
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.73.07

**ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ
ОДНОСТОРОННЕЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

© 2015 г. Ю.В. Доронин

ООО «Аттестационный центр городского хозяйства» (АЦГХ), Москва

В статье рассмотрены современные аспекты односторонней электродуговой сварки с двухсторонним формированием шва. Сделан вывод о том, что разработанные в последнее время технологии гарантируют высокое качество корневого валика и успешно применяются в отечественном сварочном производстве.

Ключевые слова: односторонняя сварка, сварка на весу, обратный валик, технология, металлпорошковая проволока.

Поступила в редакцию 27.06.2015 г.

Высокоэффективные процессы односторонней дуговой сварки с применением формирующих устройств и на весу получили с начала 70-х годов XX века широкое распространение в Японии, США, Канаде, европейских странах. В промышленности этих стран, односторонняя дуговая сварка использовалась в судостроении, сооружении резервуаров, технологических и магистральных трубопроводов, газоходов, котельных конструкций, на строительном-монтажных площадках.

Односторонняя сварка с двухсторонним формированием шва является материало- и энергосберегающим процессом высокой эффективности и повышенной производительности. Так, по данным японских судостроителей, трудоемкость сварки судовых бортовых секций судна с использованием двухсторонней сварки примерно в два раза выше, чем трудоемкость сварки тех же конструкций с использованием односторонней сварки. Сокращение числа проходов при сварке, исключение подрубки корня шва, использование повышенных режимов, отказ от кантовки крупных конструкций, уменьшение габаритов сборочных цехов, все это является неоспоримым преимуществом односторонней дуговой сварки.

В передовых странах, активно использующих дуговые процессы сварки в целом, и одностороннюю сварку в частности, в судостроении, авиационной промышленности, в промышленном строительстве, монтаже технологических и магистральных трубопроводов, суть проблемы по-прежнему сводятся к возможности получения качественного корневого валика независимо от марки материала, толщины или пространственного положения.

К решению этой проблемы сводятся исследования и создание источников питания, оборудования, технологий сборки, поиск и разработка сварочных материалов.

В сущности, предлагаемая к рассмотрению проблема, решается двумя способами:

- сварка с принудительным формированием корневого валика;
- сварка на весу;

В первом случае, когда есть возможность установить формирующее устройство

на обратную сторону стыкового шва, то проблем практически не возникает. В современной технике и технологии односторонней сварки существует многочисленный параметрический ряд подкладок для всех разновидностей сталей, толщин и пространственных положений для формирования обратного валика высокого качества (рис. 1).



Рис. 1. – Обратный валик шва при односторонней сварке на керамической подкладке

Во втором случае, когда доступа к обратной стороне шва нет, или он затруднен, отечественные и зарубежные компании предлагают ряд технических решений, которые реализуются, прежде всего, при сварке трубопроводов.

От качества выполнения корневого прохода в значительной степени зависят все эксплуатационные характеристики будущего трубопровода. Требовалась высокопроизводительная технология сварки, обеспечивающая, во-первых, стабильный управляемый процесс переноса электродного металла с малым разбрызгиванием, и во-вторых, процесс бездефектного формирования шва в различных пространственных положениях при орбитальной обходе сварочной горелкой неповоротного стыка трубы.

Решение первой задачи обеспечено разработкой рядом отечественных и зарубежных фирм быстродействующих инверторных источников питания с цифровым управлением в цикле сварки формами кривых тока и напряжения дуги по адаптивным алгоритмам. Решение второй задачи – качественного формирования шва при корневом проходе связано с разработкой и внедрением новых адаптивных к изменению параметров режима и аномалиям в геометрии сборки стыка, изменениям его пространственного положения, импульсных технологий, обеспечивающих устойчивый стабильный процесс сварки короткой дугой с увеличенным вылетом на электроде в стандартную и узкую разделку кромок.

В последние годы при механизированной импульсной сварке трубопроводов с участием в процессе сварщика определенных успехов по производительности и качеству достигли ряд зарубежных и отечественных фирм, разработавшие новые импульсные технологии: УКП (Технотрон), ВКЗ (ИТС, Россия); STT (Lincoln Electric, США); SteelRoot(Fronius, Австрия); WiseRoot(Kemppi, Финляндия); SpeedRoot(Lorch, Германия); rootArc (EWM, Германия).

Фирма Lincoln Electric одна из первых разработала технологию сварки с так называемым эффектом передачи капли за счет сил поверхностного натяжения (STT), реализованной в источниках Invertex STT II и Power Wave с модулем STT.

Оборудование обеспечивает контроль процесса короткого замыкания, используя высокочастотные преобразователи. Разработчики утверждают, что STT исключает появление дефектов в виде искаженной формы шва (выпуклости и вогнутости шва, подрезов у кромки), непроваров, прожогов, несплавления с кромкой. При использовании процесса STT минимизируется тепловложение в шов, уменьшается количество брызг по сравнению с традиционными способами MIG/MAG-сварки с коротким замыканием. Например, в STT ток меняется от 50А (фаза перехода капли в сварочную ванну) до 370А (фаза формирования новой капли), среднее же интегральное значение тока составляет около 100А (рис. 2).

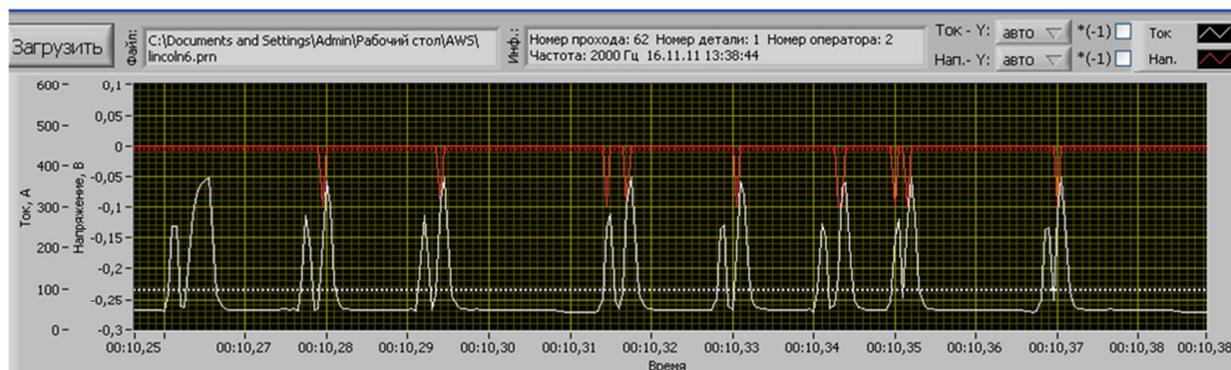


Рис. 2. – Осциллограмма тока (белая кривая) процесса STT

Австрийская фирма Fronius представила новую, на 10...15% более производительную, технологию импульсной сварки короткой дугой – процесс SteelRoot, реализованную в источниках серии Trans Steel, TPS 3000, TPS 5000. Технологию SteelRoot используют при сварке неповоротных стыков в смеси защитных газов ($Ar+CO_2$) с содержанием CO_2 менее 20%, способом «сверху-вниз». Быстродействующая система управления с хорошо отработанными алгоритмами обеспечивает высокую стабильность процесса сварки в различных пространственных положениях.

Фирма Kemppi реализовала на базе своего оборудования (FastMIG KMS, FastMIG Pulse, KempArc) технологию WiseRoot, которая также позволяет сваривать корневой проход модифицированной короткой дугой. Процесс сварки имеет два чередующихся периода — короткого замыкания и горения дуги. В период короткого замыкания поступающая проволока замыкается накоротко на сварочную ванну, ток резко увеличивается и остается на заданном уровне. В начале периода короткого замыкания происходит короткий резкий скачок сварочного тока в момент контакта кончика проволоки со сварочной ванной. Он проявляется в появлении так называемой отщепляющей силы, отделяющей каплю металла от кончика электрода. Плавное отделение капли обеспечивается медленным снижением сварочного тока. В момент переноса капли в сварочную ванну начинается второй период роста тока и происходит зажигание дуги. Момент отделения капли и зажигание дуги точно фиксируется схемой управления в источнике питания. Контроль времени увеличения и снижения тока гарантирует отсутствие брызг при переходе от короткого замыкания к горению дуги. В период горения дуги формируется сварочная ванна и обеспечивается необходимое проплавление корня шва.

Техническая реализация технологии WiseRoot аналогична рассмотренным выше (рис. 3), но импульс перехода превосходит по значению импульс формирования новой капли. Технология используется при сварке в смесях защитных газов ($Ar+CO_2$) с содержанием CO_2 менее 20% и в чистом CO_2 .

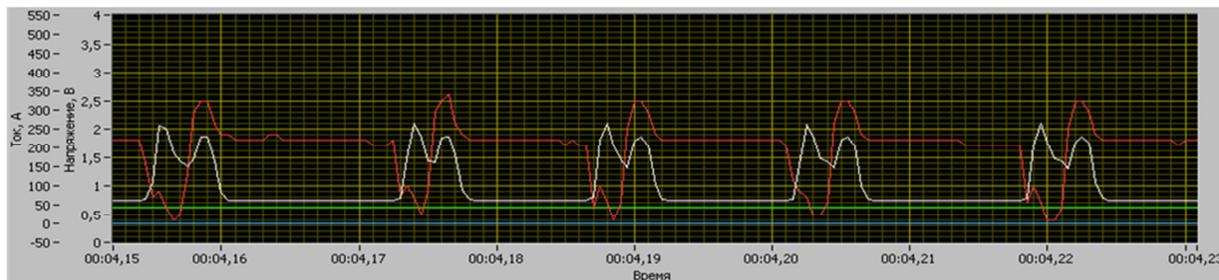


Рис. 3. – Осциллограмма процесса WiseRoot

Несмотря на отличия в реализации вышеуказанных процессов, можно выделить некоторые особенности сварки, единые для всех способов с применением управляемых импульсов:

- при соединении вертикальных листов и труб (положение сварки В2) сварку необходимо вести на спуск;
- возбуждение необходимо производить на кромке, переходом на противоположную кромку, где формируется сварочная ванна. Дальнейшее ведение дуги осуществлять без колебаний (по возможности с минимальными колебаниями в зависимости от величины зазора, без задержки электрода на кромках) вдоль зазора;
- необходимо сварку выполнять углом назад («тянущим углом») по переднему фронту сварочной ванны. Угол наклона горелки $45-80^\circ$ к касательной данного участка траектории;
- сварку по возможности выполнять на центраторах, при сборке на прихватках необходимо обеспечить проплавление основного материала и качественное формирование обратного валика. Так как рассмотренные процессы не позволяют полностью проплавить прихватку, на этих участках допустимо на том же оборудовании переходить на другие способы сварки, например, применить стандартную MIG/MAG-сварку в импульсном режиме. При этом сварку необходимо вести на максимально допустимой скорости, обеспечивающей стабильность процесса и полное проплавление стыка на прихватке;
- перед сваркой необходимо подобрать значение индуктивности сварочного контура (электронного дросселя), обеспечивающего наилучшее формирование шва (минимальную чешуйчатость, плавное сопряжение валика с кромкой без подрезов, требуемую толщину валика и качественное формирование обратного валика требуемой ширины и высоты).

Несоблюдение перечисленных требований при сварке приводит к возникновению дефектов в виде непроваров, наплывов в корне шва, а также возникновению пор и несплавлений с последующими валиками.

Необходимо также уделять внимание подготовке кромок: обеспечивать постоянство зазора согласно рекомендациям к применению данных процессов (около 2,0..2,5 мм при сварке проволокой диаметром 1,2 мм); выполнять тщательную зачистку стыка с удалением цементированного слоя после газовой и плазменной резки; притупление кромок не должно превышать значений, указанных в рекомендациях к применению (менее 1,5 мм); перекус кромок не должен превышать значение, равное половине зазора в стыке; производить зачистку внутренних сторон деталей на расстояние не менее 10 мм.

Приведенные в работе материалы и проведенные исследования технологических возможностей импульсного процесса SteelRoot на источнике питания TransSteel фирмы Fronius при сварке корневого шва позволяют сделать вывод о перспективности использования импульсных технологий при автоматических способах сварки кольцевых

стыков труб с применением автоматических сварочных головок со средствами адаптации к аномалиям в сборке стыка и изменению параметров режима (рис. 4).

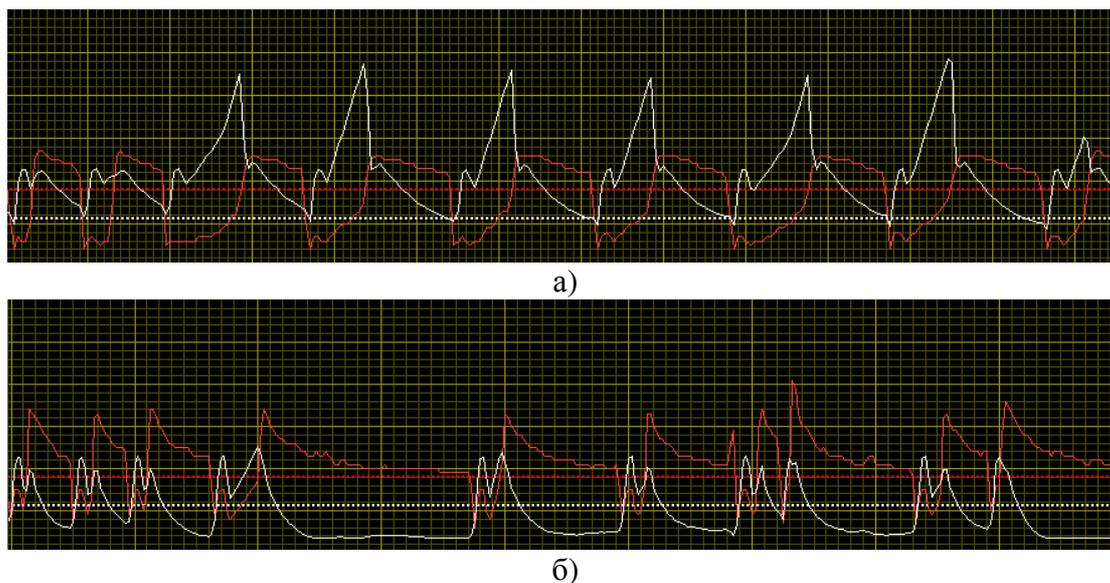


Рис. 4. – Фрагмент осциллограммы адаптации процесса SteelRoot (Fronius) при сокращении (а) вылета электрода от 10 до 1 см за 2 с (амплитудное регулирование) и его увеличении от 1 до 10 см за 2 с (частотное регулирование) (б)

Реальной альтернативой сварке неповоротных стыков трубопроводов пульсирующей дугой монолитной проволокой является технология автоматической сварки с использованием металлопорошковой проволоки POWER BRIDGE 60 М, разработанной ООО «АЦГХ» совместно с ЗАО НПФ «ИТС». Проволока обеспечивает высокую стабильность горения дуги, повышенную вязкость сварочной ванны и стабильное формирование шва во всех пространственных положениях с образованием обратного валика. Механические свойства и прежде всего ударная вязкость при температуре -40° находится в пределах 60 Дж/см^2 , в то время при сварке проволокой сплошного сечения показатели ударной вязкости находятся в пределах 35 Дж/см^2 . Данная технология также позволяет осуществлять выполнение последующих проходов рутитовую порошковую проволоку. В качестве защитного газа использовался углекислый газ. При использовании рутитовой проволоки использовалась смесь аргона и углекислого газа в соотношении 80/20.

ЗАО НПФ «ИТС» и ООО «АЦГХ» в работе [2] рассмотрели технологические особенности выполнения корневого прохода трубопровода по принципиально новой технологии с использованием металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60 М диаметром 1,2 мм. Авторы пришли к мнению, что эта бесшовная, омедненная, металлопорошковая проволока обеспечивает высокую стабильность горения дуги, повышенную вязкость сварочной ванны, благоприятную форму обратного валика, как с лицевой, так и с обратной стороны и, самое главное, гарантирует высокие механические свойства (ударную вязкость) при низких температурах.

В целом, для потребителей данной технологии не так уж и важно, какой из факторов обеспечивает, безусловно, удовлетворительный результат. Состав ли и конструкция проволоки, условия сборки, параметры режима сварки, пространственные положения при сварке, используемое оборудование (в том числе и источник питания). Хотя внешний вид обратного валика, его геометрические размеры несколько не отличаются от аналогов, полученных, например, при использовании Steel Root (Fronius) (рис. 5).

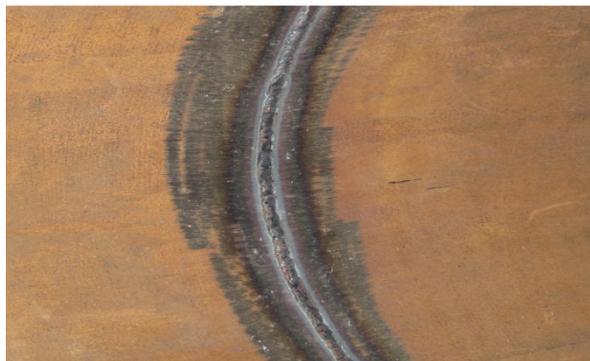


Рис. 5. – Обратный валик шва при сварке металлопорошковой проволокой

В связи с этим, была сделана попытка проанализировать, в первую очередь, факторы, влияющие на формирование корневого валика. Как известно, все предыдущие исследователи, рассматривая сварочную ванну на весу при MIG/MAG-сварке в состоянии статического или динамического равновесия, исследовали физические и физико-химические свойства металла при температуре выше ликвидуса, параметр сил действующих на жидкий металл со стороны дуги, влияние газовой защитной среды и др.

В отличие от формирования корня шва при односторонней сварке на подкладках, где решающую роль играют свойства расплавленных при взаимодействии с металлом сварочной ванны оксидов подкладного материала, в нашем случае речь идет о процессах в корне шва на межфазной границе металл-газ.

На наш взгляд, решающими факторами, которые могут повлиять на геометрические размеры корня шва, ширину, высоту, угол перехода к основному металлу, а также структуру металла шва корневого валика, являются:

- межфазное натяжение на границе расплавленный металл шва – газ с обратной стороны;
- вязкость расплавленного металла при температуре выше ликвидуса;
- величина зазора в стыке;
- угол разделки кромок и величина притупления;
- химический состав и конструкция металлопорошковой проволоки;
- величина зазора в стыке;
- угол разделки кромок и величина притупления;
- химический состав и конструкция металлопорошковой проволоки;
- характер переноса металла через дуговой промежуток;
- параметры режима сварки (ток сварки, скорость сварки, напряжение на дуге, диаметр электрода) и как следствие, все силовые характеристики, как факторы, влияющие на перемещение как электродного, так основного металла по сечению сварочной ванны в продольном и поперечном направлениях;
- электропроводность проволоки в холодном состоянии.

Наиболее полно влияние поверхностных характеристик в сварочных процессах применительно к формированию корня шва освещено в работе [1].

Однако при сварке плавящимся электродом на весу основным фактором, влияющим на форму корневого валика, как с обратной стороны, так и с лицевой, является характер силового давления со стороны дуги и вектор ее направления на сварочную ванну. При сварке монолитной проволокой давление дуги и капельная или струйная транспортировка электродного металла осуществляется по продольной оси ванны, в наиболее перегретую ее часть. В этом случае для предотвращения прожогов и применяются импульсы и поперечные колебания.

При сварке металлопорошковой проволокой в этом нет необходимости. Электродный металл в сварочную ванну транспортируется по периферии на боковые стенки сварочной ванны.

При сварке порошковой проволокой металлическая оболочка проволоки обладает намного большей электропроводностью по сравнению с сердечником. Поэтому активное пятно дуги занимает не всё сечение проволоки, а находится преимущественно на металлической оболочке. Столб дуги с большой скоростью перемещается вокруг сердечника, расплавляя его (рис. 6). При сварке на различных режимах характер горения дуги может быть различным. При сварке на оптимальных режимах дуга, горящая по кольцевой оболочке, обеспечивает мелкокапельный туманообразный перенос электродного металла.

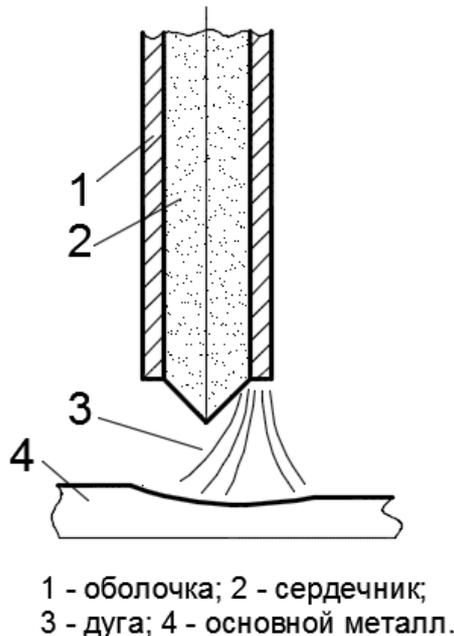


Рис. 6. – Схема горения дуги при сварке порошковой проволокой

Для описания давления такой дуги предложена следующая расчётная схема конусообразной дуги, горящей с кольцевого электрода (рис. 7). Процессы, протекающие внутри кольцеобразно расширяющейся дуги в данной схеме, не учитываются. Полное давление дуги определяется несколькими составляющими. Составляющую давления дуги, связанную с расширением столба, можно определить следующим образом.

Рассмотрим элементарный кольцевой слой на произвольном расстоянии по высоте. Величина элементарного объёма в этом слое на произвольном расстоянии от оси дуги равна:

$$dv = r d\varphi dz dr \tag{1.1}$$

Собственная осевая электромагнитная сила от взаимодействия радиальной составляющей сварочного тока с индукцией собственного магнитного поля в этом объёме, действующая на этот объём вниз, запишется в следующем виде:

$$df_z = (\bar{j}_r \times \bar{B}) dv = \mu j_r H dv \tag{1.2}$$

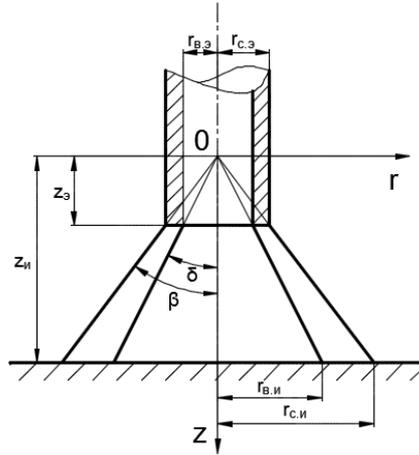


Рис. 7. – Схема дуги при сварке порошковой проволокой

С учётом того, что $\frac{j_r}{j_z} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{z}$ и $j_r = j_z \operatorname{tg} \alpha = j_z \frac{r}{z}$ сила, действующая на элементарный объём равна:

$$df_z = \mu j_r H dv = \mu j_z H \frac{r}{z} dv = \mu j_z H \frac{r^2}{z} d\varphi dz dr \quad (1.3)$$

Сила, действующая на элементарное кольцо, равна:

$$dF_k = \int_0^\varphi df_z = \int_0^{2\pi} \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr d\varphi = 2\pi \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr \quad (1.4)$$

Примем распределение вертикальной составляющей сварочного тока по поперечному сечению кольца дуги постоянным, тогда:

$$j_z = \frac{I_d}{F_{\text{слож}}(z)} \quad (1.5)$$

где $F_{\text{слож}}(z) = \pi r_c^2(z) - \pi r_b^2(z)$.

Напряжённость магнитного поля на внутренней поверхности столба дуги равна нулю, полагая, что часть столба дуги, занятая шихтой, не электропроводна.

На наружной поверхности столба дуги напряжённость магнитного поля равна [3]:

$$H_c = \frac{I_d}{2\pi r_c} \quad (1.6)$$

Примем величину напряженности магнитного поля по сечению столба постоянной, равной средней:

$$H = \frac{H_c}{2} = \frac{I_d}{4\pi r_c} \quad (1.7)$$

Определим силу, действующую на элементарное кольцо:

$$dF_k = 2\pi \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr = 2\pi \mu \frac{I_d}{\pi r_c^2 - \pi r_b^2} \frac{I_d}{4\pi r_c} \frac{r^2}{z} dz dr = \frac{\mu I_d^2 r^2}{2\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} dz dr \quad (1.8)$$

Сила, действующая на элементарный слой:

$$dF_c = \int_{r_b}^{r_c} dF_k = \int_{r_b}^{r_c} \frac{\mu I_d^2 r^2}{2\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} dz dr = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} dz \quad (1.9)$$

Электромагнитная сила, вызванная расширением столба дуги:

$$F_z = \int_{z_3}^{z_n} dF_c = \int_{z_3}^{z_n} \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2)} \frac{dz}{z} = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2)} \ln \frac{z_n}{z_3} \quad (1.10)$$

Среднее давление, действующее на кольцевую поверхность контакта дуги с жидким металлом:

$$P_d = \frac{F_z}{S_d} = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi S_d r_c (r_c^2 - r_b^2)} \ln \frac{z_n}{z_3} \quad (1.11)$$

Оно пропорционально квадрату сварочного тока и обратно пропорционально расширению столба дуги. Изменяя параметрами режима сварки конусность дуги, можно регулировать силовое воздействие дуги на сварочную ванну при заданном сварочном токе.

Третья тенденция с перспективой специального назначения просматривается в использовании магнитных полей. Данные технологии в настоящее время прорабатываются в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Исследования касаются не только сварки неплавящимся электродом, где формирование корня шва можно считать идеальным (рис. 8), но и управляемым по размерам усиления обратного валика, но и сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, при котором помимо главной цели – плоского обратного валика, решается задача стабилизации переноса капель. Данная технология также характерна значительным измельчением зерна в корневом валике.



Рис. 8. – Корневой валик при сварке неплавящимся электродом

В основе технологии лежит комбинированная магнитная система (КМС), состоящая из формирующей магнитной системы (ФМС) и регулирующей магнитной системы (РМС). Исследованиями А.М. Рыбачука и Н.В. Крысько установлено, что регулировка конфигурации КМС позволяет получить нулевую выпуклость валика с обратной стороны при сварке плавящимся электродом с сохранением стабильности переноса электродного металла [4].

ВЫВОДЫ

– Современные технологии односторонней дуговой сварки гарантируют высокое качество корневого валика при сборке плоскостных конструкций и строительстве трубопроводов.

– Отечественное сварочное производство располагает передовыми технологиями, оборудованием и материалами для односторонней дуговой сварки сталей различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доронин, Ю.В. Разработка теоретических основ формирования обратной стороны шва с учетом физико-химических процессов в сварочной ванне и создание новых сварочных материалов для односторонней дуговой сварки сталей плавящимся электродом [Текст] / Ю.В. Доронин : дис. докт. техн. наук. – М., 2010. – 352 с.
2. Карасев М.В. и др. Технологические особенности выполнения различных слоев шва при автоматической сварке трубопроводов [Текст] / М.В. Карасев, Ф.Е. Дорошенко, А.А. Казаков, Д.А. Любочко // Сварка и диагностика – 2014. – №6 – С. 45–49.
3. Рыбачук, А.М. и др. Математическое моделирование физических процессов в дуге и сварочной ванне [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов : учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 74 с.: ил.
4. Крысько, Н.В. Разработка способа формирования шва поперечным магнитным полем при дуговой сварке плавящимся электродом [Текст] / Н.В. Крысько : дис. канд. техн. наук. – М., 2015. – 118 с.

REFERENCES

- [1] Doronin Yu.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov formirovaniya obratnoj storony shva s uchetom fiziko-himicheskikh processov v svarochnoj vanne i sozdanie novyh svarochnykh materialov dlya odnostoronnej dugovoj svarki stalej plavyashhimsya elektrodom [Development of theoretical bases of formation of a reverse side of a seam taking into account physical and chemical processes in a welding bathtub and creation of new welding materials for unilateral arc welding staly the melting electrode]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskikh nauk [the thesis of academic degree of the Doctor of Engineering]. M. 2010, 352 p. (in Russian)
- [2] Karasev M.V., Doroshenko F.E., Kazakov A.A., Lyubochko D.A. Teknologicheskie osobennosti vypolneniya razlichnyh sloev shva pri avtomaticheskoy svarke truboprovodov [Technological features of performance of various layers of a seam at automatic welding of pipelines]. Svarka i diagnostika [Welding and diagnostics]. 2014, №6, ISSN 2071-5234, p. 45–49. (in Russian)
- [3] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v duge i svarochnoj vanne [Mathematical modeling of physical processes in an arch and a welding bathtub]. Uchebnoe posobie [Course book]. M. Pub. MGTU im. N.E. Baumana [Bauman Moscow State Technical University], 2007, ISBN 978-5-7038-2941-7, 74 p. (in Russian)
- [4] Krysko N.V. Razrabotka sposoba formirovaniya shva poperechnym magnitnym polem pri dugovoj svarke plavyashhimsya elektrodom [Development of a way of formation of a seam a cross magnetic field at arc welding by the melting electrode]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskikh nauk [thesis of Candidate of Technical Sciences]. M. 2015, 118 p. (in Russian)

Tendencies and Problems of a One-sided ARC Welding**Y.V. Doronin**

*LTD «Certification Center of municipal services», 47A Izmajlovskoe St.(schosse),
Moscow, Russia 105187
e-mail: bekkenbauer@yandex.ru*

Abstract – The article deals with modern aspects sided arc welding with double seam formation. It is concluded that the recently developed technology ensures the high quality of the root bead and successfully applied in domestic welding industry.

Keywords: sided welding, suspended, reverse roller technology, metal-cored wire.