для распознавания естественных цветов и автономно используются для контроля качества по таким параметрам, как присутствие, расположение и другим характеристикам продукции. Датчик включает камеру, систему светодиодной подсветки, процессор, терминалы входных/выходных сигналов, комплектуется средствами настройки и контроля. В модификации FQ-S2 датчик обеспечивает до 32 одновременных измерений и 32 регистрируемых сценариев, а также предусматривает компенсацию положения при видеозахвате подвижных объектов. Обеспечивается принятие решения по признакам геометрической формы, положения, расстояния между объектами, по размерам и цвету.

Значительный интерес в контексте видеонаблюдения сварочного процесса представляет реализация в указанных датчиках встроенных функций обработки изображений. В частности, при использовании внешнего освещения актуальной является функция настройки баланса белого, поскольку фиксируемое изображение может иметь цвета, отличающиеся от натуральных цветов объекта. Предусмотрена также возможность улучшения качества изображения металлических и других блестящих поверхностей устранением бликов, поскольку для объектов указанного типа четкие изображения не могут быть получены при стандартных настройках яркости. При этом для неподвижных объектов используется встроенная HDR-функция, обеспечивающая расширение динамического диапазона при наблюдении объектов, имеющих контрастные светлые и темные зоны. В этом режиме выполняется получение нескольких изображений с различной выдержкой и их объединение. Объединение изображений с различным уровнем яркости происходит таким образом, что результирующее изображение будет менее контрастным. Однако, если объект перемещается в процессе получения изображений, то результирующее изображение окажется размытым. Для движущихся объектов отблески отраженного света могут быть устранены с изображения при помощи установки на датчик поляризационного фильтра.

Датчики с аналогичными свойствами разработаны также для неоптических диапазонов излучения.

Для измерения параметров излучения зоны формирования сварного соединения также могут быть применены малогабаритные дифракционные спектрометры и пирометрические ПЗС-линейки, обеспечивающие регистрацию широкого спектра излучений в диапазоне 200–1100 нм со скоростью 0,1–10 мс. Средства современной оптической пирометрии позволяют проводить измерение интенсивности излучения на 1000–2000 длин волн. Сравнение полученного спектра с планковским дает возможность определить температуру металлов и других материалов как ниже точки плавления, так и превышающую её (в диапазоне 800К–1400К) [6]. При этом температура определяется как параметр наблюдаемого распределения интенсивности излучения. Вместе с тем, пирометрические методы дают данные об усредненном значении температуры всей излучающей области для периода измерения, что затрудняет получение данных о пространственно-временном изменении теплового режима.

4. Модели светового пятна

Форма, ориентация и линейные размеры полученного с помощью СТЗ изображения светового пятна находятся в зависимости от силы тока электронного луча, параметров его фокусировки, скорости движения относительно заготовок и точности попадания на стык. Наличие в пределах наблюдаемой зоны локальных областей с аномальными спектральными характеристиками может быть связано с неоднородностью структуры материала, технологическими дефектами сварочного процесса или его подготовки, пространственно-

временными особенностями структуры (многомодовость, пульсация и т.п.) энергетического потока. Для организации управления сварочным процессом необходимо обеспечить нахождение в поле полученной с помощью СТЗ видовой сцены технологически значимых визуальных признаков и определение их параметров. Качество управления предполагает адекватность выбора модельного представления наблюдаемой области.

Для управления процессом сварки могут использоваться модели сварочного пятна различной степени сложности. Простая модель пятна может быть задана следующим набором параметров: центр, радиус, усредненный показатель яркости, пороговое значение яркости. Данная модель предоставляет достаточную информацию для слежения за положением сварочной ванны относительно заготовки и оценки энергетических параметров процесса.

Более сложные модели могут предусматривать распределение яркости по площади пятна, а также более сложную геометрию пятна. Такие модели предоставляют возможность более адекватно отобразить динамику процессов теплопереноса, выделить зоны распределения жидкой и твердой фаз, осуществлять поиск технологически значимых артефактов. В общем случае при движении центра электронного луча вдоль прямолинейного стыка заготовок с анизотропными свойствами наблюдается симметрия в распространении тепловой энергии.

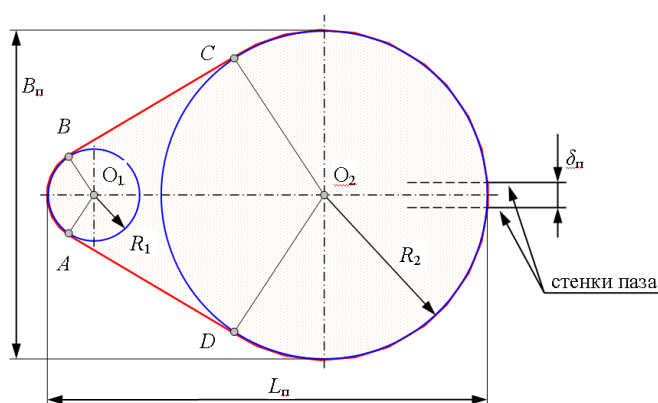


Рис. 1. Модель наблюдаемой области теплового поля

рис. 1. Модель представлена графическими примитивами – окружностями и отрезками прямых – и может быть задана радиусами и расстоянием между центрами окружностей.

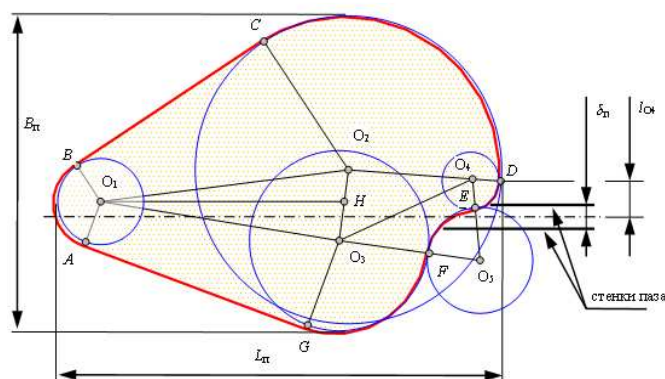


Рис. 2. Искажение формы светового пятна при смещении электронного луча относительно стыка

Вид модели области формирования сварного изображения и зоны релаксации, соответствующей данной технологической ситуации, представлен на рис. 1. Модель представлена графическими примитивами – окружностями и отрезками прямых – и может быть задана радиусами и расстоянием между центрами окружностей.

При смещении траектории движения центра электронного луча с оси стыка заготовок произойдет перераспределение подводимой энергии между заготовками, сопровождающееся искажением первичного теплового поля. Модель видимой области теплового поля для данной технологической ситуации представлена на рис. 2. Как видно, исходная модель (рис. 1) трансформируется в более сложную, описываемую более сложной конфигурацией большего количества примитивов. Анализ и классификация технологических ситуаций по изображениям с применением данной модели светового пятна может проводиться по различным критериям.

Перспективным представляется применение оценок на основе критериев кривизны, которые позволяют детектировать прямые линии и окружности [7]. При этом задачи классификации и анализа сводятся к оценке количества и взаимного положения выделенных графических примитивов.

Следует заметить, что в практических задачах эффективными могут быть модели, описывающие зону формирования сварного соединения прямоугольной областью, задаваемой шириной и длиной участка с определенным уровнем яркости.

5. Экспериментальные исследования и интерпретация результатов

Для исследования алгоритмов оценки параметров технологического процесса по растровому представлению изображения его теплового поля использовались имитационные модели зоны сварки. В ходе предварительных исследований имитация визуальных эффектов сварочного процесса проводилась с помощью стенда в составе веб-камеры, ультраяркого светодиодного излучателя, компьютера и образцов деталей. Полученные на стенде изображения по своим параметрам яркости и спектра близки к изображениям сварочного пятна в характерных технологических режимах. Данные модели в целом применимы для исследования системы технического зрения, однако визуальные эффекты, обусловленные условиями проведения видеосъемки, вызывают искажения как распределения яркости, так и спектральных характеристик в пределах зоны наблюдения. Указанные факторы влияют на работу алгоритмов идентификации, снижая достоверность определения пределов световых зон. В общем случае качество системы технического зрения можно повысить как изменением условий проведения видеонаблюдения, так и дополнительными процедурами предварительной обработки видеоданных.

Полученные модельные изображения были использованы в качестве исходных данных для выделения областей заданной яркости методом градиентного спуска. Несмотря на некоторую неустойчивость алгоритма, в целом задача выделения искомой области относительно указанной начальной точки контура решалась с приемлемыми показателями качества. На рис. 3 показано множество точек эквипотенциального контура с указанием локального направления градиента и перпендикулярного ему направления перехода на позицию поиска следующей точки. Полученное по признаку значения градиента яркости множество точек достаточно точно охватывает область высокой яркости, которой в эксперименте моделировалась сварочная ванна. Вместе с тем, примененный метод демонстрирует избыточность массива точек для формирования описания искомой области. Минимизация в этом направлении затруднительна вследствие наличия на изображении точек бифуркации, снижающих устойчивость и точность алгоритма. Проведенные эксперименты также подтвердили предположение о необходимости компенсации спектральных и яркостных искажений видовой сцены, связанных с геометрическими, текстурными и отражающими особенностями поверхности детали и окрестности зоны наблюдения.

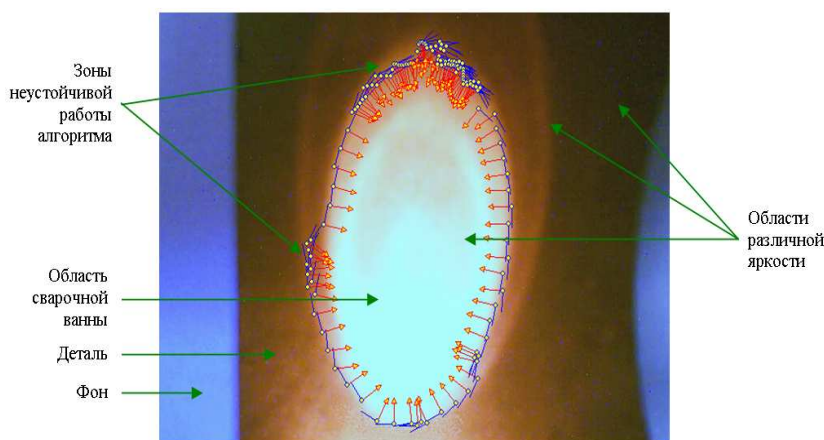


Рис. 3. Определение границы светового пятна на 32-битовом цветном изображении методом градиентного спуска. Базис ядра фильтра – пять пикселей

Для оценки параметров алгоритмов выявления информативных признаков процесса сварки, с целью минимизации влияния на формирование видовой сцены указанных выше факторов искажения, были использованы также компьютерные модели в виде

синтезированных цветных растровых изображений. При формировании изображений, кроме заданного набора теплофизических и технологических параметров, варьировались также аддитивные шумы, масштаб, степень асимметрии и угол поворота продольной оси

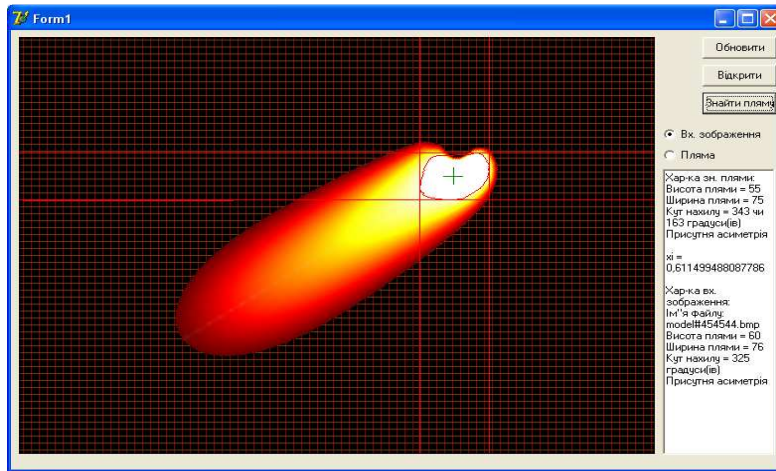


Рис. 4. Определение границы светового пятна и её метрических характеристик методом линейных бинарных шаблонов

исходного образа. Полученные модели пятна фиксированных размеров (50-120 пикселей в продольном и поперечном измерениях) позволили оценить точность выявления технологически значимых показателей при распознавании изображений по методу на основе линейных бинарных шаблонов (рис. 4). В частности, при выявлении пятна без асимметрии ошибка составляет не более 1%, а при наличии у изображения пятна асимметрии – ошибка не превышает

10% как по линейным размерам, так и по ориентации. Вариация точности определения параметров для разных углов поворота оси пятна незначительна. В целом, исследованные алгоритмы позволяют получить прогнозируемые результаты, качество которых приемлемо для достоверного определения информационных признаков характера наблюдаемого технологического процесса.

Несмотря на то, что вопрос выбора наиболее эффективной модели и метода обработки изображения остается открытым, полученные результаты свидетельствуют о возможности решения на основе методов визуализации широкого круга задач контроля параметров сварочного процесса. В частности, по форме и яркости пятна можно определить текущее значение мощности излучения в зоне обработки и её отклонение от номинального значения, что позволяет диагностировать отклонения в работе системы питания и генерации излучения, а также прогнозировать длительность периодов безаварийной работы указанных узлов. При этом ожидаемая точность количественной оценки реальной мощности излучения должна составить 5–10% в зависимости от резолуции изображения. Выявление неоднородности пучка излучения, проявляющейся на изображении неоднородностью яркости пятна, следует связывать с нарушениями работы системы фокусирования и транспортировки излучения, а также со снижением эмиссионных свойств электронной пушки. Выявление асимметрии формы пятна указывает на возможность более точного определения отклонений пятна от оси паза, нарушений зазора или подготовки кромок и т. п. Достижимая точность выявления асимметрии, с учетом полученных данных моделирования, не должна быть ниже 20%, возможные вариации зависят от выбора модели пятна. Возможность диагностировать неоднородность шва либо иные структурные изменения позволяет идентифицировать непроплавления, включения окалины. Во многих случаях повторная обработка таких участков позволяет если не полностью устранить эти дефекты, то значительно повысить эксплуатационные показатели изделия. Локализация дефектов по растровому изображению должна обеспечиваться в случае, когда неоднородность по ширине составляет не менее 30% шва, а протяженность – не менее, чем две ширины шва. Не менее ценной является возможность установления по яркости области обработки и зоны релаксации характера термического влияния, поскольку эта информация позволяет организовать управляющие воздействия, направленные на уменьшение уровня термических напряжений

в зоне обработки или обеспечение формирования необходимых структурных изменений в материале. Средством нормализации при этом могут быть повторный проход, коррекция фокусировки, изменение мощности излучения или скорости обработки. При наличии физико-химических данных о материале заготовок оценка температурного градиента и геометрии зоны термического влияния позволяет определить уровень структурных изменений и прогнозировать механические характеристики соединения.

6. Выводы

Проведенные исследования дают основания утверждать, что визуальный канал наблюдения за зоной формирования соединения имеет значительный потенциал для обеспечения многопараметрического управления процессом электронно-лучевой сварки. Применение методов визуализации позволяет установить по изображению технологической зоны достаточно широкий набор признаков, связанных с параметрами наблюдаемого процесса. Это позволяет учитывать при формировании управляющего воздействия большее количество факторов. Анализ причин проявления визуальных эффектов дает основания ожидать повышения качества технологического процесса путем модификации режимов функционирования подсистем установки электронно-лучевой сварки, которые, кроме отработки заданных перемещений, обеспечивают пространственно-энергетические характеристики электронного луча. Наличие развитых средств и методов получения изображений, их обработки позволяет организовать адаптивное управление в реальном масштабе времени.

Применение СТЗ позволит организовать не только управление процессом сварки, но и выполнить ряд контрольных процедур для определения оценок качества получаемого изделия. Проведение на основании получаемых изображений измерений, вычислений статистических характеристик, выделений технологически значимых артефактов может повысить адресность и адекватность проверочных испытаний. В режиме экспресс-диагностики визуальный канал в ряде случаев позволит провести повторную либо дополнительную обработку с целью устранения обнаруженных локальных дефектов.

Таким образом, применение канала обратной связи на основе СТЗ позволяет организовать адаптивное управление электронно-лучевой сваркой и решить все основные задачи управления технологическим процессом, а также получить дополнительные возможности контроля качества изделий и мониторинга технического состояния оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розробка новітніх електронно-променевиx зварювальних установок на основі модельно-орієнтованого управління / Опис роботи. Т. 2 / О.К. Назаренко, В.М. Нестеренков, В.В. Галушка [та ін.]. – К.: ППМС НАНУ, 2006. – 191 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3-х т. / Савельев И.В. – СПб.: Лань, 2007. – Т. 3. – 320 с.
3. Шаповалов Є.В. Засоби технічного зору як елемент зворотного зв'язку в системах стеження дугового зварювання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів» / Є.В. Шаповалов. – К., 2006. – 22 с.
4. Датчик технического зрения FQ. Проще, чем можно представить / Omron [Электронный документ]. – Режим доступа: http://www.proenergo.ru/doc_pdf/vision/FQ+Brochure+rus.pdf.
5. Датчик технического зрения FQ. Руководство по эксплуатации/ Omron [Электронный документ]. – Режим доступа: http://www.proenergo.ru/doc_pdf/vision/FQ+ShortManual.pdf.
6. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор) / А.Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5 – 28.
7. Семейкина Е.В. Многомасштабная оценка локальной кривизны границ на цветных изображениях / Е.В. Семейкина, Д.В. Юрин // Труды 13-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2011). – М., 2011. – Т. 2. – С. 183 – 186.

Стаття надійшла до редакції 01.02.2013