

*Нгуен Доан Кыонг, В. Н. Лубенко*

### ОСОБЕННОСТИ РОБОТИЗАЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СУДОСТРОЕНИИ

В настоящее время самым распространенным способом соединения материалов в промышленности, особенно в судостроении, является сварка. Сварочное производство развивается бурными темпами, в ряде случаев превосходящими темпы развития других процессов металлообработки. Ведущее место в сварочном производстве по-прежнему занимает дуговая сварка, которая и в ближайшем будущем останется основным видом сварки плавлением. Это объясняется высокой концентрацией тепловой энергии, универсальностью процесса, возможностью сварки в различных условиях и положениях, надежностью и относительно низкой стоимостью оборудования, стабильностью прочностных характеристик сварных соединений, сравнительной простотой механизации процесса дуговой сварки.

Многолетний опыт изготовления судовых корпусных конструкций с применением различных процессов дуговой сварки плавящимся электродом показал, что полностью избежать образования внутренних (поры, шлаковые включения и т. п.) и внешних (отклонения от заданных размеров швов, подрезы и др.) дефектов в сварных швах не удастся даже при строгом соблюдении технологии сварки. Поэтому для достижения необходимого уровня качества сварных швов и соединений ремонт сварных швов производят путем вырубки и заварки участков швов с дефектами.

При изготовлении стальных судовых корпусных конструкций средний уровень такого (исправимого) брака составляет 1,0–1,5 % по длине вырубленных швов или 5–7 % по количеству γ-снимков с недопустимыми дефектами.

Анализ производства сварных конструкций на заводах свидетельствует о том, что причиной такого брака сварных швов является не только несоблюдение технологической дисциплины, но и уровень применяемых технологий, которые не могут обеспечить более высокое качество сварных швов. Исключить возможность образования прожогов и непроваров и других дефектов во многих случаях удастся только за счет пригоночных работ (механическая рубка, кислородная резка, подварка и т. п.), которые одновременно увеличивают трудоемкость, ухудшают условия труда и, что существенно, изменяют площадь поперечного сечения соединения. В результате создаются условия, при которых необходимо обеспечивать неуправляемый переменный объем наплавленного металла в единицу времени или единицу длины шва (этого не может обеспечить технология с постоянным режимом сварки, которая неуправляемо изменяется в связи с несовершенством применяемого сварочного оборудования и колебаниями напряжения во внешней электрической сети).

В связи с этим необходимы принципиально другие технологии и оборудование, которые учитывают условия производства с помощью систем автоматического и адаптивного управления.

Перспективным направлением автоматизации сварочных процессов является использование робототехнических комплексов для сварки (РТК) (сварочных роботов) (рис. 1). Конечной целью создания и применения сварочных роботов является повышение производительности труда и качества продукции. Суммарная технико-экономическая эффективность применения сварочных роботов включает в себя повышение качества сварного соединения, социально-экономический эффект, экономию фонда заработной платы. Социально-экономический эффект достигается за счет освобождения человека от монотонной утомительной работы, исключения травм, заболеваний. Робот может эксплуатироваться в условиях вредной для здоровья человека среды (радиоактивная, химически активная, токсичная и т. д.). Перечисленные факторы с трудом поддаются количественной оценке, однако преуменьшать их значимость недопустимо.

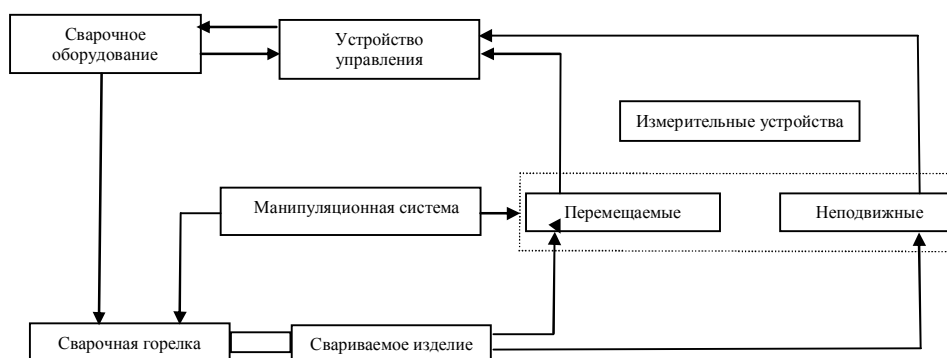


Рис. 1. Состав РТК для сварки

Задача автоматизации перемещения сварочной дуги по заданной или необходимой траектории может считаться решенной для многих видов сварки, а задача адаптивного управления процессом сварки еще далека от своего разрешения [1].

Особенно остро эти задачи стоят при изготовлении сложных, дорогостоящих конструкций аэрокосмического назначения в судостроении, тяжелом машиностроении и т. п. Большие объемы сварочных работ, повышенные требования к квалификации сварщиков, необходимость точного соблюдения технологического регламента обуславливают применение автоматических и автоматизированных систем управления. Возможность контроля и регистрации критических параметров процесса (включая геометрические размеры стыка – зазор, превышение кромок, угол раскрытия разделки и др.) позволяет прогнозировать места расположения дефектов в шве, а путем целенаправленного воздействия на режим сварки в ряде случаев не допускать их возникновения. Реализация таких функций позволит значительно сократить количество и время проведения ремонтных работ.

Большое значение имеет и социальный аспект применения средств автоматизации в сварочном производстве. Он выражается в повышении степени защищенности сварщика от неблагоприятных факторов процесса дуговой сварки (световое излучение, пары металлов, высокое физическое и моральное напряжение, особенно при значительной продолжительности сварки, и др.).

Требования, предъявляемые к средствам роботизации сварочных процессов, обуславливаются особенностями сварных конструкций. Согласно укрупненной классификации по судоконструктивным признакам различают следующие сварные конструкции:

- плоскостные, кривые поверхности с большими габаритами (полотнища палуб, платформ второго дна, обшивка бортовой и днищевой секции);
- листовые типа тел вращения (резервуары, трубы);
- каркасно-решетчатые (плоские и объемные фермы, каркасы шкафов, лестницы между палубами и другие конструкции, состоящие из стержневых элементов различного профиля);
- рамные, состоящие из соединенных сваркой продольных и поперечных балок, распорок и других усиливающих элементов (бимсы и карлины, бортовые стрингеры и рамные шпангоуты, днищевые стрингеры и флоры);
- корпусные, изготавливаемые с использованием заготовок из листа, сортового проката, поковок, отливок, штамповок (станины, пиллерсы между палубами или платформами, корпуса редукторов);
- различные детали машин (сварные валы, шкивы, шестерни, рукоятки, рычаги управления, мелкие кронштейны).

Эффективность применения сварочных роботов в значительной степени зависит от рационального выбора сварных конструкций в качестве объектов роботизированной сварки. Среди сварных конструкций, изготавливаемых с применением дуговой сварки, которая выполняется с использованием ручного труда, преобладают каркасно-решетчатые; рамные; корпусные; различные детали машин.

Указанные сварные конструкции имеют большое количество коротких швов сложной формы, различным образом расположенных в пространстве, что затрудняет механизацию и автоматизацию сварки традиционными методами. Именно здесь решающая роль в освобождении человека от ручного труда принадлежит роботам для дуговой сварки.

Существуют многофункциональные автоматизированные установки для различных видов дуговой сварки: системы Аппрентис фирмы Кемпи для дуговой сварки в защитных газах (рис. 2), система ABW фирмы ESAB для дуговой сварки под флюсом секций котлов [2], сварочный контроллер с использованием сенсора MetaTorck MS900 для сварки неплавящимся электродом в ракетостроении [3]. В то же время подобные системы пока достаточно редки. Основными причинами, сдерживающими их широкое применение, являются значительные трудности при разработке математических моделей и алгоритмов управления процессом формирования сварного шва и отсутствие надежных средств контроля положения и геометрических размеров стыка.

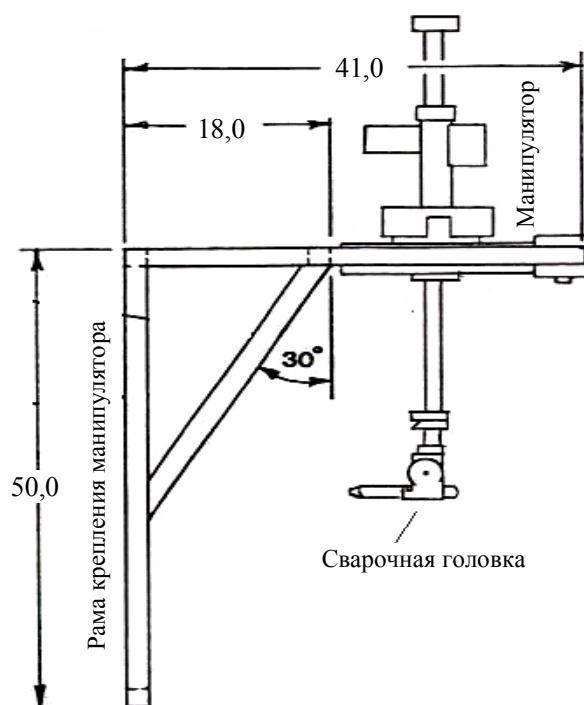


Рис. 2. Схема робота Кемпи – Аппрентис

Программно-управляемый технологический комплекс должен обеспечивать автоматическое управление режимом сварки и направлением сварочной дуги по заданной траектории в зависимости от изменяющихся размеров и формы конструктивных элементов подготовки кромок соединения под сварку и возмущающих воздействий. При этом важно учитывать различные условия сварки стыковых и тавровых соединений, положения сварки (нижнее, вертикальное и др.), значительно влияющие на технику сварки и конструктивные особенности сварочного оборудования.

Способы сварки под флюсом применяют для выполнения швов в нижнем положении, как правило, стыковых прямолинейных или кольцевых (на кантователе) соединений. Для этого способа сварки перспективным является автоматический процесс с числовым программным управлением, который обеспечивает автоматическое слежение за перемещением сварочной дуги по заданной линии, автоматический выбор режима сварки согласно нормативным документам, корректировку режима сварки в зависимости от изменяющихся размеров поперечного сечения соединения по длине и др., а также заданные размеры выпуклости (или катета) шва [4].

Способы сварки плавящимся электродом в защитных газах стальных судовых корпусных конструкций используют в основном для выполнения швов тавровых соединений в любом пространственном положении. В этом случае перспективным является автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом диаметром 1,2–1,4 мм с помощью промышленного сварочного робота, выполняющего в пространстве движения, аналогичные движениям человеческой руки [5].

Эффективность применения сварочных роботов зависит от технологичности сварных конструкций.

Существуют три основных пути повышения технологичности сварных конструкций как предполагаемых объектов роботизированной сварки: изменение сварной конструкции и технологии ее изготовления при заданном типе сварочного робота; выбор сварочного робота, наиболее пригодного для сварки данной конструкции, либо оснащение робота дополнительными техническими средствами; комбинированный («встречный») путь, состоящий в одновременном изменении конструкции и технологии изготовления изделия и выборе или создании наиболее подходящих технических средств для роботизации сварки этого изделия.

Выбор пути повышения технологичности сварных конструкций всегда требует компромисса между рядом противоречивых требований, основные из которых следующие: минимизация времени и затрат, связанных с процессом перевода сварных конструкций на роботизированную сварку; минимизация стоимости изготовления и сборки заготовок под сварку; минимизация стоимости роботизированной сварки. Последняя определяется стоимостью основного оборудования РТК, средств адаптации, сборочно-сварочной оснастки, обслуживания РТК в целом и другими известными факторами.

Выбор оптимального решения производят с помощью технико-экономического анализа, учитывающего конкретные задачи и условия данного производства.

Указанные обстоятельства требуют решения следующих задач: выбор способа дуговой сварки для робототехнических комплексов дуговой сварки (РТКДС); выбор пространственного положения свариваемых соединений; выбор методов и технических средств надежного зажигания дуги и качественной заварки кратера; оптимизация режима сварки; выбор приемов сварки в разных пространственных положениях.

Основными требованиями к РТКДС, связанными с особенностями сварочного производства и объектов дуговой сварки, являются:

- наличие манипуляционной системы со значительным числом степеней подвижности (5–8 и более), обеспечивающей заданные перемещения сварочного инструмента и изделия;
- необходимость применения в большинстве случаев методов и средств автоматической корректировки траектории движения сварочного инструмента относительно изделия и параметров режима сварки индивидуально для каждого экземпляра сварной конструкции;
- защита механизмов и средств автоматизации РТКДС от воздействий сварочного процесса и условий сварочного производства;
- использование в РТКДС наиболее производительных сварочных процессов.

К манипуляционным системам РТКДС предъявляют следующие основные требования:

- необходимые размеры зоны обслуживания;
- доступность свариваемых швов для сварочной горелки, закрепленной на последнем звене манипулятора инструмента;
- удобство загрузки изделий вручную или с помощью транспортных средств, смены катушек со сварочной проволокой, наблюдения за зоной сварки и наладки сварочного инструмента;
- достаточная скорость перемещения или вращения звеньев;
- необходимая грузоподъемность;
- обеспечение заданной точности отработки заданных положений или траекторий движения.

Возможны следующие четыре способа относительного перемещения сварочного инструмента и изделия:

- изделие не изменяет своей ориентации в пространстве в течение всей операции (остается неподвижным или равномерно движется по конвейеру), а сварочный инструмент выполняет все перемещения, необходимые для сварки. Данный способ может быть использован, когда все швы доступны для манипулятора (инструмента) или когда переориентация изделия затруднена;
- изделие периодически изменяет свою ориентацию в пространстве с помощью манипулятора (кантователя или позиционера), но во время отдельных сварочных переходов остается неподвижным, а сварочный инструмент выполняет все перемещения, необходимые для сварки, с учетом изменения положения изделия при его переориентации. Этот способ, применяемый когда необходима периодическая переориентация изделия, является наиболее распространенным;
- изделие и инструмент при сварке одновременно находятся в состоянии непрерывного движения, обеспечивая перемещение сварочного инструмента вдоль линии соединения с заданной скоростью с одновременным поддержанием зоны сварки во всех точках шва в заданном

пространственном положении. Этот способ требует контурного взаимосогласованного управления перемещением всех звеньев манипуляторов инструмента и изделия. Он является оптимальным для дуговой сварки изделий со швами сложной формы, т. к. позволяет производить сварку в оптимальном (например, нижнем) положении, когда допускаются наиболее напряженные режимы сварки и обеспечиваются наилучшие условия формирования сварного шва;

– изделие выполняет все перемещения, необходимые для сварки относительно неподвижно закрепленного сварочного инструмента. Этот способ предполагает применение промышленного робота с развитой кинематикой и достаточной грузоподъемностью в качестве манипулятора изделия. Его достоинством является относительная простота реализации (использован единственный манипулятор, выполняющий и сварочные, и транспортные перемещения), а основным ограничением – размеры рабочей зоны и грузоподъемность манипулятора.

В качестве манипулятора сварочного инструмента в РТКДС, как правило, используют промышленные роботы, имеющие прямоугольную (ПКС) либо антропоморфную (АКС) кинематическую структуру. Основные достоинства и недостатки роботов с ПКС и АКС приведены в таблице.

Тип робота	Достоинства	Недостатки
ПКС	Возможность обслуживания большой рабочей зоны Большое число вариантов компоновок при модульной конструкции	Большие металлоемкость и занимаемое пространство Наличие механизмов преобразования вращательного движения в поступательное Необходимость защиты направляющих прямолинейного перемещения и передач Малые рабочие скорости перемещения и плохая динамика
АКС	Малая металлоемкость и небольшие собственные габаритные размеры Простота и компактность механизмов привода Отсутствие механизмов и направляющих прямолинейного перемещения	Малая рабочая зона Высокие требования к динамическим свойствам привода Повышенные требования к точности передач из-за масштабирования погрешностей длиной зубьев

Из данных таблицы однозначно следует, что предпочтительнее использовать в составе РТКДС антропоморфные роботы, особенно для сварки малогабаритных изделий. Что же касается манипуляционных структур с ПКС, то их целесообразно использовать совместно с антропоморфными роботами в качестве расширителей рабочей зоны (при сварке протяженных швов) либо позиционеров при сварке крупногабаритных изделий.

Манипуляторы изделия являются менее универсальными элементами РТКДС, чем манипуляторы горелки, и их кинематическая структура и компоновка существенно зависят от формы, размеров и массы изделий, а также формы и положения линий соединений свариваемых частей изделий.

Промышленный робот – это манипулятор с программным управлением. Использование предварительно подготовленных программ для РТКДС возможно только в случае, когда точность изготовления деталей и сборки такова, что отклонения программной траектории перемещения горелки от реального положения линий соединения свариваемых деталей, а также зазоры в соединениях будут укладываться в технологические допуски. Такая ситуация возможна только для малогабаритных изделий, точно собранных из прецизионных деталей и с высокой точностью установленных на сварочной позиции. Это достаточно редкий случай использования РТКДС, поэтому для «подгонки» технологической программы РТКДС к каждому конкретному изделию используют обучение и (или) адаптацию.

В большинстве РТКДС используют программирование роботов методом обучения, обусловленным особенностями конструкции приводных механизмов.

В роботах с обратимыми приводами звеньев обучение производится «демонстрационным» способом, т. е. оператор вручную проводит рабочий инструмент робота по требуемой траектории, отмечая при этом особые точки траектории (начальные и конечные точки сварных швов); после завершения обучения робот способен точно воспроизвести траекторию и выполнить сварку.

В роботах с необратимыми приводами звеньев обучение производится методом «от точки к точке», т. е. оператор с помощью пульта ручного управления перемещает рабочий инструмент последовательно во все узловые точки требуемой траектории, фиксируя в памяти системы управления роботом координаты и функциональные признаки этих точек; после завершения обучения робот способен воспроизвести запрограммированную траекторию, проходящую через все указанные оператором точки.

Процесс обучения робота – трудоемкая и ответственная процедура, которая, как правило, осуществляется в несколько итераций, т. е. после завершения обучения производится проверка программы – холостой (без сварки) прогон. Во время прогона выявляются и исправляются ошибки и неточности программы, причем эта процедура повторяется до тех пор, пока траектория перемещения рабочего инструмента не будет полностью соответствовать требованиям технологии.

Средства адаптации оборудования для автоматизированной сварки принято разделять по решаемым задачам на два вида.

*Технологическая* адаптация включает в себя методы и средства определения текущих значений параметров свариваемого соединения (например, зазор в соединении, площадь разделки и т. п.) и коррекции значений текущих параметров режима сварки (ток, напряжение, скорость сварки, амплитуда и частота колебаний горелки) непосредственно в процессе сварки (рис. 3).

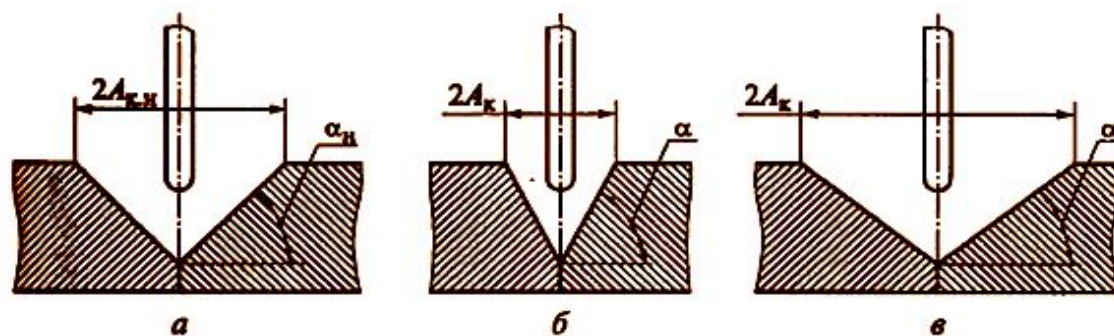


Рис. 3. Амплитуда сварочной горелки в зависимости от угла разделки свариваемого соединения: а – при номинальном угле разделки; б – при более узкой разделке; в – при более широкой разделке;  $A_k$  – амплитуда колебаний;  $A_{кн}$  – номинальная амплитуда колебаний;  $\alpha$  – угол разделки;  $\alpha_n$  – номинальный угол разделки

*Геометрическая* адаптация включает в себя методы и средства определения реального положения линии соединения относительно сварочного инструмента и совмещения траектории перемещения горелки с действительной линией соединения. Наиболее сложной частью задачи адаптации является создание технических средств измерений текущих значений параметров стыков и координат линий соединения (сенсоров).

Задачу геометрической адаптации можно трактовать как задачу программирования роботизированных технологических комплексов – одну из ключевых в интеграции процессов проектирования и технологической подготовки и собственно производства продукции в современном гибком автоматизированном производстве.

При автоматизации любого процесса дуговой сварки перед системой управления стоят еще две задачи:

- наведение сварочной горелки на стык свариваемых деталей, в том числе нахождение точки окончания сварки предшествующего прохода;
- подстройка параметров режима сварки (в первую очередь – скорости сварки, а также амплитуды и частоты колебаний горелки) при изменении геометрических размеров стыка (разделка, ширина зазора, превышение кромок свариваемых деталей) или его положения (изменение пространственного положения стыка, отклонение линии стыкового соединения от оси, волнообразность кромок, изменение угла таврового или углового соединения).

Обе эти задачи требуют интеграции в систему управления автоматической сварочной установки специального блока, который будет получать информацию о сварочном стыке и регулировать параметры сварочного режима непосредственно во время сварки.

Экономические особенности [6] внедрения средств роботизации дуговой сварки определяются следующим обстоятельством. Большинство видов дуговой сварки может выполняться вручную или с применением сварочных полуавтоматов, представляющих собой, по существу, механизированный сварочный инструмент. Стоимость такого сварочного оборудования весьма низкая, в то время как для роботизации сварочной операции требуется комплекс оборудования, стоимость которого вместе со средствами автоматизации во много раз больше, чем стоимость механизированного сварочного инструмента.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость поиска и применения простых, недорогих и в то же время типовых технических решений по роботизации сварочных операций. Одним из таких решений является применение агрегатно-модульного принципа создания РТК и их составных частей.

Общее решение задачи адаптации роботов для дуговой сварки и их применения в судостроении принципиально возможно, но технически трудноосуществимо, вследствие чего в ближайшем будущем задача остается актуальной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б. Е. Проблемы комплексной автоматизации сварочного производства // Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 3–9.
2. Ekelof B. Adaptiv multi-run submerged-arc technology // Svetsaren. – 1998. – N 1. – P. 3–6.
3. Kolbe W. Universal Seam Tracking System for Arc Welding and Similar Applications Industrial Robot // Svetsaren. – 1994. – N 3. – P. 33–35.
4. Горбач В. Д. Основные положения программно-управляемой технологии электродуговой сварки плоских полотнищ. – М.: ВИМИ, 1999. – Вып. 3. – 12 с.
5. Горбач В. Д. Область применения роботизированной сварки при изготовлении судовых корпусных конструкций. – М.: ВИМИ, 1999. – Вып. 3. – 22 с.
6. Тимченко В. А., Сухомлин А. А. Роботизация сварочного производства. – Киев: Техника, 1988. – 175 с.

Статья поступила в редакцию 31.01.2008

# PECULIARITIES OF WELDING ENGINEERING ROBOTIZATION IN SHIPBUILDING

*Nguyen Doan Cyong, V. N. Lubenco*

The advantages and disadvantages of arc welding robots with rectangular and anthropomorphic kinematic schemes are described. It is stated that the use of arc welding of anthropomorphic robots in the robot-technical complex is more suitable to the compact piece welding. Manipulation structures with rectangular kinematic scheme should be used together with anthropomorphic robots as a working zone expander (in extensive joint welding) or as a rotary indexing table in large-size article welding. It is noted that the application of aggregate modular approach to robot-technical complex and its parts creation will be effective in welding engineering in shipbuilding.

**Key words:** welding, hull, robot, welding mode.