

УДК 621.791.9

В. А. Лебедев, д-р техн. наук;

Г. В. Жук;

С. А. Лой

(Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС им. Е. О. Патона))

Основные эксплуатационные характеристики сварного соединения и наплавленного слоя при электродуговой сварке-наплавке с импульсной подачей электродной проволоки

Механизированная и автоматическая электродуговая сварка и наплавка для восстановления или упрочнения с использованием плавящегося электрода — один из наиболее востребованных технологических процессов [1]. При выполнении сварочных работ применяются как сплошные, так и порошковые электродные проволоки. Сварка и наплавка могут проводиться в различных пространственных положениях как в обычных, так и в особых условиях, например в водной среде. При этом свариваемые конструкции могут быть из сталей различных типов и назначений, а также из сплавов алюминия [2].

Одной из основных проблем, которые неизбежно возникают при сварке и наплавке, является обеспечение прочности, износостойкости сварного соединения и наплавленного слоя. Решению этой задачи способствуют многие условия, основные из которых следующие:

- выбор электродных материалов;
- установление приемлемых режимов ведения процесса (ток, напряжение, скорость перемещения сварочного инструмента);
- применение рациональных конструкций (толщина, длина, положение и условия ведения процесса);
- применение дополнительных внешних воздействий (электромагнитные поля, поток защитного газа, вибрация изделия и электродной проволоки, локальное охлаждение изделия).

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей повышения показателей прочности и износостойкости при целенаправленном применении

в сварочном процессе управляемых вибрационных воздействий в виде импульсных движений электродной проволоки и колебаний изделия.

Далее будут рассмотрены и проанализированы аппаратные средства, используемые в системах сварочного оборудования для решения ряда технико-технологических задач, основные из которых связаны с обеспечением необходимого уровня эксплуатационных характеристик сварного соединения или наплавленного слоя.

Следует подчеркнуть, что механические свойства сварного соединения и наплавленного слоя определяются комплексной характеристикой, которая зависит, в том числе, от соотношения механических свойств металлов шва, зоны термического влияния и основного металла. Можно для примера отметить, что сварное соединение из конструкционных сталей можно считать кондиционным, если оно обеспечивает величины предела прочности и предела текучести не ниже, чем у основного металла, и при этом имеет достаточный запас пластичности. Для наплавленного слоя важным является решение задачи получения высоких показателей износостойкости.

Очевидно, что получение качественных с точки зрения прочности швов и наплавленных слоев — это многокомпонентная проблема с рядом критериев, которые можно удовлетворить, решив ряд задач.

Далее рассмотрим возможности способа сварки с импульсной подачей электродной проволоки применительно к повышению показателей прочности и износостойкости при дуговой сварке и наплавке. Такой способ сварки в механизированном и автома-

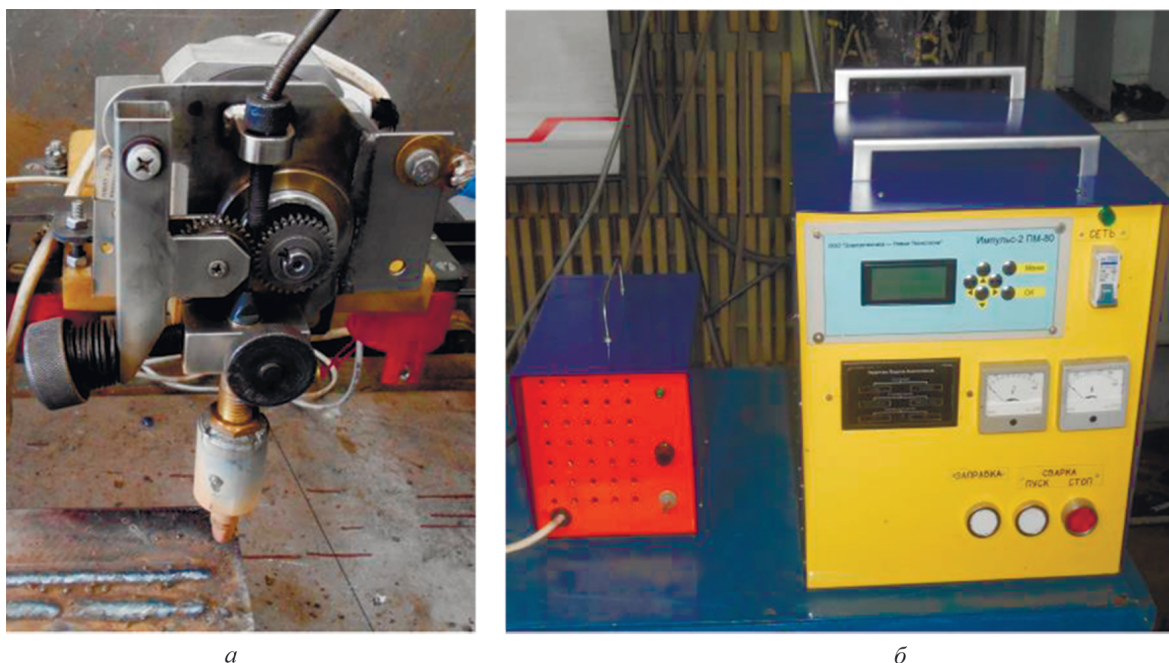


Рис. 1. Система управления импульсной подачей электродной проволоки: а) механизм; б) система управления

тическом оборудовании решается при применении разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона системы управления скоростью подачи электродной проволоки, которая базируется на основе компьютеризованного быстродействующего безредукторного электропривода с вентильным электродвигателем [3]. Такой электропривод обеспечивает достаточно сложный алгоритм движения электродной проволоки с возможностью регулирования частоты, скважности, амплитуды, которые позволяют влиять на характеристики сварного соединения, наплавленного валика, структуру металла в характерных зонах. Все это обеспечивается управляемым переносом электродного металла с заданными импульсной подачей параметрами.

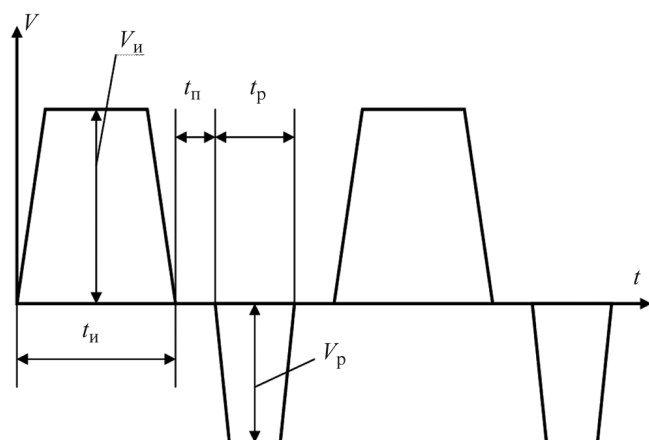


Рис. 2. Циклограмма импульсной подачи электродной проволоки: $V_{и}$, $V_{р}$ — скорость в импульсе и реверсе соответственно; $t_{и}$, $t_{п}$, $t_{р}$ — время в импульсе, паузе и реверсе соответственно

На рис. 1 представлена система для управления импульсным движением электродной проволоки. На рис. 2 и 3 показан алгоритм (циклограмма) работы механизма подачи и осциллограммы напряжения и скорости подачи электродной проволоки. Следует отметить, что каждому импульсу подачи соответствует акт переноса капли электродного металла с коротким замыканием дугового промежутка. Управление переносом электродного металла с определенными (заданными) параметрами позволяет решить комплекс технико-технологических задач, которые частично описаны в научно-технической периодике, например [4, 5].

Остановимся на эффектах, которые касаются рассматриваемой проблемы улучшения характеристик прочности и износостойкости свариваемых или наплаваемых конструкций.

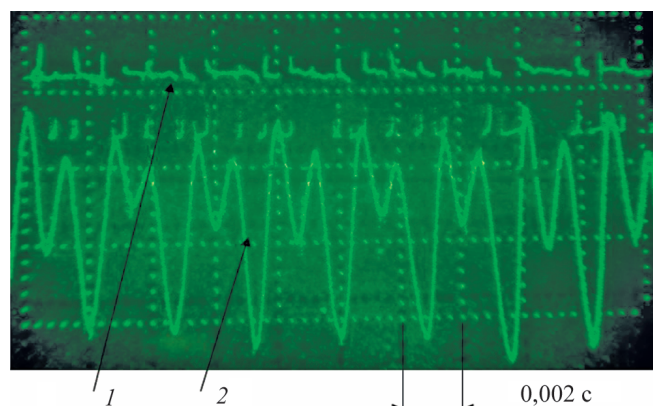


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (1) и скорости подачи (2) электродной проволоки

Влияние способа сварки с импульсной подачей электродной проволоки на геометрические параметры наплавленного валика

Следует уточнить, что к геометрическим параметрам наплавленного валика согласно [6] относятся выпуклость h , ширина w , глубина проплавления p . Кроме этих параметров, зачастую для характеристики формы валика также используется угол сопряжения α наплавленного валика с изделием (рис. 4).

В экспериментах высоту усиления, ширину, глубину проплавления, угол сплавления с достаточной степенью точности определяли с помощью программного обеспечения на полученных микрошлифах.

На рис. 4 также для примера представлены гистограммы в одной из характерных точек валиков, наплавленных электродной проволокой Св08Г2С диаметром 1,2 мм на конструкционную сталь в нижнем положении в CO_2 . Использовались режимы: ток процесса 160–170 А; напряжение 24–25 В. Установленная скважность импульсной подачи $S = 5$ ед., частоты f в диапазоне 0–60 Гц. Также на гистограммах показаны потери Ψ электродного металла на угар и разбрызгивание, величина которых коррелируется с некоторыми параметрами шва (общее наполнение валика).

Экспериментальные и расчетные данные [7–9] показывают, что с применением импульсной подачи электродной проволоки при фиксированной скважности (в рассматриваемом случае $S = 5$ ед.) и увеличении частоты импульсной подачи с 10 до 60 Гц наблюдаются следующие закономерности: увеличивается глубина проплавления, уменьшается высота усиления наплавленного валика, улучшаются условия формирования внешней поверхности наплавленного металла.

Можно отметить, что указанные закономерности в своих основных тенденциях характерны и для других условий ведения дугового процесса. При этом, как показали данные скоростной видеосъемки, именно периодическое удлинение дуги оказывает наибольшее влияние на геометрию валика наплавленного металла, разумеется, кроме силы тока и напряжения. В свою очередь, длина дуги при импульсной подаче зависит от скважности и частоты. Периодически удлиняющаяся дуга обладает меньшей силой давления на ванну расплавленного металла, по сравнению с дугой аналогичного процесса с постоянной подачей электродной проволоки. Поэтому расплавленный металл ванны менее интенсивно оттесняется в ее хвостовую часть, а жидкая прослойка под дугой увеличивается, уменьшая глубину проплавления. Ширина валика не меняется при увеличении длины дуги, поскольку

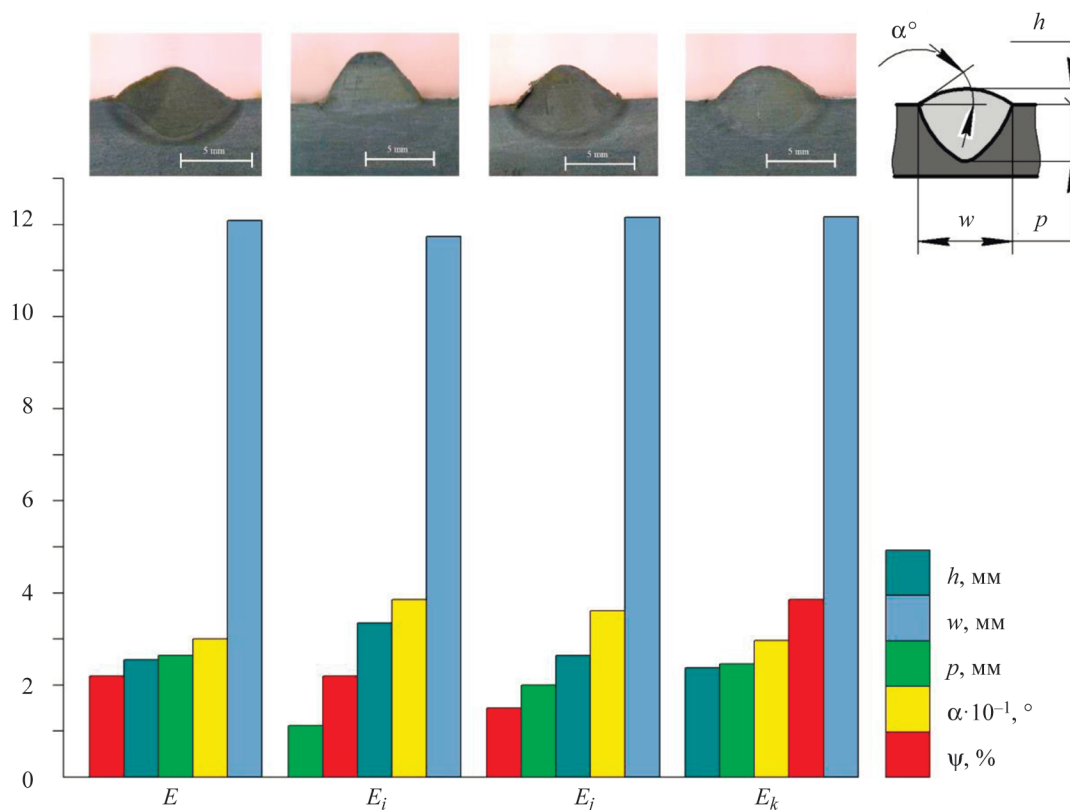


Рис. 4. Гистограмма параметров наплавленного слоя при скважности $S = 5$ ед. в зависимости от f : E ($f = 0$ Гц); E_i ($f = 10$ Гц); E_j ($f = 35$ Гц); E_k ($f = 60$ Гц)

с фактическим уменьшением тока (проволока в этот период неподвижна) напряжение не увеличивается.

Очевидно, что импульсная подача электродной проволоки позволяет управлять геометрическими параметрами сварного соединения путем выбора скважности и частоты импульсной подачи.

Покажем, каким образом возможность управления геометрическими размерами наплавленного металла при импульсной подаче влияет на характеристики прочности сварного соединения. В работе [10] рассмотрен вопрос влияния усиления шва при сварке стыкового соединения на напряженное состояние при действии нагрузок, а также определены условия выбора величины усиления шва, позволяющие получить оптимальные прочностные характеристики соединения. Величина усиления

$$h = 0,5 \left(\frac{k_{\text{пер}}}{k_{\text{мш}}} - 1 \right),$$

где $k_{\text{пер}}$ — коэффициент, характеризующий неравномерность распределения напряжений в металле шва; $k_{\text{мш}}$ — коэффициент снижения прочности металла шва в сравнении с основным материалом.

Следует указать, что коэффициенты $k_{\text{пер}} \geq 1$, $k_{\text{мш}} \leq 1$ оцениваются по специальным методикам для определенных видов соединений и способов их получения. Для нашего исследования важно отметить, что вне зависимости от установленных режимов сварки (ток, напряжение, скорость ведения процесса), которые, безусловно, влияют на величину усиления шва или наплавленного валика, появляется возможность управлять этим параметром, а следовательно, прочностью сварного соединения, используя способ сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки и устанавливая необходимые значения (шаг, скважность) импульсов ее движения.

Влияние способа импульсной подачи на структуру металла шва и наплавленного валика

В соответствии с выводами работы [11] прочностные характеристики металла шва во многом определяет наличие столбчатых кристаллов, рост которых обуславливается перегревом расплавленной ванны, низкой скоростью сварки и хорошим теплоотводом изделия со значительной массой. Для решения задачи управления ростом столбчатых кристаллов необходима организация цикла сварки с влиянием на указанные выше характеристики.

В работе [12] отмечено, что наиболее действенными способами измельчения структуры наплавленного металла являются управление степенью concentra-

ционного переохлаждения, а также воздействие сопутствующих и специально введенных колебаний на ванну жидкого металла.

Исходя из вышесказанного, а также согласно данным [12, 13] условием подавления роста столбчатых кристаллов является снижение перегрева сварочной ванны, т. е. снижение теплосодержания ванны жидкого металла. Поэтому можно записать выражения для теплосодержания ванны. Очевидно, что для подавления роста столбчатых кристаллов необходимо выполнение условия

$$S_{\text{п}} \rightarrow S_{\text{пл}},$$

где $S_{\text{п}}$ — теплосодержание ванны при температуре перегрева $T_{\text{п}}$; $S_{\text{пл}}$ — теплосодержание ванны при температуре плавления $T_{\text{пл}}$.

Превышение температуры перегрева жидкой ванны над температурой плавления определяется как

$$\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{пл}}.$$

Величина ΔT должна быть минимальной для решения задачи подавления роста кристаллов и, соответственно, повышения показателей прочности свариваемого изделия. Это возможно, в том числе, при периодическом отводе источника нагрева (дуги) от точки перегрева, что, как уже отмечалось, достижимо при выполнении относительных колебательных движений дуги.

Определение параметров дугового процесса и относительных колебаний дуги будем вести на основе выведенного в [14] уравнения

$$\Delta T(h) = \frac{0,24P\eta}{2\pi\lambda} \cdot \frac{v_{\text{п}}}{a} \left(1 - \frac{v_{\text{п}}h}{2a} \right),$$

где P — мощность дуги; η — эффективный коэффициент процесса нагрева изделия дугой; λ — коэффициент теплопроводности; $v_{\text{п}}$ — скорость перемещения источника нагрева; a — коэффициент температуропроводности; h — координаты точки, где определяется температура.

Очевидно, что, задаваясь определенной производительностью сварки и наплавки, весьма сложно, используя обычные дуговые процессы, изменить величины U , I , η , $v_{\text{п}}$. Используя импульсные алгоритмы управления подачей электродной проволоки и ее колебания, можно в существенной степени влиять на указанные величины.

В работе [15] проанализировано уравнение, описывающее мощность (энергозатраты) $P_{\text{и. ср}}$ на плавление электродной проволоки при импульсной подаче с частотой f и имеющее следующий несколько уточненный вид:

$$P_{\text{и. ср}} = \beta n \left(k_{\text{ф}} T - K \frac{f}{b\delta^2} e^{-aT} \right),$$

Затраты энергии на дуговой процесс, Вт/м³

| Подача электродной проволоки | При обратной полярности | | При прямой полярности | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| | Ток наплавки 130 А | Ток наплавки 200 А | Ток наплавки 130 А | Ток наплавки 200 А |
| Классическая | 10,85 | 11 | 8,3 | 6,3 |
| Импульсная | 7,2 | 8,9 | 6,4 | 6,2 |

где β , n — коэффициенты, характеризующие электродную проволоку (тип, диаметр), параметры сварочной цепи и дугового процесса (ток I , напряжение U); T — время цикла переноса электродного металла; b — частота затухающих колебаний в сварочной цепи при плавлении электродной проволоки; a — величина, определяемая постоянной времени сварочной цепи; δ — коэффициент, определяющий параметры (постоянные времени) сварочной цепи; k_{ϕ} — коэффициент, учитывающий форму и скважность импульсов подачи; K — коэффициент, характеризующий колебательную часть процесса.

Уменьшение затрат энергии при одной и той же скорости плавления электродной проволоки — это реальный способ снижения ΔT , а следовательно, ограничение роста столбчатых кристаллов.

Важным параметром, влияющим на снижение ΔT , является коэффициент η процесса нагрева изделия дугой при сварке-наплавке, который различается для способов с конвенциональной и импульсной подачей электродной проволоки.

Величину ΔT для процесса с импульсной подачей электродной проволоки можно определить следующим образом [16]:

$$\Delta T(h) = \frac{UI_{и}\eta^2 v_{п}}{2\pi\lambda\eta_{и} a} \left(1 - \frac{v_{п}}{2a}\right) \frac{t_{и}}{1 + t_{п}/t_{и}},$$

где $I_{и}$ — ток в импульсе; $t_{и}$, $t_{п}$ — время действия импульса и паузы соответственно; $\eta_{и}$ — коэффициент процесса нагрева изделия дугой при сварке-наплавке с импульсной подачей электродной проволоки.

Следует еще раз отметить, что эффективные коэффициенты процесса нагрева изделия дугой при сварке без импульсной подачи электродной проволоки (η) и с импульсными алгоритмами ($\eta_{и}$) существенно отличаются друг от друга. Об этом свидетельствуют данные исследований [17] и [18]. При этом практически всегда выполняется соотношение

$$\eta_{и} \geq \eta. \quad (1)$$

Выражение (1) можно отнести к одному из основных факторов уменьшения перепада температур ΔT .

Параметры $\eta_{и}$, η зависят от всего многообразия характеристик дугового процесса, и их значения можно определить экспериментальным путем.

Подтверждением (1) являются эксперименты по наплавке с условием получения процесса с одинаковым расходом электродной проволоки и выбором режимов с удовлетворительными результатами наплавки. Применялась проволока Св08Г2С диаметром 1,2 мм в среде CO_2 . Некоторые результаты экспериментов представлены в табл. 1. Затраты энергии показаны в виде Вт/м³, т. е. приведены к объему расплавленной проволоки.

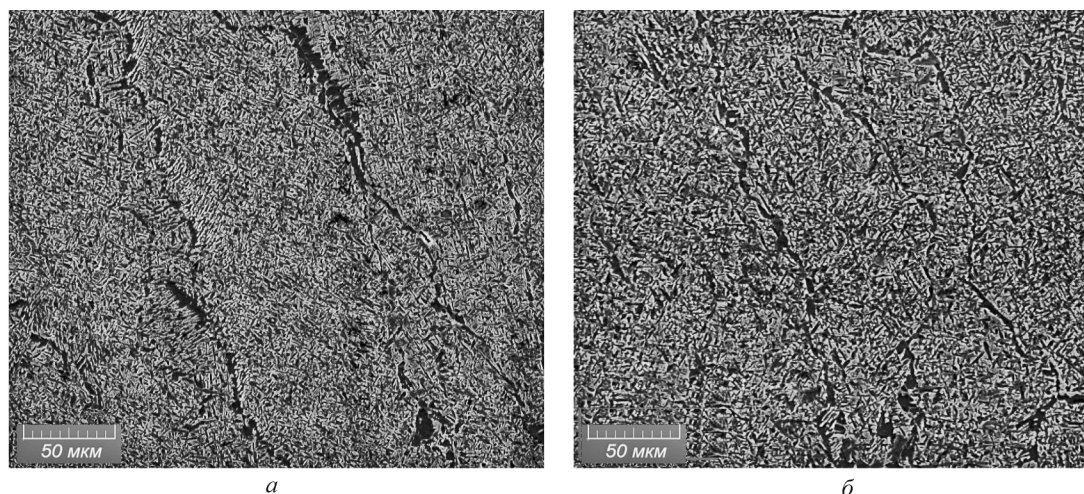


Рис. 5. Микроструктура наплавленного в среде CO_2 металла 30ХГСА, данные электронной микроскопии при классической (а) и импульсной (б) подаче электродной проволоки, $\times 1000$

Таблица 2

**Количественные показатели формы кристаллитов
в наплавленном металле 30ХГСА в среде CO₂**

| Подача электродной проволоки | Ширина кристаллитов, мкм | Коэффициент формы кристаллитов |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Классическая | 97,5 | 6,8 |
| Импульсная | 70,0 | 4,56 |

Изменение структуры металла шва при классической и импульсной подаче можно видеть на примерах микрошлифов на рис. 5.

Геометрические размеры кристаллов при сварке-наплавке с упомянутыми способами подачи электродной проволоки показаны в табл. 2.

Сопутствующим фактором при импульсной подаче проволоки, влияющим на прочность, является дезориентация кристаллов в структуре металла шва.

На изменения в структуре металла шва при импульсной подаче электродной проволоки (размеры кристаллов, их дезориентация) влияют как меняющиеся характеристики теплового поля, так и механические колебания ванны в результате действия электродинамических сил при импульсах тока.

Трибологические особенности металла, наплавленного с импульсной подачей электродной проволоки

Испытания на износостойкость металла при трении по металлу проводили на установке для комплексной оценки свойств наплавленного металла,

разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона, при условиях: удельное давление в месте контакта 100 МПа; скорость трения 11–12 м/мин; температура кольца-контртела (по ГОСТ 12423-66) 23 ± 2 °С; температура на поверхности испытуемого образца в контактной зоне 30–40 °С; время испытания 1 ч. Размеры кольца-контртела, изготовленного из закаленной стали 45: диаметр 110 мм, ширина 30 мм, толщина 20 мм; размеры образца — 10 × 20 × 40 мм. Некоторые результаты исследований темпа износа при наплавке сплошной проволокой Нп-30ХГСА \varnothing 1,2 мм на режимах при токе 220 А и напряжении 26 В приведены в табл. 3 [19].

Для сравнения испытывали также образцы, полученные при постоянной подаче электродной проволоки. Сопrotивление изнашиванию оценивали по потере массы ΔG испытуемого образца и истирающего кольца до и после изнашивания. Сравнительные испытания проводились трехкратно для каждого режима.

Как видно из полученных результатов, при импульсной подаче с $f = 15$ Гц и $S = 3-5$ ед. уже в первом наплавленном слое можно достичь уровня износостойкости пятого наплавленного слоя, выполненного с постоянной подачей электродной проволоки. Обеспечивается повышение износостойкости при импульсной подаче практически вдвое при однослойной наплавке и в 1,2–1,4 раза при пятислойной, по сравнению с постоянной подачей электродной проволоки.

Основная причина снижения износостойкости объясняется возможностью при помощи импульсной подачи существенно снизить глубину проплавления основного металла и таким образом уберечь наплавленный слой от разбавления, а также сохранить в металле шва легирующие элементы.

Таблица 3

Результаты исследований темпа износа при испытаниях на износостойкость металла

| № испытания | Частота f , Гц | Сквжность S , ед. | Количество слоев n | Темп износа, мм ³ /км | | | Средний темп износа, мм ³ /км |
|-------------|------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|-------------|-------------|--|
| | | | | Образец № 1 | Образец № 2 | Образец № 3 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 6,8 | 7,5 | 7,6 | 7,3 |
| 2 | 15 | 3 | 1 | 3,8 | 4,0 | 3,6 | 3,8 |
| 3 | 60 | 3 | 1 | 6,5 | 6,9 | 6,4 | 6,6 |
| 4 | 60 | 5 | 1 | 5,9 | 5,4 | 6,1 | 5,8 |
| 6 | 1 | 1 | 5 | 3,5 | 3,7 | 4,5 | 3,9 |
| 7 | 15 | 3 | 5 | 3,1 | 3,3 | 3,2 | 3,2 |
| 8 | 60 | 3 | 5 | 3,9 | 3,2 | 3,1 | 3,4 |
| 9 | 60 | 5 | 5 | 3,4 | 3,0 | 3,5 | 3,3 |

Влияние импульсной подачи электродной проволоки на переход легирующих элементов

Уточним, что с помощью импульсной подачи электродной проволоки возможно регулировать частоту коротких замыканий и перенос капли электродного металла в сварочную ванну. Зачастую частота коротких замыканий с импульсной подачей, в отличие от конвенциональной, при неизменных энергетических параметрах непременно ведет к увеличению объема переносимой капли [18, 19]. Известно также [20], что крупнокапельный перенос электродного металла нежелателен, поскольку, кроме прочих недостатков, возможно снижение качества наплавленного слоя из-за относительно большой собственной площади поверхности капли, через которую происходит выгорание и окисление легирующих элементов при их контакте с кислородом — продуктом диссоциации углекислого газа. Были проведены исследования влияния частоты и скважности импульсной подачи на переход легирующих элементов в слой наплавленного металла в диапазонах частоты 10–30 Гц и скважности 3–5 ед., наиболее подходящих для снижения глубины проплавления основного металла, повышения стабильности и снижения потерь электродного металла в процессе наплавки. В исследованиях применялись проволоки Нп-30ХГСА, а также ЭП-690, поскольку в их состав входит большое количество различных

легирующих элементов. Режим наплавки: ток 220 А, напряжение $U = 26$ В.

В исследованиях для Нп-30ХГСА контролировался переход в наплавленный металл углерода, кремния, марганца, хрома, а для ЭП-690 — хрома, никеля, марганца и молибдена. Для Нп-30ХГСА выполнялась однослойная и пятислойная наплавка, а для ЭП-690 — пятислойная на пластины из стали 09Г2С в CO_2 при конвенциональной и импульсной подаче электродной проволоки. Химический состав наплавленного слоя определялся с использованием атомно-эмиссионного метода спектроскопии на оборудовании аналитической испытательной лаборатории ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Результаты исследований представлены в табл. 4 [21, 22].

Из табл. 4 видно, что при импульсной подаче, несмотря на некоторое увеличение объема капли и длительности ее пребывания на торце электродной проволоки, снижение перехода легирующих элементов в слой наплавленного металла не наблюдается.

Особенности напряженно-деформированного состояния при использовании способа сварки-наплавки с импульсной подачей электродной проволоки

Способ сварки, дающий возможность при одинаковой производительности сварки и наплавки уменьшить величину остаточных напряжений, имеет преимущество над остальными. Способ сварки-наплавки с импульсной подачей электродной проволоки характеризуется строгой регулируемой цикличностью по длительности горения дуги, что влияет на количество вносимой теплоты в основной металл и, как следствие, на величину остаточных напряжений.

Известно [23], что наиболее опасными при сварке плавлением являются растягивающие напряжения. При их превышении в локальных объемах более величины предела текучести материала напряженно-деформированное состояние характеризуется переходом из упругой зоны в упруго-пластическую, где в зависимости от степени такого превышения увеличивается интенсивность приращения пластической деформации. В макрообъемах сварных соединений о данном переходе свидетельствуют напряжения, равные пределу текучести данного материала.

Определение остаточных напряжений в элементах конструкций для частот импульсной подачи 1, 20, 30, 40 Гц, скважности 1, 3, 5 ед. проводилось на основе электронной спекл-интерферометрии и метода конечных элементов [24]. Однослойная наплавка валиков выполнялась электродной проволокой 30ХГСА диаметром 1,2 мм (ток 220 А, напряжение 26 В).

Таблица 4

Массовая доля легирующих элементов в наплавленном слое, %

| Проволока Нп-30ХГСА (1 слой) | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| (f/S) | C | Cr | Mn | Si |
| (20/5) | 0,17 | 0,55 | 1,06 | 0,80 |
| Конвенциональная подача | 0,17 | 0,63 | 1,10 | 0,87 |
| Проволока Нп-30ХГСА (5 слоев) | | | | |
| (20/5) | 0,21 | 0,98 | 0,84 | 0,78 |
| Конвенциональная подача | 0,20 | 0,90 | 0,81 | 0,70 |
| Проволока ЭП-690 (5 слоев) | | | | |
| (f/S) | Ni | Cr | Mn | Mo |
| 1 (20/3) | 15,9 | 18,5 | 6,5 | 3,2 |
| 2 (60/3) | 15,5 | 18,3 | 6,5 | 3,2 |
| 3 (20/5) | 15,7 | 18,4 | 6,4 | 3,2 |
| 4 (60/5) | 15,6 | 18,2 | 6,5 | 3,2 |
| Конвенциональная подача | 15,6 | 18,4 | 6,6 | 3,2 |

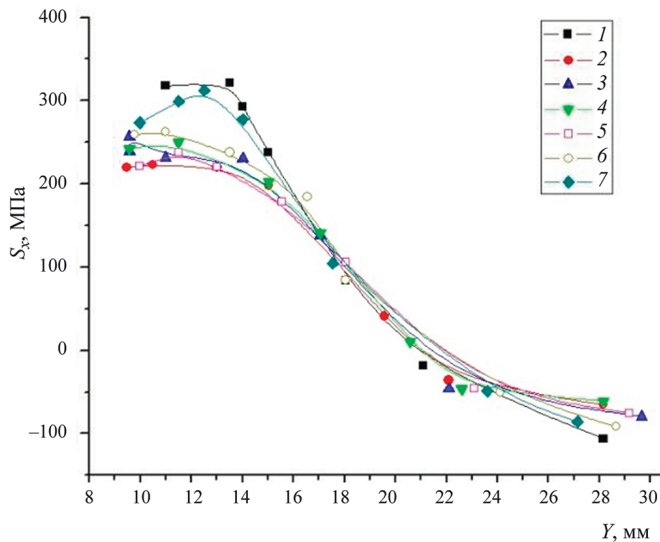


Рис. 6. График изменения величины остаточных напряжений при конвенциональной и импульсной постоянной подаче электродной проволоки: 1 — $f = 1$ Гц, $S = 1$ ед.; 2 — $f = 20$, $S = 5$; 3 — $f = 30$, $S = 5$; 4 — $f = 40$, $S = 5$; 5 — $f = 20$, $S = 3$; 6 — $f = 40$, $S = 3$; 7 — $f = 60$, $S = 3$

На рис. 6 представлены изменения остаточных напряжений σ_x на расстоянии Y от продольной оси валика в зоне термического влияния. Данные рис. 6 свидетельствуют, что для постоянной подачи электродной проволоки в зоне термического влияния при $Y \leq 15$ применение импульсной подачи электродной проволоки на оптимальных режимах ($f = 20$ Гц, $S = 5$ ед.) позволяет снизить остаточные напряжения на 30%, что уже достаточно надежно обеспечивает сохранение упругого напряженно-деформированного состояния в этой зоне, что может способствовать снижению поводов (деформаций) наплавляемого изделия, а также повышению технологической прочности.

Выводы

1. Применение способа сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки является прогрессивным достижением, оказывающим многостороннее влияние как на технологические особенности дугового процесса, так и на совершенствование технических средств для автоматической и механизированной сварки и наплавки.
2. Импульсная подача, реализованная в оборудовании для сварки-наплавки плавящимся электродом, — эффективный и универсальный инструмент повышения показателей прочностных характеристик конструкций, которые свариваются или наплавляются электродными проволоками различных типов и разных диаметров (сплошные, порошковые).

3. Основными результатами, получаемыми при импульсной подаче электродной проволоки и влияющими на прочность сварного шва и износостойкость наплавленного слоя, являются: возможность управления геометрическими размерами наплавленного валика, ограничение роста кристаллитов и их дезориентация; снижение уровня выгорания легирующих элементов в металле шва и наплавленном слое.
4. Характеристики импульсов подачи электродной проволоки оказывают различное влияние на прочность сварного соединения или наплавленного валика, и это обуславливает следующий этап исследования влияния импульсной подачи на прочность — поиск диапазона оптимальных параметров процесса для обеспечения максимального результата от всех эффектов импульсных воздействий.

Список литературы

1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автоматическая сварка. 2003. Октябрь–ноябрь. С. 7–13.
2. Маковецкая О. К. Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008–2011 гг. и прогноз его развития // Автоматическая сварка. 2012. № 6. С. 44–50.
3. Лебедев В. А., Гулый М. В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2014. № 6. С. 47–51.
4. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Жук Г. В., Драган С. В. Механические импульсные и вибрационные воздействия в оборудовании и технологиях механизированной сварки и наплавки // Вібрації в техніці та технології: Збірник тез доповідей XVI Між. наук.-техн. конф. М.: Вінниця. 26–27.09.2017. С. 10–16.
5. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Лендел И. В., Полосков С. Ю. Использование механических импульсов для управления процессами автоматической и механизированной сварки плавящимся электродом // Сварка и диагностика. 2013. № 6. С. 16–20.
6. ГОСТ 2601-84 (ДСТУ 3761.3-98). Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов, 1984.
7. Лебедев В. А. Особенности сварки сталей с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2007. № 8. С. 30–35.
8. Lebedev V., Reisinger U., Lendel I. Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed // Welding in the World. February, 2016. P. 9.
9. Крюков А. В., Павлов Н. В., Зеленковский А. А. Особенности сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Технология машиностроения. 2013. № 7. С. 30–31.
10. Ермолаев Г. В., Мартыненко В. А., Марунец И. В. Влияние выпуклости шва на напряженное состояние стыкового соединения при растяжении // Автоматическая сварка. 2014. № 8. С. 28–34.
11. Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Сварочное производство. 1976. № 2. С. 1–3.

12. *Ивочкин И. И.* Подавление роста столбчатых кристаллов методом «замораживания» сварочной ванны // Сварочное производство. 1965. № 12. С. 52–55.
13. *Зернин Е. А., Кузнецов М. А.* Способы модифицирования наплавленного металла наноструктурированными порошками для увеличения механических свойств сварных соединений // Научное обозрение. Технические науки. 2015. № 1. С. 197–198.
14. *Лебедев В. А., Драган С. В., Галь А. Ф., Козырко О. А.* Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочную ванну для структуризации металла при автоматической дуговой наплавке // Збірник наукових праць НУК. Обробка матеріалів у машинобудуванні. 2016. № 1. С. 19–26.
15. *Лебедев В. А.* Энергосбережение при электродуговой механизированной и автоматической сварке с импульсной подачей электродной проволоки // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 1. С. 34–38.
16. *Лебедев В. А., Жук Г. В.* Анализ параметров механических управляемых колебаний в системах подачи электродной проволоки механизированного и автоматического оборудования для электродуговой сварки и наплавки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. «Нові рішення в сучасних технологіях». 2018. № 45. С. 16–24.
17. *Лебедев В. А.* Обеспечение качества сварных соединений и наплавленных слоев при механизированных дуговых процессах // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 8. С. 11–16.
18. *Tewari S. P.* Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon steel Welds of Different Thickness // ISIJ International. 2009. Vol. 14, № 4. P. 17–27.
19. *Лендел И. В.* Дуговая наплавка в углекислом газе с импульсной подачей электродной проволоки: Дис. ... канд. техн. наук. К.: ИЭС им. Е. О. Патона, 2015.
20. *Потаповский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1. Сварка в активных газах / 2-е изд. К.: ЭкоТехнология, 2007.
21. *Костин В. А.* Комплексная оценка влияния содержания марганца и титана на структуру и свойства сварных швов низколегированных сталей // Вісник Приазовського ДТУ. 2008. № 18. С. 198–202.
22. *Лебедев В. А., Лендел И. В.* Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 9. С. 20–27.
23. *Рябцев И. А., Сенченков И. К.* Теория и практика наплавочных работ. К.: ЕкоТехнологія, 2013.
24. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И.* Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. 2006. № 1. С. 10–13.