

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛА ШВА И ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПРОВОЛОКОЙ СВ-08Х20Н9Г7Т

В. Д. ПОЗНЯКОВ, А. В. ЗАВДОВЕЕВ, А. А. ГАЙВАРОНСКИЙ, А. М. ДЕНИСЕНКО, А. А. МАКСИМЕНКО
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Импульсно-дуговая сварка характеризуется периодически изменяемой мощностью дуги и благодаря своим особенностям позволяет решать сложные технологические вопросы при создании уникальных конструкций, увеличивать производительность процессов сварки, наплавлять коррозионностойкие сплавы на сталь. В настоящее время существует множество производителей сварочного оборудования, внедривших в своем производстве идеи применения импульсной сварки. Однако данные о влиянии импульсно-дуговой сварки на термические циклы сварки носят разрозненный характер и поэтому трудно провести сопоставление между термическими циклами, характерными для сварок стационарно горящей и импульсной дугой. При сварке высокоуглеродистых сталей возникает задача уменьшения перемешивания металла шва с основным металлом и повышения за счет этого сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин. Для успешного применения импульсно-дуговой сварки в решении перечисленных выше задач возникла необходимость в сравнительных исследованиях влияния режимов импульсно-дуговой сварки на параметры швов, ЗТВ и термические циклы сварки в сравнении со сваркой стационарно горящей дугой, выполненных высоколегированными сварочными материалами. Это было основной целью исследований, результаты которых приведены в данной статье. Библиогр. 31, рис. 8.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, сварка пульсирующей дугой, термический цикл сварки, зона термического влияния, высоколегированные сварочные материалы

Импульсно-дуговая сварка (ИДС) характеризуется периодически изменяемой мощностью дуги и известна с 1940-х гг. Метод сварки с периодически изменяемой мощностью дуги впервые предложен в СССР в 1953 г. Зайцевым М. П. для сварки тонколистовой стали с целью сокращения тепловых потерь [1]. Однако в мире первое упоминание импульсной сварки датируется 1932 г., Этот вид сварки был изобретен инженером Earl J. Ragsdale в компании Budd Company в 1932 г. для сварки нержавеющей стали и использовался для изготовления дизельного железнодорожного поезда Pioneer Zephyr [2]. Импульсно-дуговая сварка в этом случае позволила в 3...8 раз повысить производительность труда по сравнению со сваркой неплавящимся электродом и значительно снизить деформации в процессе ее выполнения при практически одинаковом качестве сварных соединений. Сварка с периодически меняющейся мощностью дуги различными авторами называлась по-разному: импульсно-дуговая сварка, сварка пульсирующей дугой, модулированным током, нестационарной дугой, однако общее название всех перечисленных выше методов — это сварка модулированным током (СМТ) [3]. Главным образом СМТ позволяет обеспечить управляемый перенос электродного металла, повысить стабильность го-

рения дуги, уменьшить разбрызгивание, а также управлять скоростью и направлением кристаллизации металла сварочной ванны, регулировать тепловое воздействие на зону термического влияния (ЗТВ) сварных соединений. По частоте следования импульсов СМТ разделяют на ИДС ($f \geq 25$ Гц, рис. 1, а) и сварку пульсирующей дугой ($f < 25$ Гц, рис. 1, б).

ИДС [4–6] обеспечивает управляемый перенос электродного металла, основным условием которого является отрыв капли каждым импульсом тока и возможность управления частотой их переноса. При сварке в среде защитных газов считается, что длительность импульса должна быть достаточной для отрыва капли электродного металла. В случае отрыва капли при силе тока, близкой к амплитудной, перенос металла сопровождается повышенным разбрызгиванием [7]. Минимальные потери на разбрызгивание и управляемый перенос металла при сварке во всех пространственных положениях обеспечивает отрыв капли в конце действия импульса. К основным преимуществам ИДС относится то, что она может применяться для конструкций ответственного назначения из сталей различных марок, алюминиевых, медных, никелевых сплавов и титана толщиной 1 мм и более.

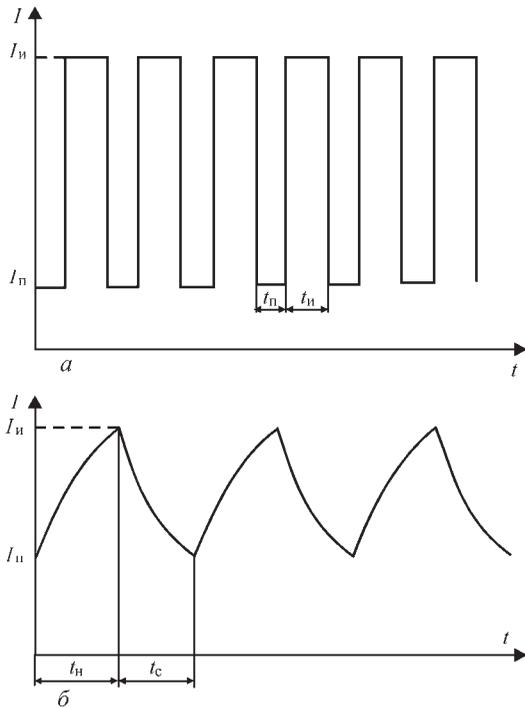


Рис. 1. Изменение силы тока от времени при ИДС ($f \geq 25$ Гц) (а) и сварке пульсирующей дугой ($f < 25$ Гц) (б): $t_{и}$ — время импульса; $t_{п}$ — время паузы; $t_{н}$ — время нарастания силы тока; $t_{с}$ — время спада силы тока; $I_{и}$ — ток импульса; $I_{п}$ — ток паузы

Благодаря высокой пространственной стабилизации дуги и возможности применения вылета электрода большой длины этот процесс может быть успешно применен как для сварки металла малых толщин, так и для толстостенных конструкций. ИДС является промежуточным звеном между струйным переносом и сваркой короткой дугой, что делает ее идеальной для сварки больших толщин, где необходим контроль тепловложения. ИДС, благодаря своим особенностям, позволяет решать сложные технологические вопросы при создании уникальных конструкций, увеличивать производительность процессов сварки, наплавлять коррозионностойкие сплавы на сталь [8]. В настоящее время существует множество производителей сварочного оборудования, внедривших в свое производство идеи применения импульсной сварки. Шведская фирма «Esab» разработала источник питания для ИДС «Aristo 500» [9] с программным управлением, которое автоматически задает режимы сварки согласно синергетическим зависимостям. Американская фирма Hobart разработала систему «Ultra-Arc 350» для ИДС плавящимся электродом [10]. Данная система содержит девять программ, предусматривающих сварку углеродистых и нержавеющей сталей в смеси газов проволоками диаметром 0,8 и 1,2 мм. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан источник питания для ИДС И-169 с плавным регулированием параметров импульсов тока ступенчатой формы [11].

Важным условием стационарности протекания процесса ИДС является оптимальное сочетание параметров импульса и паузы [8, 12–19]. В силу того, что количество переменных параметров при ИДС значительно, выбор их оптимального сочетания достаточно трудоемкий процесс и включает большое количество проб и ошибок [20]. Общими рекомендациями к выбору оптимального сочетания параметров ИДС является перенос одной капли за импульс [8, 12]. Данное условие, которое является критерием переноса металла, может быть выражено соотношением [12, 21]:

$$D = I_{и}^n t_{и}, \quad (1)$$

где D — константа, зависящая от объема капли, состава и диаметра сварочной проволоки; показатель степени « n » имеет среднее значение 2.

Если значения $I_{и} t_{и}$ малы, то энергии одного импульса недостаточно для отрыва капли. В данном случае капля может отделиться от электрода под действием гравитационных сил. В случае, когда произведение тока и времени импульса имеют большие значения, за один импульс может отделиться две или три капли и стабильность процесса сварки нарушается. Минимальный ток в паузе выбирается таким образом, чтоб во время паузы не затухала дуга. Современные источники питания для ИДС в запрограммированных режимах применяют перечисленные выше рекомендации. Как правило, на приборных панелях для оператора выводятся значения среднего тока, который определяется следующим уравнением [8, 12, 22]:

$$I_{ср} = \frac{I_{и} t_{и} + I_{п} t_{п}}{t_{и} + t_{п}}. \quad (2)$$

В этом случае можно сопоставлять режимы ИДС с режимами стационарной сварки, так как погонная энергия сварки прямо пропорциональна сварочному току.

Одной из важнейших характеристик, определяющей свойства сварного соединения, является термический цикл сварки (ТЦС), от которого зависит структура металла ЗТВ. Зная особенности ТЦС при импульсно-дуговом режиме сварки можно прогнозировать формирование структуры и свойств ЗТВ сварных соединений. Так, например, авторы работ [12, 23–25] указывают, что ИДС характеризуется пониженным уровнем тепловложения, при этом обеспечивая проплавление, сопоставимое со струйным переносом. К. Тсен [26], измеряя термические циклы сварки для стационарного и пульсирующего режимов, на расстоянии 2 мм от линии сплавления, показал, что в последнем случае достигается меньшая максимальная температура нагрева металла. Данный факт может свидетельствовать, по мнению авторов работы [26], о меньшем тепловложении. Вви-

ду того, что на одинаковом расстоянии от линии сплавления в случае импульсного процесса температура нагрева металла меньше, можно косвенно сделать вывод, что ширина ЗТВ в данном случае была меньше и что скорость охлаждения металла в высокотемпературной области была выше по сравнению с процессом, который выполнялся стационарно горящей дугой. В работе [27] рассматривается влияние частоты следования и заполненности импульсов на скорость охлаждения металла. Показано, что в пределах изменения частоты следования от 60 до 120 Гц и заполненности импульса от 20 до 30 %, скорость охлаждения как в высокотемпературной, так и низкотемпературной области практически не изменяется. Значения частот следования и заполненности импульса выбраны исходя из того, что данные диапазоны параметров ИДС покрывают широкую область практического применения [28]. Также следует отметить, что по данным ТЦС для импульсного режима в высокотемпературной области наблюдается некий «зуб» (скачок) в изменении температуры металла, что, по всей видимости, объясняется особенностями импульсного ввода тепла в сварочную ванну. При исследовании ТЦС в случае сварки пульсирующей дугой [22, 29] было установлено, что в низкотемпературном диапазоне скорость охлаждения металла ЗТВ замедляется по сравнению со стационарным режимом, а в высокотемпературном диапазоне ускоряется. При этом в случае [29] возрастания частоты пульсации дуги от 0,5 до 10 Гц, скорость охлаждения металла ЗТВ становится такой же, как и в случае стационарной сварки, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего увеличения частоты пульсаций.

Следует отметить, что данные о влиянии ИДС на термические циклы сварки носят разрозненный характер и поэтому трудно провести сопоставление между термическими циклами, характерными для сварок стационарно горящей и импульсной дугой. Аналогичная ситуация наблюдается с исследованиями, касающихся изменений параметров шва [30, 31]. В основном в работах проводится сравнение параметров шва при различных вариантах импульсной или пульсирующей сварок, в то время, как сопоставление с аналогичными результатами для сварки стационарной дугой отсутствуют. Такие данные необходимы для понимания в каких условиях сварку стационарной дугой можно заменять ИДС с целью увеличения производительности и качества получаемой продукции. Для выполнения таких задач, как сварка высокопрочных мелкозернистых сталей, необходимо решать две взаимоисключающие проблемы повышения производительности процесса и обеспечения мелкозернистой структуры в металле ЗТВ, а также

обеспечения хорошего проплавления корня шва. Кроме того, при сварке высокоуглеродистых сталей возникает задача уменьшения перемешивания металла шва с основным металлом и повышения за счет этого сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин. Таким образом, для успешного применения ИДС в решении перечисленных задач возникла необходимость в сравнительных исследованиях влияния режимов ИДС на параметры швов (ширина, высота усиления, глубина проплавления), ЗТВ и ТЦС в сравнении со сваркой стационарно горящей дугой, выполненных выше высоколегированными сварочными материалами. Это было основной целью исследований, результаты которых приведены в данной статье.

Методика эксперимента. Для решения поставленной в работе задачи проводили наплавки высоколегированной сварочной проволокой ХОРДА 307Ti, которая является аналогом известной проволоки марки Св-08Х20Н9Г7Т. Использовалась проволока диаметром 1,2 мм. Наплавки осуществлялись на пластины толщиной 10 мм из стали 09Г2С. Из пластин с наплавкой изготавливались шлифы, на которых проводили измерения параметров швов и ЗТВ. Для выявления ЗТВ шлифы подвергали макротравлению раствором хлорного железа. Запись ТЦС участка перегрева ЗТВ проводилась с использованием хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,5 мм. Термопара устанавливалась на участок ЗТВ, который нагревался до температуры 1200 °С.

Для оценки влияния режимов ИДС на параметры шва были выбраны следующие режимы: сварочный ток $I = 120, 160, 200, 240$ А, напряжение $U = 20, 24, 28, 30$ В, скорость сварки 15 м/ч, защитный газ — смесь Ar + 18 % CO₂. В качестве источника тока использовался выпрямитель инверторного типа марки ewm Phoenix Pulse 401, который обеспечивает частоту следования импульсов при ИДС — 130 Гц.

С использованием пульсирующей дуги подбирали оптимальные режимы пульсации. В этом случае режим сварки был следующим: сварочный ток импульса $I_{и} = 160$ А, ток паузы (базовый ток) $I_{п} = 80$ А; напряжение на дуге в импульсе $U_{и} = 24$ В, напряжение на дуге в паузе $U_{п} = 18$ В, $v_{св} = 15$ м/ч, варьировались время импульса $t_{и}$ и время паузы $t_{п}$, а также сила тока в паузе и скважность. Сила тока в паузе имела следующие значения: $I_{п} = 60, 80, 100, 120$ А; скважность варьировалась от 1,4 до 2,0, частота следования импульсов превышала 0,5 Гц.

Полученные результаты и их обсуждение. *Импульсно-дуговая сварка.* Внешний вид валиков наплавки, выполненных стационарной и ИДС,



Рис. 2. Внешний вид наплавленного валика: *a* — стационарный режим сварки, $I_{св} = 160$ А, $U = 24$ В; *б* — импульсный режим сварки, $I_{ср} = 160$ А, $U = 24$ В, скорость сварки в обоих случаях 15 м/ч

представлен на рис. 2. При сравнении стационарного и импульсно-дугового режимов сварки отчетливо видно, что при ИДС валик шва более однородный и равномерный без следов разбрызгивания (рис. 2, б). Измерения потерь металла на разбрызгивание показали, что при ИДС он уменьшается на порядок, от 0,7 % при стационарной до 0,07 % при ИДС.

Анализ поперечного сечения наплавов, выполненных на различных режимах, показал, что глубина проплавления при ИДС увеличивается по сравнению со стационарной сваркой на таких же режимах (рис. 3). При этом форма проплавления шва при ИДС значительно отличается от процесса, который выполнялся стационарно горячей дугой. Количественный анализ показал, что с увеличением тока сварки ширина шва также увеличивается. Характер изменения этой величины одинаков как для сварки стационарно горячей дугой, так и для ИДС. Аналогичная зависимость наблюдается и для высоты шва. Что касается глу-

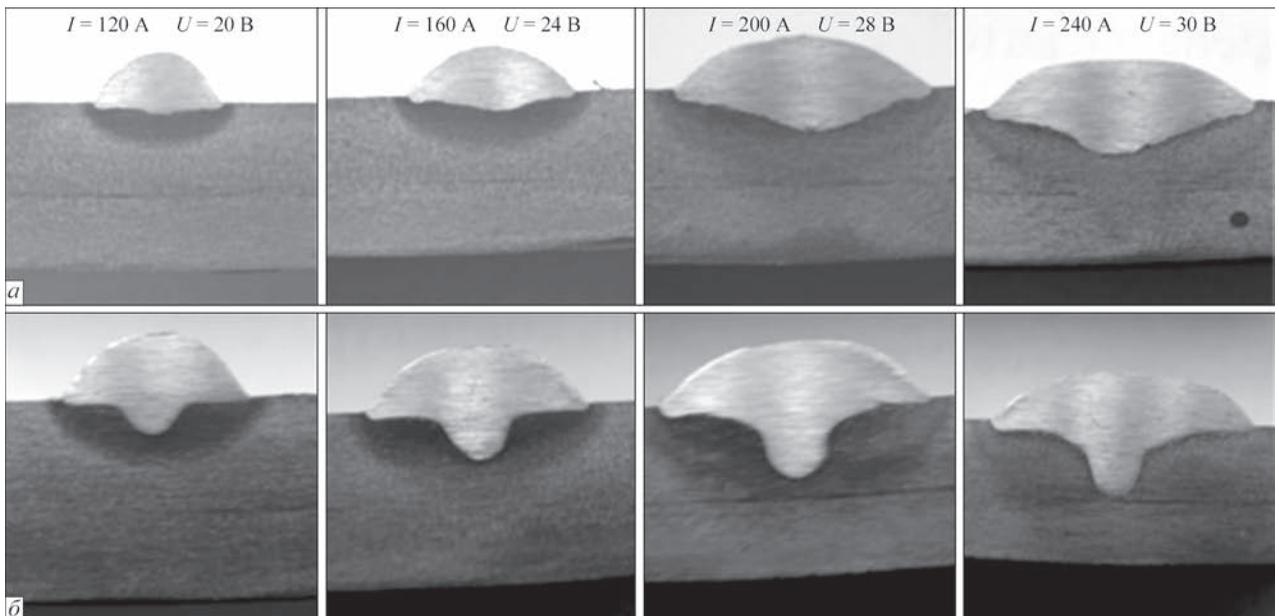


Рис. 3. Внешний вид наплавов, выполненных стационарной (*a*) и ИДС (*б*) со скоростью 15 м/ч; макрошлифы, поперечное сечение

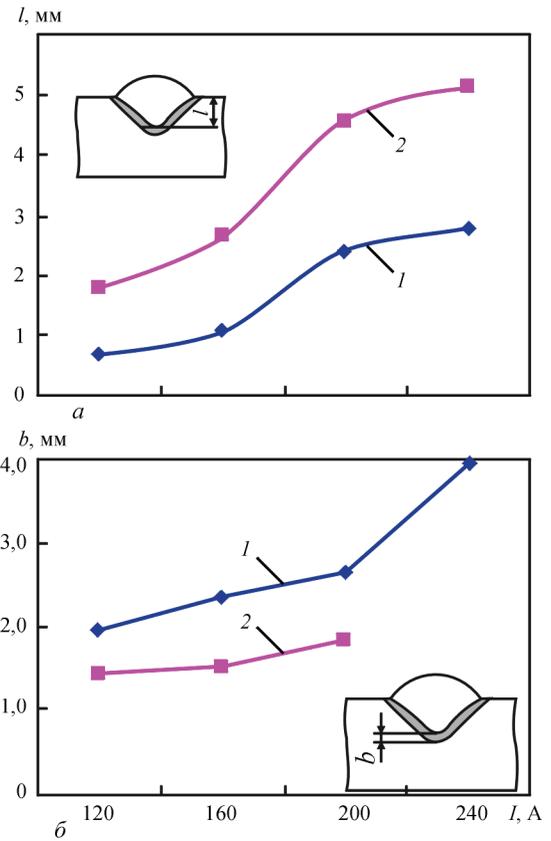


Рис. 4. Изменение параметров шва и ЗТВ при стационарной (*1*) и ИДС (*2*), скорость сварки 15 м/ч: *a* — глубина проплавления; *б* — ширина ЗТВ в корне шва

бины проплавления, то в целом с возрастанием сварочного тока она увеличивается, но в случае ИДС глубина проплавления практически в два раза больше, чем в случае сварки стационарно горячей дугой (рис. 4, *a*). Также при ИДС площадь поперечного сечения шва превосходит данные показатели для сварки стационарно горячей ду-

гой. Величина ЗТВ под грибком сопоставима для обоих видов сварки, а в корне шва ЗТВ при ИДС меньше (рис. 4, б). Также важным параметром является ширина ЗТВ у поверхности шва, значения которой при ИДС на токах выше 160 А становятся меньше, чем для сварки стационарно горящей дугой.

Сварка пульсирующей дугой. При частоте импульсов 0,3 Гц формируется крупночешуйчатый прерывистый шов (рис. 5), в котором с уменьшением скважности однородность ширины валика по длине шва увеличивается. Также при малой частоте пульсации дуги наблюдается неоднородное проплавление пластины (т. е. наблюдается резкое изменение глубины проплавления по длине шва, которое достигает 70 %, рис. 5, б). Увеличить однородность проплавления удастся, увеличив частоту пульсации дуги до 1 Гц. Также при постоянных значениях среднего тока и скважности процесса, с увеличением частоты пульсации дуги увеличивается однородность формирования валика шва и уменьшается чешуйчатость.

По данным эксперимента установлено, что с ростом тока паузы ширина шва сначала несколько снижается, а затем увеличивается, при этом меньшим значениям скважности соответствует большая ширина шва (рис. 6, а). Высота шва равномерно увеличивается с ростом тока паузы. Изменение глубины проплавления имеет некоторые особенности. При скважности, равной два, она изменяется от 1 мм (что соответствует глубине проплавления при стационарном режиме сварки на заданном токе), до 1,8 мм. При меньшей скважности (1,4 и 1,5) значения глубины проплавления находятся в пределах 1,7 мм, что на 70 % больше, чем при стационарном режиме. Площадь шва закономерно увеличивается с ростом тока паузы.

Изменение параметров ЗТВ под грибком носит монотонный характер. Меньшая скважность соответствует большим значениям ширины ЗТВ. Важно отметить, что средние значения ЗТВ под грибком ниже, чем при сварке стационарно горящей дугой и ИДС. Похожие закономерности наблюда-

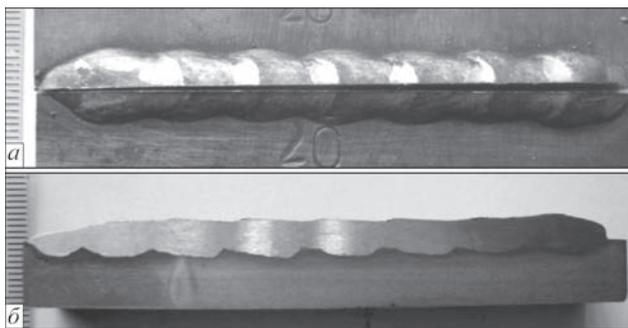


Рис. 5 Внешний вид наплавленного валика в режиме сварки пульсирующей дугой с частотой следования импульсов 0,3 Гц ($I_{п} = 160$ А, напряжение импульса $U_{п} = 24$ В; $I_{п} = 80$ А, $U_{п} = 18$ В); а — вид сверху; б — продольное сечение

ются и для ЗТВ как в корне шва (рис. 6, б), так и у поверхности шва. С ростом тока паузы угол сопряжения с основным металлом уменьшается для скважности 2, а для меньших значений практически не изменяется.

При режиме сварки с током импульса $I_{п} = 160$ А и током паузы $I_{п} = 120$ А (фиксированное время импульса 0,5 с) с ростом времени паузы увеличивается высота шва, несколько уменьшается ширина шва и уменьшается ширина ЗТВ, а глубина проплавления практически не изменяется. В случае фиксации времени паузы (0,5 с) и увеличения времени импульса высота шва уменьшается, а ширина шва увеличивается (что, по-видимому, связано с увеличением проплавляющей способности/эффективности). Ширина ЗТВ изменяется нелинейно, сначала увеличивается, потом уменьшается и снова увеличивается.

Анализ термических циклов сварки позволил установить следующие особенности: при ИДС скорость роста температуры металла участка перегрева ЗТВ больше, чем в случае сварки стационарной дугой; в высокотемпературной области от 1350 до 1000 °С охлаждение металла при ИДС происходит быстрее, а в области температур меньше 1000 °С — медленнее (рис. 7). Более детальный анализ влияния режимов импульсной сварки на скорость остывания металла ЗТВ при-

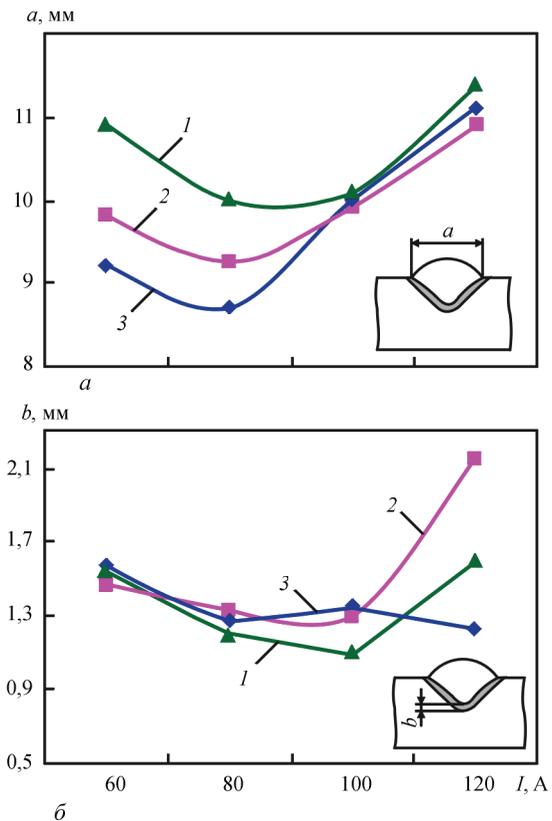


Рис. 6. Изменение параметров шва и ЗТВ при сварке пульсирующей дугой, $I_{п} = 160$ А, $U_{п} = 24$ В (скважность: 1 — 1,4; 2 — 1,5; 3 — 2,0): а — ширина шва; б — ширина ЗТВ в корне шва

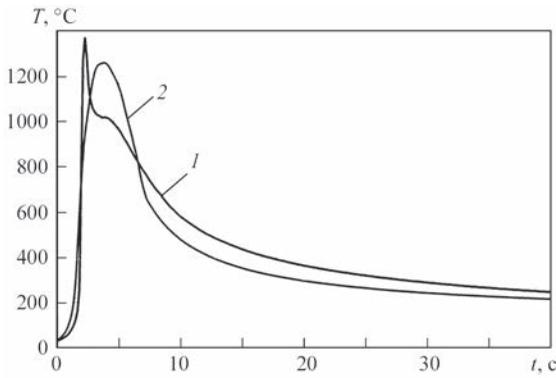


Рис. 7. Термические циклы сварки при наплавке высоколегированной сварочной проволоки ХОРДА 307 на пластины из стали 09Г2С толщиной 10 мм: $I_{св} = 120$ А, $U_{и} = 20$ В, скорость сварки 15 м/ч (1 — ИДС; 2 — сварка стационарной дугой)

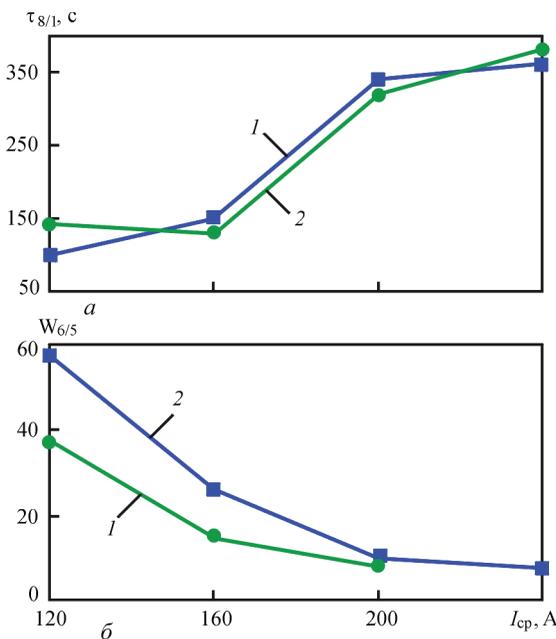


Рис. 8. Изменение времени (а) и скорости (б) охлаждения участка перегрева металла ЗТВ при ИДС (1) и сварке стационарной дугой (2) со скоростью 15 м/ч. Наплавка высоколегированной сварочной проволоки ХОРДА 307 на пластины из стали 09Г2С толщиной 10 мм

веден на рис. 8. Из приведенных данных видно, что скорость охлаждения металла в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 600...500 °С для ИДС меньше, чем в случае сварки стационарной дугой, а время $\tau_{8/1}$ имеет близкие значения.

Изменение условий охлаждения, наблюдаемые при переходе от сварки стационарно горячей дугой к ИДС позволяют предположить, что при данном процессе сварки в металле ЗТВ высокопрочных сталей с $\sigma_{0,2} > 600$ МПа будет формироваться более благоприятная структура с более высокой стойкостью к образованию холодных трещин и к хрупкому разрушению. Работы по этому направлению будут результатом наших дальнейших исследований.

Выводы

1. Импульсно-дуговая сварка позволяет уменьшить величину разбрызгивания металла, ширину зоны термического влияния, увеличить глубину проплавления (практически в 2 раза) по сравнению со стационарной сваркой. Скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °С при этом уменьшается практически в 1,5 раза.
2. Использование сварки пульсирующей дугой позволяет увеличить ширину шва и уменьшить ширину ЗТВ по сравнению со сваркой стационарно горячей дугой.
3. Процессы импульсно-дуговой сварки и сварки пульсирующей дугой отличаются большими возможностями для управления параметрами сварного шва и величиной тепловложения.

Список литературы/References

1. Зайцев М. П. (1953) *Способ сварки тонколистовой стали электрической дугой*. А. с. 100898 СССР 450109/К-578. Zajtsev, M.P. *Electric arc welding method of sheet steel*. USSR author's cert. 100898, 450109/К-578 [in Russian].
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B0#cite_note-2
3. Заруба И. И., Лебедев В. К., Шейко П. П. (1968) Сварка модулированным током. *Автоматическая сварка*, **11**, 35–40. Zaruba, I.I., Lebedev, V.K., Shejko, P.P. (1968) Welding with modulated current. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 35–40 [in Russian].
4. Ленивкин В. А., Дюржеров Н. Г., Сагиров Х. Н. и др. (1989) *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. Москва, Машиностроение. Lenivkin, V.A., Dyurgerov, N.G., Sagirov, Kh.N. et al. (1989) *Technological properties of welding arc in shielding gases*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Потапьевский А. Г. (2007) *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Ч. 1. Сварка в активных газах. Изд. 2-е, перераб. Киев, Екотехнологія. Potapievsky, A.G. (2007) *Consumable electrode welding in shielding gases*. Pt.1: Welding in active gases. 2nd Ed. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола Н. В. (1964) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса. *Автоматическая сварка*, **1**, 2–6. Paton, B.E., Potapievsky, A.G., Podola, N.V. (1964) Consumable electrode pulsed-arc welding with programmable control of process. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 2–6 [in Russian].
7. Лашченко Г. И. (2006) *Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом*. Киев, Екотехнологія. Lashchenko, G.I. (2006) *Methods of metal arc welding*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
8. Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. (1999) Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов. *Автоматическая сварка*, **6**, 26–32. Voropaj, N.M., Iyushenko, V.M., Lankin, Yu.N. (1999) Peculiarities of pulsed-arc welding with synergetic control of mode parameters. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 26–32 [in Russian].
9. Melton G. B., Aberg P. (1991) Soldadura por pulsacionnes con electrodos rellenos de fundente basico. *Дина*, **6**, 15–18.
10. (1995) *Рекламный проспект фирмы «Hobart»*. The ultimate by Hobart. Ultra – ARC350.

11. Шейко П. П., Павшук В. М. (1992) Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с плавным регулированием параметров. *Автоматическая сварка*, **6**, 44–46.
Shejko, P.P., Pavshuk, V.M. (1992) Power source for pulsed gas metal arc welding with smooth regulation of parameters. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 44–46 [in Russian].
12. Palani P. K., Murugan N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, **1**, 1–10.
13. Tong H., Ueyama T., Harada H. (2001) Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. *Sci. Technol. Weld. Join*, **6**(4), 203–208.
14. Needham J. C., Carter A. W. (1965) Material transfer characteristics with pulsed current. *Brit. Weld. J.*, **5**, 229–241.
15. Rajasekaran S. (1999) Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys. *Weld. J.*, **78**(2), 397–407.
16. Murray P. E. (2002) Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis. *Ibid*, **81**(7), 125–131.
17. Amin M., Ahmed N. (1987) Synergic control in MIG welding 2 – power current controllers for steady dc open arc operation. *Met. Construct.*, **7**, 331–340.
18. Amin M. (1983) Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. *Ibid*, **5**, 272–377.
19. Lambert J. A. (1989) Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding. *Weld. J.*, **68**(2), 35–43.
20. Essers W. G., Gompal Van. (1984) Arc control with pulsed GMA welding, *Ibid*, **64**(6), 26–32.
21. Amin M. (1981) Synergic pulse MIG welding. *Metal construction*, **6**, 349–353.
22. Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Денисенко А. В. (1999) Влияние модуляции тока на свойства сварных соединений низкоуглеродистых высокопрочных сталей, выполненных ручной дуговой сваркой. *Автоматическая сварка*, **4**, 13–18.
Mikhoduj, L.I., Poznyakov, V.D., Denisenko, A.V. (1999) Influence of current modulation on properties of low-carbon high-strength steel welded joints performed by manual arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 13–18 [in Russian].
23. Stanzel K. (2001) Pulsed GMAW cuts cycle time by 600 percent. *Weld. Des. Fabricat.*, **4**, 85–87.
24. Tippins J. (1970) Box beam fabrication using the pulsed MIG process. *Met. Construct. Brit. Weld. J.* **2**, 547–550.
25. Harvey R. C. (1995) Gas metal arc welding fume generation using pulsed current. *Ibid*, **74**(11), 59–68.
26. Tseng K., Chou C. (2002) The effect of pulsed GTA welding on the residual stress of a stainless steel weldment. *Journal of materials processing technology*, **1**, 346–353.
27. Krantz B. M., Coppolecchia V. (1971) The Effects of Pulsed Gas Metal-Arc Welding Parameters on Weld Cooling Rates. *Welding Research Supplement*, **11**, 474–479.
28. Fragetta W. A. (1968) Pulsed power welding of HY-130(T) steel, the effects of welding parameters on arc stability and fusionzone dimensions. Part I. *Air Reduction Co., Inc., Murray Hill, N. J. RE-68-002- CRE-44 Contract NObs-94535* (Jan. 15, 1968).
29. Походня И. К., Головки В. В., Грабин В. Ф., Васильев В. Г. (1997) Особенности термического цикла сварки под флюсом пульсирующей дугой. *Автоматическая сварка*, **9**, 3–8.
Pokhodnya, I.K., Golovko, V.V., Grabin, V.F., Vasiliev, V.G. (1997) Peculiarities of thermal cycle of submerged pulsed-arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 3–8 [in Russian].
30. Joseph D., Farson D. Harwig R. (2005) Richardson Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. *Science and Technology of Welding and Joining*, **10**, 3, 311–318.
31. Tomoyuki Ueyama (2013) Trends in developments in gas shielded arc welding equipment in Japan. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 53–60.

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ПАРАМЕТРИ МЕТАЛУ ШВА ТА ЗТВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ ДРОТОМ СВ-08X20N9Г7Т

В. Д. ПОЗНЯКОВ, А. В. ЗАВДОВЄВ, О. А. ГАЙВАРОНСЬКИЙ, А. М. ДЕНИСЕНКО, А. А. МАКСИМЕНКО

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Імпульсно-дугове зварювання характеризується періодично змінюваною потужністю дуги та, завдяки своїм особливостям, дозволяє вирішувати складні технологічні питання при створенні унікальних конструкцій, збільшувати продуктивність процесів зварювання, наплавляти корозійностійкі сплави на сталь. В даний час існує безліч виробників зварювального обладнання, які впровадили в своєму виробництві ідеї застосування імпульсного зварювання. Однак дані про вплив імпульсно-дугового зварювання на термічні цикли зварювання носять розрізнений характер і тому важко провести зіставлення між термічними циклами, характерними для зварок стаціонарно палаючою та імпульсною дугою. При зварюванні високовуглецевих сталей виникає необхідність зменшення перемішування металу шва з основним металом і підвищення за рахунок цього опірності зварних з'єднань утворенню холодних тріщин. Для успішного застосування імпульсно-дугового зварювання в рішенні перерахованих вище завдань виникла необхідність в порівняльних дослідженнях впливу режимів імпульсно-дугового зварювання на параметри швів, ЗТВ і термічні цикли зварювання в порівнянні зі зварюванням стаціонарно палаючою дугою, виконаних високолегованими зварювальними матеріалами. Це було основною метою досліджень, результати яких наведені в даній статті. Бібліогр. 31, рис. 8.

Ключові слова: імпульсно-дугове зварювання, зварювання пульсуючою дугою, термічний цикл зварювання, зона термічного впливу, високолеговані зварювальні матеріали

EFFECT OF THE MODES OF PULSED-ARC WELDING ON THE PARAMETERS OF WELD AND HAZ METAL OF WELDED JOINTS MADE WITH SV-08KH20N9G7T WIRE

V. D.P OZNYAKOV, A. V.Z AVDOVEEV, A. A.G AYVORONSKY, A.M .D ENISENKO, A. A.M AKSYMENKO

E.O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail:office@paton.kiev.ua

Pulsed arc welding is characterized with periodically varying arc power and due to its peculiarities allows solving complex technological issues in development of unique structures, rising efficiency of welding processes, deposit corrosion-resistant alloys on steel. Up to the moment there are a great number of producers of welding equipment introducing in their production the ideas of application of pulsed welding. However, data on effect of pulsed arc welding on the welding thermal cycles have odd nature and, therefore, it is difficult to carry out comparison between the thermal cycles typical for stationary and pulsed arc welding. In welding of high-carbon steels there is a problem of reduction of weld metal stirring with a base metal and due to this increase of welded joint cold crack resistance. Successful application of pulsed arc welding for solution of the problems mentioned above provoked a need in the comparative investigations of effect of modes of pulsed arc welding on parameters of the welds, HAZ and welding thermal cycles in comparison with stationary arc welding produced with high-alloy welding consumables. This was the main aim of the investigations, the results of which are given in this paper. Ref. 31, Fig. 8.

Keywords: pulsed arc welding, welding with pulsating arc, welding thermal cycle, heat affected zone, high-alloy welding consumables

Поступила в редакцию 05.07.2018



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Восьмая международная конференция
**ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И
ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

9 – 13 сентября 2019 г.
Украина, Одесса,

Председатель программного комитета
академик И.В. Кривцун

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

Украина, 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>

