

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ С ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

В.А. ЛЕБЕДЕВ¹, И.В. ЛЕНДЕЛ¹, А.В. ЯРОВИЦЫН¹, Е.И. ЛОСЬ¹, С.В. ДРАГАН²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Нац. ун-т кораблестроения. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 19

Показано, что процесс дуговой наплавки в углекислом газе с импульсной подачей электродной проволоки по сравнению с постоянной ее подачей характеризуется повышенной стабильностью, меньшими потерями электродного металла на разбрызгивание и улучшенными характеристиками износостойкости наплавленного металла 30ХГСА. Установлен оптимальный диапазон параметров импульсной подачи электродной проволоки для наплавки — частота 10...30 Гц, скважность 3...5 ед. Показано, что уменьшение глубины проплавления основного металла достигается за счет снижения тока на стадии роста капли в элементарном цикле переноса электродного металла. С привлечением растровой электронной микроскопии выполнены сравнительные исследования микроструктуры наплавленного металла и зоны термического влияния при постоянной и импульсной подаче электродной проволоки при увеличениях $\times 500...2000$. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: дуговая сварка, наплавка, импульсные алгоритмы, система подачи, электродная проволока, сварное соединение, микроструктура

Механизированные и автоматические способы дуговой сварки и наплавки, в том числе в защитных газах, получили широкое распространение и постоянно совершенствуются. Во многих опубликованных работах представлены достаточно значимые результаты по указанным процессам, но они зачастую не имеют характер законченных исследований.

Некоторое отставание в исследованиях технологической эффективности сварки и наплавки плавящимся электродом с импульсными режимами работы систем подачи проволоки и перемещений дуги относительно линии ведения процесса ранее было связано с их техническим несовершенством. В настоящее время выполнен ряд разработок в данной области с использованием современных компьютеризованных электроприводов на основе вентильных электродвигателей специальной разработки. В частности, это позволило реализовать практически любой алгоритм движения электродной проволоки, включая реверсивное движение с регулированием всех составляющих, а именно: частота, шаг, амплитуда импульсов, а также скважность. При этом достигнут частотный диапазон, превышающий 50 Гц. Расширенные технические характеристики новых систем подачи электродной проволоки дали возможность существенно продвинуть исследования в части управления геометрическими характеристиками сварного соединения, оптимизации энергетических затрат и потерь электродного металла.

Полученные в работах [1–3] результаты позволяют утверждать, что импульсные алгоритмы функционирования систем подачи электродной проволоки могут быть одним из самых эффективных способов совершенствования механизированных и автоматических способов дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом.

Следует отметить, что исследовательская работа с использованием современных управляемых систем импульсной подачи продолжается в части решения весьма важной проблемы — управление (в той или иной степени) структурой металла шва. Важность и пути решения упомянутой проблемы отмечены в ряде работ, например [4, 5], однако, насколько нам известно, системных исследований в рассматриваемом направлении с использованием современных методов металлографических исследований в настоящее время не отмечено.

Целью настоящей работы является изложение результатов сравнительных исследований стабильности процесса, перехода легирующих элементов в наплавленный металл, износостойкости наплавленных валиков, микроструктуры сварного соединения при использовании невозмущенной и импульсной подачи электродной проволоки для процесса автоматической наплавки в углекислом газе с описанием и интерпретацией полученных результатов применительно к показателям служебных характеристик наплавленных валиков.

На рис. 1 представлена установка для наплавки стандартных пластин. Сравнительную оценку стабильности процесса дуговой наплавки в CO_2



Рис. 1. Установка ИЗРМ-5 с механизмом ИПЭП

при постоянной (ППЭП) и импульсной подаче электродной проволоки (ИПЭП) выполняли путем статистического анализа записанных осциллограмм сварочного тока и напряжения по известным методикам [6, 7]. Режимы наплавки валика при ППЭП и ИПЭП: $I \approx 230 \dots 250$ А, $U = 27$ В и средняя скорость подачи электродной проволоки $V_{avr} = 0,1$ м/с. Частота ИПЭП составляла 25 Гц, скважность 3 ед.

Анализ значений таких статистических параметров, как дисперсия, среднеквадратическое отклонение и коэффициенты вариации тока I_d и напряжения U_d на участке роста капли, длительность этого участка t_d и продолжительность короткого замыкания $t_{к.з}$ (табл. 1) показывает, что при ИПЭП уменьшаются коэффициенты вариации напряжения на участке роста капли и продолжительности этого участка в 3,5 и 5,0 раз соответственно. Поскольку известно, что с показателями стабильности горения дуги обратной полярности с плавящимся электродом тесно связаны разбрызгивание электродного металла и качество формирования наплавленного валика [6–8], именно зна-

Таблица 1. Значения параметров стабильности процесса наплавки при ППЭП и ИПЭП

Параметр стабильности	Режимы наплавки			
	I_d	U_d	t_d	$t_{к.з}$
ППЭП				
Среднее значение $\bar{\chi}$	230,53	29,43	0,031	0,006
$\sigma^2(x)$	148,49	0,77	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$
$\sigma(x)$	12,19	0,88	0,0087	0,001
$k_v(x)$	5,29	2,99	28,06	16,67
ИПЭП				
Среднее значение $\bar{\chi}$	175,54	30,05	0,036	0,004
$\sigma^2(x)$	71,17	0,0625	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$
$\sigma(x)$	8,44	0,25	0,002	$0,41 \cdot 10^{-3}$
$k_v(x)$	4,81	0,83	5,56	10,25
$\bar{\chi}$ — технологический параметр процесса наплавки.				

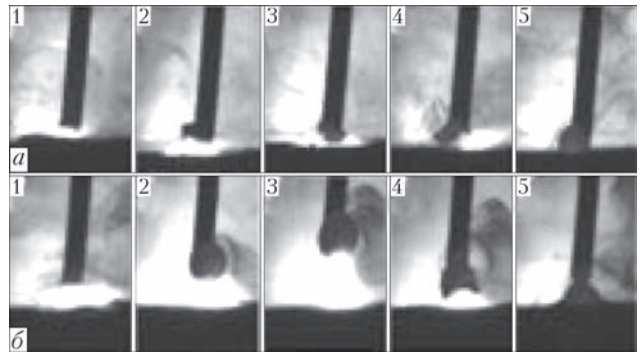


Рис. 2. Кадры скоростной видеосъемки цикла переноса электродного металла при наплавке в CO_2 : а — ППЭП; б — ИПЭП

чительным повышением стабильности процесса наплавки под воздействием силы инерции, прилагаемой к торцу электродной проволоки, объясняется существенное снижение величины потерь электродного металла при ИПЭП [1–4]. В результате комплексных исследований по оценке влияния параметров ИПЭП на геометрию валика наплавленного металла и потери электродного металла был определен диапазон изменения частоты импульсов подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм, больше всего подходящий для задач наплавки (по критерию минимальной доли основного металла): частота $f = 10 \dots 30$ Гц и скважность $S = 3 \dots 5$ ед.

Несмотря на то, что при ИПЭП объем капли электродного металла и длительность ее роста несколько увеличены по сравнению с ППЭП (рис. 2, табл. 1), однако при этом условия для заметного уменьшения перехода легирующих элементов в наплавленный металл не создаются (табл. 2). Расчетная оценка температуры капли через ее теплосодержание, исходя из данных скоростной видеосъемки и осциллограмм сварочного тока и напряжения, показала, что при ИПЭП в диапазоне $f = 10 \dots 25$ Гц и $S = 3 \dots 5$ ед. наблюдается ее уменьшение примерно на 25 %.

Исследования влияния параметров ИПЭП на служебные характеристики наплавленного слоя показали (рис. 3), что при частоте импульсов 15...20 Гц и скважности 3...5 ед. данный способ дает возможность уже в первом слое наплавлен-

Таблица 2. Сравнительные результаты эмиссионно-спектрального анализа наплавленного металла типа 30ХГСА при ППЭП и ИПЭП диаметром 1,2 мм (наплавка в углекислом газе)

Образец	Содержание элементов, мас. %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
1 слой (ППЭП)	0,17	0,87	1,10	0,63	<0,10
1 слой (ИПЭП)	0,17	0,80	1,06	0,55	<0,10
5 слоев (ППЭП)	0,20	0,70	0,84	0,90	<0,10
5 слоев (ИПЭП)	0,21	0,78	0,81	0,98	<0,10
<i>Примечание.</i> Наплавку проводили на пластину из стали 09Г2С (ГОСТ 19281–89) проволокой Нп-30ХГСА (ГОСТ 10543–98); данные получены на зашлифованной площадке продольной поверхности валика, установка ДФС-36.					

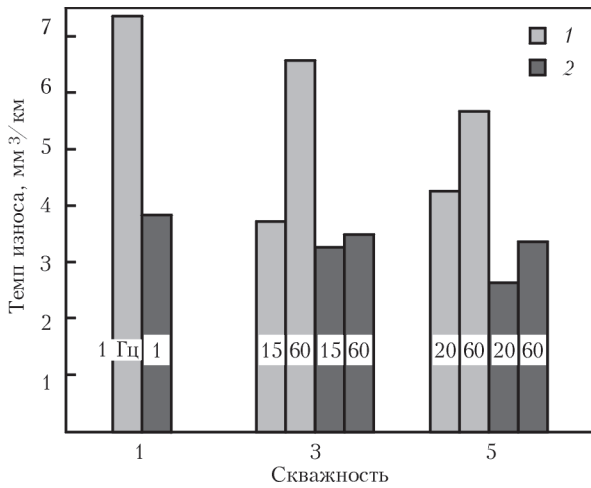


Рис. 3. Гистограмма оценки темпа износа образцов наплавленного металла 30ХГСА при вытирании лунок по схеме «вал-плоскость» без дополнительной подачи смазки в зону трения в зависимости от частоты, скважности и количества наплавленных слоев n (средний ток $I = 220$ А, напряжение $U = 26$ В); 1 — $n = 1$; 2 — 5

ного металла получить характеристики износостойкости, аналогичные пятислойной наплавке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Сравнение износостойкости пятислойного наплавленного металла показало, что при ИПЭП также наблюдается улучшение износостойкости в 1,2...1,4 раза (см. рис. 3).

Повышение износостойких характеристик наплавленного металла 30ХГСА обусловлено в первую очередь существенным снижением глубины проплавления основного металла и, соответственно, уменьшением его доли в наплавленном валике. Данный эффект в основном достигается за счет ограничения на 20...30 % количества теплоты, выделяющейся при ИПЭП (рис. 4). Это, в свою очередь, исходя из сравнительного анализа осциллограмм при ППЭП и ИПЭП, обусловлено снижением в последнем случае значения сварочного тока на стадии роста капли за счет периодического удлинения дуги и уменьшения силы ее давления на расплавленный металл сварочной ванны.

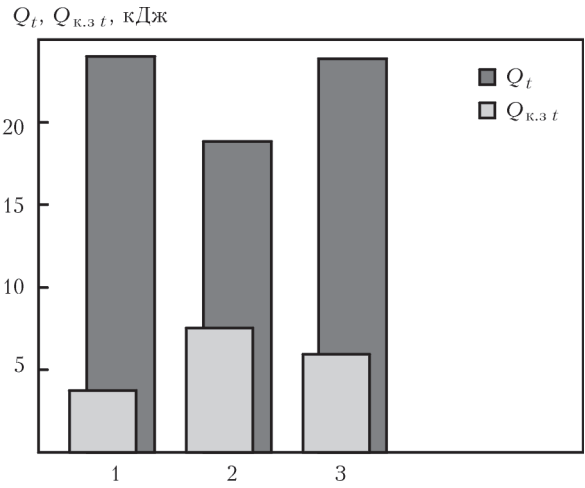


Рис. 4. Гистограмма оценок общей тепловой мощности Q_t и мощности на участке короткого замыкания $Q_{к.з.t}$ при ППЭП и ИПЭП за время 5 с ($Q_{к.з.t}$ — доля от Q_t): 1 — ППЭП; 2 — ИПЭП (25 Гц); 3 — ИПЭП (60 Гц)

С целью объяснения причин повышения износостойкости наплавленного металла 30ХГСА при многослойной наплавке, когда влияние перемешивания основного и наплавленного металла практически исключено, проводились сравнительные металлографические исследования сварного соединения основной — наплавленный металл. Микроструктура наплавленного металла и зоны термического влияния в основном металле изучались методами оптической ($\times 50...500$) и растровой электронной микроскопии в обратно рассеянных электронах ($\times 500...2000$) на микрошлифах однослойных наплавов, прошедших травление в 4%-м растворе HNO_3 . Вид наблюдаемых в поле зрения фаз, образовавшихся в результате распада первичного аустенитного зерна (феррит, бейнит, перлит), уточнялся путем измерения твердости по Виккерсу на микротвердомере М400 фирмы «LECO» при нагрузке 100 г.

Установлено, что структура наплавленного металла 30ХГСА состоит из кристаллитов игольчатого феррита [9, 10] ($HV0,1 — 2360...2540$ МПа), разделенных между собой ферритными прослойками толщиной до 2,5 мкм (рис. 4). Сравни-

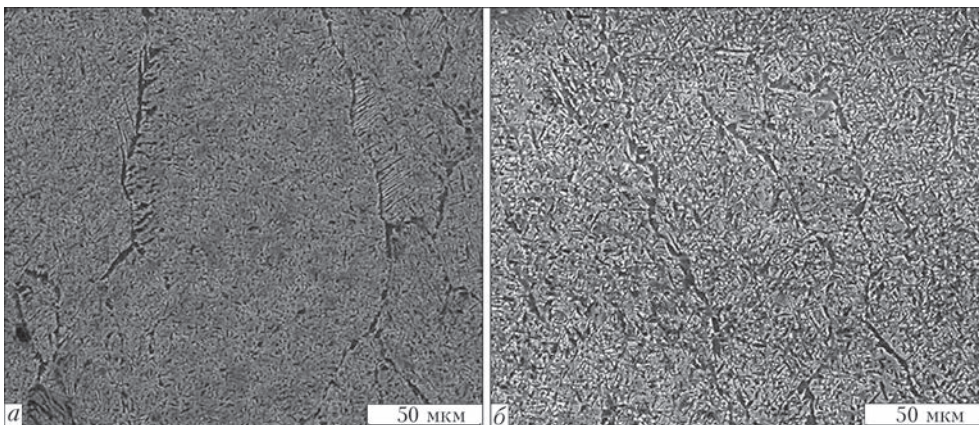


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла типа 30ХГСА: а — ППЭП; б — ИПЭП

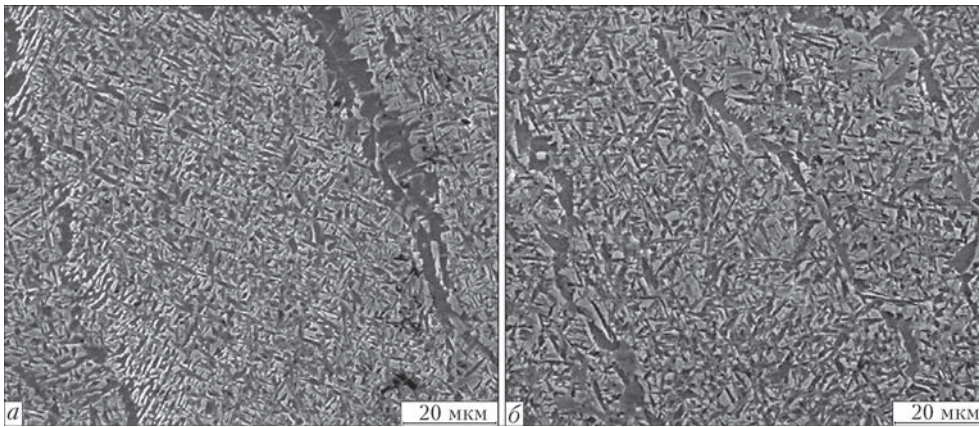


Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла 30ХГСА: а — ППЭП; б — ИПЭП

тельный анализ формы и размеров кристаллитов в центральной части наплавленного металла показал, что при ИПЭП они имеют несколько меньшую ширину и коэффициент формы. Так, при наплавке в CO_2 ширина кристаллитов при ППЭП равна 97,5 мкм, при ИПЭП — 70; коэффициент формы кристаллитов при ППЭП — 6,8, при ИПЭП — 4,56. При ИПЭП также проявляется тенденция к ограничению длины кристаллитов, значительная часть из которых не превышает 210 мкм по сравнению с 640...700 мкм при ППЭП.

Металлографический анализ наплавленного металла при большем увеличении ($\times 1000...2000$)

показал, что при ИПЭП наблюдается более благоприятная форма границ кристаллитов (рис. 5, 6): преимущественно в 1,5...2,0 раза снижается толщина прослоек полигонального феррита [9, 10], считающегося наиболее опасной структурой с точки зрения хрупкого разрушения [11, 12]; отсутствует пластинчатый (видманштеттов) феррит [9, 10] на периферии кристаллитов; выделения микрочастиц игольчатого феррита преимущественно изменяют свою форму на полиэдрическую.

Известно, что структура игольчатого феррита в сварном шве обеспечивает оптимальные сочетания характеристик его прочности и вязкости [11–13], а также, наряду с игольчатым трооститом [14], отличается повышенной износостойкостью по сравнению с ферритно-перлитной (см. рис. 7), обусловленной измельчением структуры микровыделений игольчатого феррита до размера примерно 0,5 мкм под воздействием приповерхностного наклепа [15]. Эффект повышенной износостойкости игольчатого феррита также может связываться и с наличием в нем мартенситно-аустенитно-карбидных микрокомплексов (так называемой МАК-фазы [9, 16, 17], рис. 8), распределенной внутри кристаллитов и вдоль прослоек полигонального феррита.

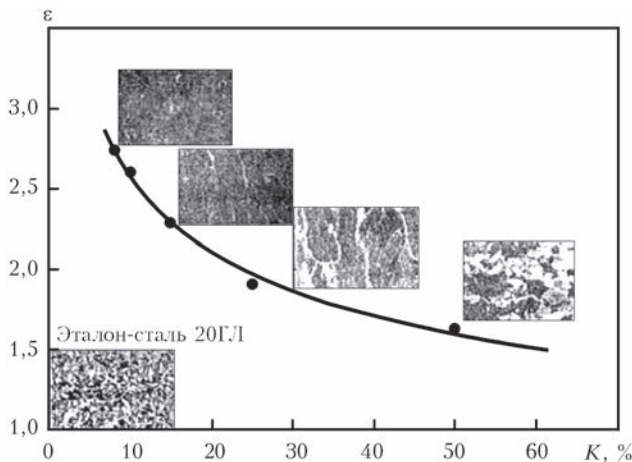


Рис. 7. Зависимость относительной износостойкости наплавленного металла ϵ от объемной доли полигонального феррита K [15]

Таким образом, улучшение на 20...40 % износостойкости при пятислойной наплавке с ИПЭП по сравнению с ППЭП (см. рис. 3) в условиях, когда фактор перемешивания основного и наплавленного

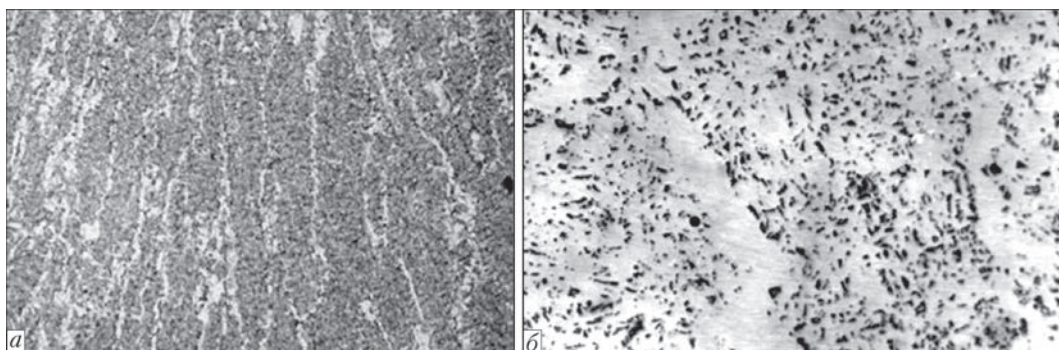


Рис. 8. Микроструктура металла шва стали 10Г2ФБ (проволока Mn-Ni-Mo, флюс АН60): а — травление в нитате ($\times 100$); б — в пикрате натрия ($\times 800$) [13]

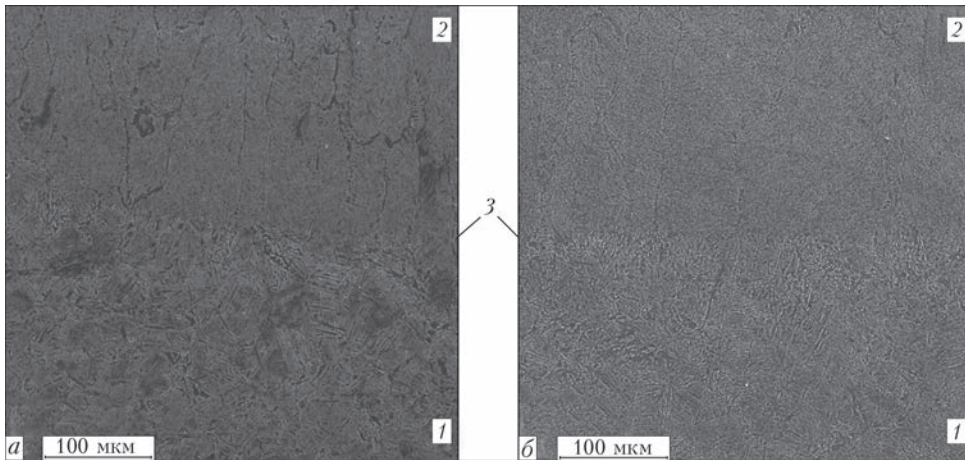


Рис. 9. Микроструктура в районе линии сплавления: а — ППЭП; б — ИПЭП (1 — основной металл 09Г2С; 2 — наплавленный металл 30ХГСА; 3 — линия сплавления)

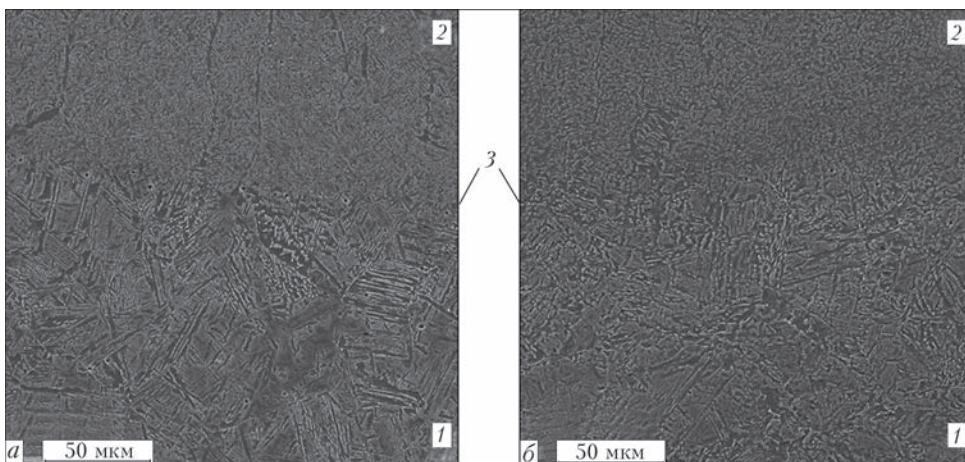


Рис. 10. Микроструктура в районе линии сплавления: а — ППЭП; б — ИПЭП (1 — основной металл 09Г2С; 2 — наплавленный металл 30ХГСА; 3 — линия сплавления)

ленного металла практически исключен, можно объяснить улучшением структуры игольчатого феррита: более благоприятной формой кристаллитов; снижением объемной доли полигонального и пластинчатого феррита на их периферии и, предположительно, оптимизацией морфологии и распределения МАК-фазы в составе игольчатого феррита.

При ППЭП в наплавленном металле в районе линии сплавления присутствуют кристаллиты шириной 20...40 мкм с ферритными оторочками шириной 2,0...2,5 мкм (рис. 9, а), т.е. существенно увеличивается объемная доля оторочек полигонального и пластинчатого феррита ($HV_{0,1}$ — 2210...2280 МПа) на периферии кристаллитов. Такая структура, по данным работы [13], способствует повышению склонности сварных швов к хрупкому разрушению. Следует отметить, что в наплавленном металле в районе линии сплавления при ИПЭП наблюдалась разориентированная структура практически без наличия оторочек полигонального феррита (рис. 9, б).

В ЗТВ в основном металле 09Г2С наблюдаются следующие структурные составляющие (рис. 10):

нижний бейнит ($HV_{0,1}$ — 3000...3500 МПа), верхний бейнит ($HV_{0,1}$ — 2600...2660 МПа) и пластинчатый феррит ($HV_{0,1}$ — 2210...2280 МПа). При ИПЭП в металле ЗТВ на участке крупного зерна наблюдается более однородная микроструктура, состоящая из верхнего и нижнего бейнита с несколько сниженным содержанием пластинчатого феррита (см. рис. 10, б). Также при ИПЭП в металле ЗТВ сварного соединения отмечена тенденция к переходу микроструктуры верхнего и нижнего бейнита от игольчатой к зернистой морфологии (см. рис. 10, б). По данным работы [18] такая структура является более предпочтительной с точки зрения свариваемости основного металла и надежности эксплуатации его ЗТВ, особенно в условиях низких климатических температур.

На участке мелкого зерна в ЗТВ основного металла 09Г2С микротвердость заметно снижалась: при ППЭП составляла $HV_{0,1}$ — 2160...2280 МПа; при ИПЭП — $HV_{0,1}$ — 2060...2130 МПа. На участке неполной перекристаллизации присутствовали участки феррита и, соответственно, микротвердость приближалась к значениям, характерным для основного металла: при ППЭП —

$HV_{0,1}$ — 1700...1810 МПа; при ИПЭП — $HV_{0,1}$ — 1870...2060 МПа. В глубине основного металла 09Г2С присутствовала ферритно-перлитная стро-
очечная структура; ее микротвердость составляла $HV_{0,1}$ — 1470...1600 МПа.

Выводы

1. Показано, что процесс дуговой наплавки в угле-
кислом газе с ИПЭП характеризуется по срав-
нению с ППЭП повышенной стабильностью и
меньшими потерями электродного металла на раз-
брызгивание.

2. Установлен оптимальный диапазон парамет-
ров ИПЭП: $f = 10...30$ Гц и $S = 3...5$ ед. Показа-
но, что ограничение глубины проплавления до-
стигается за счет снижения тока на стадии роста
капли в элементарном цикле переноса электрод-
ного металла и, соответственно, тепловложений,
общих и для этого цикла.

3. Установлено, что в оптимальном диапазоне
параметров ИПЭП наплавленный металл 30ХГСА
имеет повышенную износостойкость по сравне-
нию с ППЭП. Этот эффект достигается за счет
снижения доли основного металла в наплавлен-
ном и улучшениями структуры в теле и на грани-
це кристаллита игольчатого феррита на микроу-
ровне (увеличение более $\times 500$).

4. Показано, что при ИПЭП микроструктура
наплавленного металла в районе линии сплавле-
ния и ЗТВ основного металла является более бла-
гоприятной с точки зрения свариваемости и на-
дежности эксплуатации сварного соединения.

- 1 *Новые возможности механизированной дуговой точеч-
ной сварки с применением импульсных воздействий /*
Л.М. Лобанов, В.А. Лебедев, С.Ю. Максимов и др. // Ав-
томат. сварка. — 2012. — № 5. — С. 17–22.
- 2 *Лебедев В.А., Лендел И.В.* Управление импульсным дви-
жением электродной проволоки при механизированной
сварке за счет изменения шага подачи // Заготовитель-
ные производства в машиностроении. — 2013. — № 3.
— С. 10–14.
- 3 *Использование механических импульсов для управления
процессами автоматической и механизированной сварки
плавящимся электродом /* Б.Е. Патон., В.А. Лебедев, С.И.

Полосков, И.В. Лендел // Сварка и диагностика. — 2013.
— № 6. — С. 16–20.

4. *Лебедев В.А., Лендел И.В.* Исследование технологиче-
ских возможностей дуговой сварки и наплавки с импульс-
ной подачей электродной проволоки // Научные тех-
нологии в машиностроении. — 2015. — № 9. — С. 20–27.
- 5 *Лебедев В.А.* Особенности сварки сталей с импульсной
подачей электродной проволоки // Свароч. пр-во. —
2007. — № 8. — С. 30–35.
- 6 *Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавле-
ние электродов /* Под ред. И.К. Походни. — Киев: Наук.
думка, 1990. — 224 с.
- 7 *Ланкин Ю.Н.* Показатели стабильности процесса дуго-
вой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка.—
2011. — № 1.— С. 7–15.
- 8 *Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А.* Сварка
сталей в защитных газах плавящимся электродом. Тех-
ника и технология будущего. — Томск: Изд-во Томского
политехн. ун-та, 2012. — 208 с.
- 9 *Abson D.L., Dolby R.E., Hart P.M.* **Tb rb e b m** **etallic**
in lusia **in ferrite uc leatin in carb** **steel weld metals**
// Trends in steel and consumables for welding: Weld. Inst.
Conf. — London. — 1978. — London: Weld. Institute. —
99p
- 10 *Hee Jin Kim, Bong Yong Kang.* Microstructural Characteristics
of Steel Weld Metal // Journal of KWS — 2000. — 8, № 5.
— P. 565–572.
11. *Curry D.C., Knott J.F.* Effects of microstructure on cleavage
fracture stress in steel // Metal Sci. — 1978. — V. 12. —
511 p
- 12 *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.
13. *Рыбаков А.А., Костин В.А., Филичук Т.Н., Прибытько И.А.*
Особенности формирования микроструктуры метал-
ла швов газонефтепроводных труб при сварке микро-
легированных сталей // Вісник Чернігівського ДТУ. —
9— 1(63). — С. 125–131.
14. *Фрумин И.И.* Автоматическая электродуговая наплавка.
— Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
- 15 *Абраменко Д.Н.* Повышение износостойкости деталей
грузовых вагонов дуговой наплавкой слоя стали со струк-
турой игольчатого феррита: Автореф. дис. ... канд. техн.
наук. — М: ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», 2008 г. — 21 с.
- 16 *Yurioka N.* TMPC steel and their welding // Welding in the
world. — 1995. — 35, № 6. — P. 375–390.
- 17 *Гривняк И., Матвудя Ф.* Металлографические исследо-
вания мартенситно-аустенитной составляющей (МАС)
металла ЗТВ высокопрочных низколегированных сталей
// Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 22–30.
- 18 *Иванайский А.А.* Исследование структуры, фазового со-
става, свойств зернистого бейнита и технологии его фор-
мирования в сварных соединениях и в металлопрокате
для сварных конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн.
наук. Барнаул: Алтайский ГТУ им. И.И. Ползунова, 2006.
— 20 с.

Поступила в редакцию 03.12.2015



Сварка и резка 2017

С 25 по 29 сентября 2017 г. будет проходить 19-я Междуна-
родная выставка «Сварка и резка 2017», г. Эссен (Германия).
Эта выставка проводится один раз в четыре года на протяже-
нии 50 лет и является крупнейшим в мире выставочным меро-
приятием в области сварки и родственных технологий.

Условия участия в выставке размещены на сайте организатора:
www.schweissen-schneidenc m w w m esse-essend e