

ВОПРОСЫ СВАРКИ, ЛИТЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

УДК 621.791.927.5

DOI 10.35211/1990-5297-2023-10-281-46-53

*С. А. Фастов¹, И. В. Зорин¹, С. К. Елсуков¹,
В. И. Лысак¹, Д. С. Несин¹, А. А. Антонов²*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСЛОЯ ПРИ ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКЕ*

¹ Волгоградский государственный технический университет

² АО «ВНИКТИнефтехимоборудование»

e-mail: serheyfastov@yandex.ru / zorin.iv@vstu.ru

В работе рассмотрено влияние основных параметров режима дуговой наплавки в защитных газах с поперечными колебаниями электрода на формирование низкоуглеродистого низколегированного наплавленного металла. Установлено, что диапазон режимов бездефектного формирования наплавленных валиков достаточно узок и находится в области высоких значений сварочного тока, малых значений скорости наплавки и частоты колебаний электрода. Показано, что увеличение погонной энергии наплавки при неизменной амплитуде и частоте колебаний позволяет не только улучшить формирование наплавленного валика, но и получить более плавный градиент изменения свойств по высоте многослойного наплавленного металла и в зоне термического влияния основного металла.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, подслей, наплавленный металл, структура, твердость, зона термического влияния.

*S. A. Fastov¹, I. V. Zorin¹, S. K. Elsukov¹,
V. I. Lysak¹, D. S. Nesin¹, A. A. Antonov²*

TECHNOLOGICAL FEATURES OF OSCILLATING ELECTRODE USING FOR FORMING BUFFER LAYER BEFORE WEAR-RESISTANT SURFACE

¹ Volgograd State Technical University

² AO VNIKTIneftehimoborudovanie

The work considered the influence of the main parameters of the arc surfacing in protective gases with electrode transverse oscillations on the formation of low-carbon low-alloy deposited metal. It has been defined that the range of deposited beads defect-free formation modes is quite narrow and exists in the region of high values of welding current, low values of welding rate and electrode oscillation frequency. It is shown that the heat input increase of surfacing with the constant amplitude and frequency of oscillations allows not only to improve the formation of the weld bead, but also to obtain the smoother gradient of changes properties along the height of the multilayer deposited metal and at the heat-affected zone of the base metal.

Keywords: surfacing, hardfacing, cladding, flux-cored wire, sublayer, buffer layer, metal structure, hardness, heat affected zone.

Введение

Известно, что применение подслоя при упрочняющей наплавке является актуальным способом повышения эксплуатационных свойств технологического инструмента [1; 2]. Формирование буферного слоя в практике наплавки

производится теми же способами, что и износостойкого (рабочего) слоя. К наиболее известному технологическому приему, отражающий этот подход, относится способ наплавки [3] с одновременным формированием износостойкого и буферного слоев за счет подачи в хвос-

товую часть сварочной ванны дополнительной присадочной проволоки с большим запасом аустенитности.

Более универсальным и технологически гибким способом формирования подслоя является применение колеблющегося электрода с поперечными перемещениями дуги относительно направления наплавки, что способствует перераспределению тепла дуги по поверхности наплавляемого изделия и дает возможность при относительно небольшом проплавлении получить широкослойный (до 50 мм) наплавленный металл [4; 5]. Преимущества этого процесса также связаны с более эффективным, чем погонная энергия наплавки, способом управления режимом, в частности, варьированием частотой и амплитудой колебаний электрода, а также траекторией его движения, реализация которых зависит от конкретной кинематической схемы механизма колебания.

Можно выделить два основных вида траектории движения электрода и соответственно дуги: это синусоидальная и трапецевидная (П-образные полупериоды) траектории [4; 6–8]. Первый тип траектории обеспечивает наплавку с сохранением единой сварочной ванны [4], перемещение которой совпадает с направлением наплавки. Данная траектория движения электрода, как правило, реализуется с использованием кривошипно-шатунных [4; 9; 10] или кулачковых механизмов, вызывающих колебания электрода аналогично маятнику [11]. В первом случае колебания сообщаются всей сварочной «головке», а во втором только электроду.

При использовании трапецевидной траектории сварочная ванна движется не прямолинейно, а пересекает вектор общего направления наплавки [4; 6; 12–14], в результате чего сварочная ванна представляет собой отдельные расплавы, взаимное перекрытие и термическое влияние которых приводит к заметной трансформации структурно-фазового состава, особенно при наплавке сплавов чувствительных к повторным нагревам. Однако реализация такой схемы требует дополнительного оборудования в виде второго шагового двигателя [4] или же применения роботизированных манипуляторов [7].

Применение общей ванны также выгодно в условиях наплавки цилиндрических поверхностей малого диаметра. Формирование в этом случае короткой, но широкой сварочной ванны препятствует стеканию жидкого металла [6; 15–17]. Использование этого же эффекта позволяет вести сварку с поперечными колебаниями элект-

рода неповоротных стыков трубопроводов без корректирования режима [18].

Еще одной особенностью применения колеблющегося электрода является взаимосвязь траектории движения электрода и мгновенной скорости наплавки, которая достигает наибольших значений в центре формируемого валика и наименьших при нахождении электрода в его краевых участках. Это может привести

к перепаду температуры между этими зонами до ~ 450 °С, который возрастает с увеличением амплитуды [19] и обуславливает перегрев краевых участков, где может выделяться до 40 % тепловой мощности [11].

Амплитуда колебаний также оказывает непосредственное влияние на ширину формирующегося валика, но одновременно с этим является причиной увеличения проплавления, что связано с уменьшением толщины жидкой прослойки металла под дугой и перераспределения объема ванны по ее ширине. И напротив, увеличение частоты колебаний способствует снижению глубины проплавления из-за уменьшения шага наплавки и возрастания толщины жидкой прослойки металла, находящегося под дугой [20].

Анализируя вышеизложенную информацию, можно сделать вывод, что подбор рациональных значений частоты и амплитуды колебаний необходимо рассматривать во взаимосвязи с погонной энергией процесса, которая в наибольшей мере определяется величиной сварочного тока и линейной скоростью наплавки. Комплексная оценка влияния этих параметров в процессе наплавки позволит выявить критерии для качественного формирования металла низкоуглеродистого низколегированного подслоя. Поэтому целью данной работы было определение параметров режима наплавки, обеспечивающих бездефектное формирование наплавленного металла.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели изготавливали экспериментальную порошковую проволоку ($\varnothing$ 2,5 мм) на лабораторном волочильном стане ВолгГТУ, которая обеспечивает низколегированный наплавленный металл системы легирования C-Cr-Ni-Mo-Mn-Cu-Al-Ti. Наплавку производили на пластины из стали 55 толщиной 12–13 мм с помощью сварочного автомата A2 MiniMaster (ESAB), оснащенного механизмом колебания. Кинематически он

представляет собой кривошипно-шатунный механизм (рис. 1), который, преобразуя вращения выходного вала мотор-редуктора в возвратно-поступательное прямолинейное движение, обеспечивает синусоидальную траекторию движения механизма подачи электродной проволоки (рис. 2, а, в).

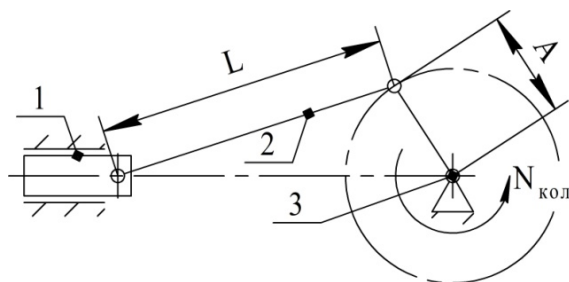


Рис. 1. Кинематическая схема механизма поперечных колебаний электродного узла сварочного автомата:
1 – суппорт электродного узла поперечных перемещений;
2 – кривошип; 3 – приводной узел

В рамках работы исследовали влияние основных параметров наплавки указанным способом, а именно: амплитуды колебаний (A), частоты колебаний (частоты вращения выходного вала электродвигателя приводного узла) (N), линейной скорости наплавки (v_n) и сварочного тока (I_n) на формирование наплавленного металла. Варьирование параметрами режима производили согласно данным табл. 1. Не изменяли параметры режима наплавки колеблющимся электродом, не оказывающие или оказывающие минимальное влияние на формообразование наплавленного валика [20], а именно: напряжение на дуге (U_d), вылет электрода (l_s) и расход газа (Q_r).

Ранее было установлено [21], что для удовлетворительного формирования валика, напла-

вленного с использованием разработанной проволоки, величина сварочного тока не должна быть менее 250 А, что обеспечивает качественное расплавление порошковой проволоки и стабильный процесс. В экспериментах силу сварочного тока увеличивали с шагом 50 А, что, с одной стороны, обуславливало увеличение количества расплавляемого электродного металла, а с другой – за счет периодических колебаний электрода обеспечивало равномерное распределение расплава по объему сварочной ванны. При выборе величины скорости наплавки учитывали [22], что использование небольших ее значений способствует улучшению качества наплавленного металла (снижает вероятность образования подрезов). В данной работе верхнее значение V_n ограничивали 20 см/мин. Скорость наплавки уменьшали с шагом 4 см/мин до значения 12 см/мин, менее которого процесс наплавки перестает быть производительным. Частоту оборотов выходного вала мотор-редуктора варьировали в диапазоне 42 до 180 об/мин. Амплитуду колебаний (A) устанавливали с учетом рекомендаций [16, 17] т. к. дальнейшее увеличение A при наплавке в газах проволоками малого диаметра приводит к нарушению формирования наплавленного валика.

Предварительно выполняли оценку влияния скорости наплавки, амплитуды и частоты колебаний, инициируемых вращением вала мотор-редуктора на траекторию движения электрода. Ввиду того, что движение осуществляется на плоскости, то положение электрода в конкретный момент времени определяется координатами X и Y , рассчитываемыми системой уравнений (1). На ее основе были построены расчетные траектории (рис. 2, а, в) движения, для вери-

Таблица 1

Параметры режима наплавки

Изменяемые параметры						Неизменяемые параметры		
I_n , А	v_n , см/мин	A , мм	$N_{\text{кол}}$, об/мин	f , Гц	Q , кДж/см	U_d , В	l_s , мм	Q_r , л/мин
250	20	10; 15	42; 102; 163; 180	0,7; 1,7; 2,7; 3	20,3	26	30	25...30
	16				25,4			
	12				33,8			
300	20				23,4			
	16				29,3			
	12				39			
350	20				27,3			
	16				34,1			
	12				45,5			

фикации которых производили «запись» движения на миллиметровой бумаге (рис. 2, б, з). Графическая интерпретация полученных данных выражает пройденную электродом траекторию по синусоидальной кривой (в горизонтальной

плоскости наплавки) при данной амплитуде A и частоте поперечных перемещений f совершаемых за 1 с, которая численно соответствует полному обороту выходного вала мотор-редуктора.

$$\begin{cases} X = v_n \times t \\ Y = -\frac{A}{2} \times \left[2 \cos(2\pi N_{\text{кол}} \times t) + 0,5 \times \frac{A}{L} \cos(4\pi N_{\text{кол}} \times t) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где t – время сварки, минуты; L – плечо кривошипа колебателя, см (рис. 1); A – амплитуда колебаний, см.

Наплавленные валики подвергали внешнему осмотру на предмет наличия дефектов в виде подрезов. Макрошлифы изготавливали поперек направления наплавки и производили их обработку на шлифовально-полировальном станке МР-1В TG inc. Выявление макро-структуры металла производили погружени-

ем шлифованной поверхности образцов в 4 % раствор HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Исследование формы и основных геометрических параметров наплавленных валиков осуществляли с помощью обработки изображений в векторной CAD программе. Распределение твердости в плоскости поперечной направлению наплавки определяли с помощью микротвердомера DUROLINE-M (Metkon Metallography) с нагрузкой 1000 г.

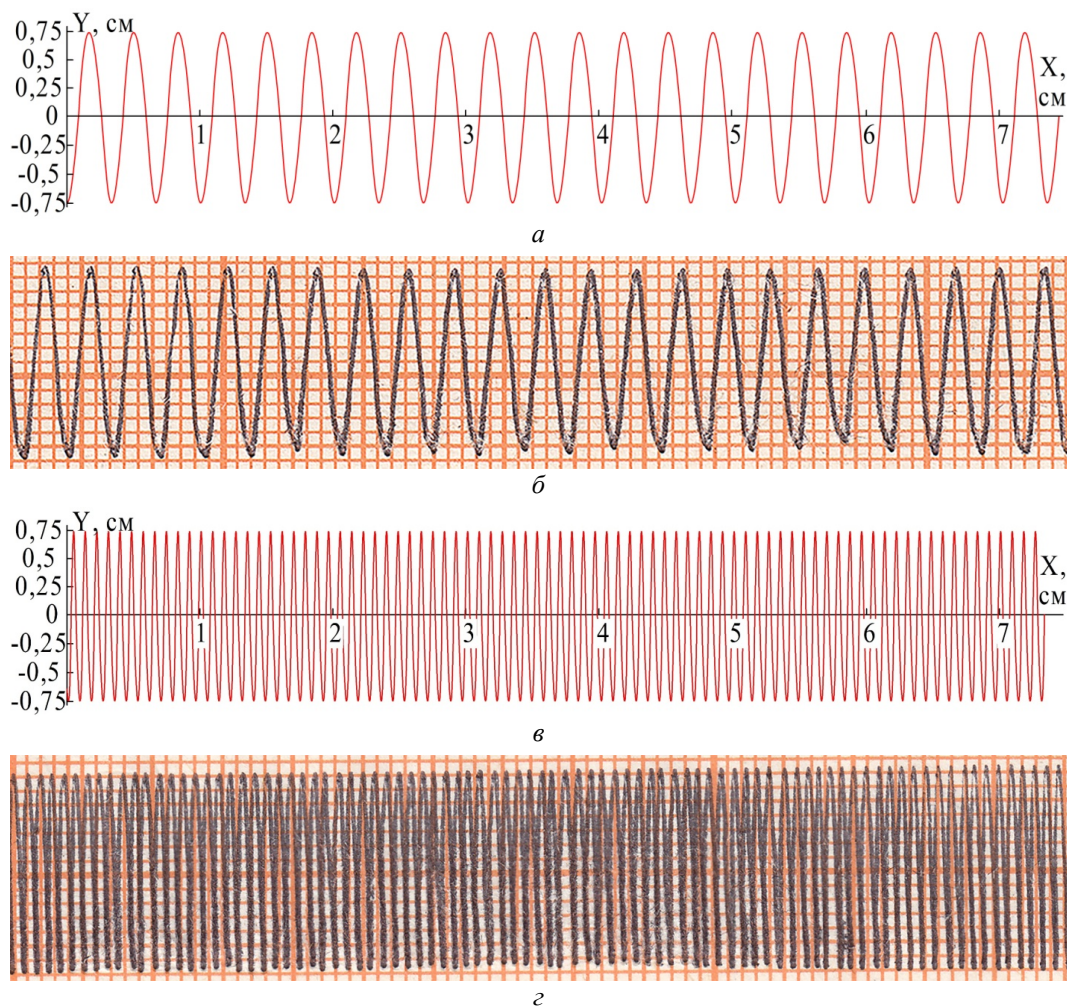


Рис. 2. Расчетные (а, в) и реальные (б, з) траектории движения сварочной головки в плоскости перпендикулярной оси электродной проволоки:

а, б – $v_n = 36$ см/мин, $A = 7,5$ мм, $N_{\text{кол}} = 104$ об/мин; $f = \sim 1,7$ Гц; в, з – $v_n = 16$ см/мин, $A = 7,5$ мм, $N_{\text{кол}} = 181$ об/мин; $f = \sim 3$ Гц

Результаты и обсуждение

Анализ влияния величин A и f , I_n и v_n удобно выполнять во взаимосвязи этих параметров в виде диаграммы (рис. 3), которая отображает режимы, при которых происходит качественное формирование наплавленных валиков (рис. 4, в), нарушается формирование наплавленного валика (рис. 4, а) либо присутствуют дефекты (рис. 4, б). Качественно сформированным наплавленным валиком считали отсутствие в его краевых участках дефектов в виде подрезов, как наиболее опасного дефекта в условиях сварки и наплавки колеблющимся электродом [23]. Формирование подрезов опасно в первую очередь при многопроходной и многослойной наплавке, когда вследствие достаточно большой глубины дефекта и характерной для применения колеблющегося электрода малой глубины проплавления при формировании последующего слоя велика вероятность образования несплавления [23]. Также при прохождении дуги над участком «подреза» условия ее существования изменяются, поскольку увеличивается дуговой промежуток. Это может привести к дестабилизации дуги и как следствие к образованию дефектов в виде шлаковых включений (при наплавке под флюсом) или пор (при наплавке в газах). Трещины, поры и иные дефекты в наплавленном металле отсутствовали.

Установлено, что диапазон режимов качественного формирования наплавленных вали-

ков достаточно узок и находится в области высоких значений сварочного тока, низких значений скорости наплавки и частоты колебаний электрода. Вероятная причина этого связана с недостатком объема сварочной ванны при наплавке на больших значениях скорости и малого сварочного тока [22]. В этом случае дуга активно вытесняет жидкий металл в хвостовую часть ванны и полностью заполнить образованную в краевых участках полость не удастся. Увеличение тока и соответственно объема поступающего в сварочную ванну расплава позволяет предотвратить образования подрезов.

В случае наплавки с поперечными колебаниями электрода происходит аналогичный процесс. При высоких скоростях наплавки и частотах колебаний электрода жидкий металл также оттесняется дугой в центральную часть ванны, а по ее краям в прилегающем основном металле образуются подплавленные дугой полости.

Однако следует учитывать, что при наплавке колеблющимся электродом электродная проволока и соответственно дуга обладают мгновенной скоростью [8; 11; 20], которая определяется суммой векторов линейной скорости и скорости поперечных колебаний. Максимум последней имеет прямо пропорциональную зависимость от амплитуды и частоты колебаний. Так при увеличении амплитуды и неизменной частоте увеличивается мгновенная скорость движения электрода, что приводит

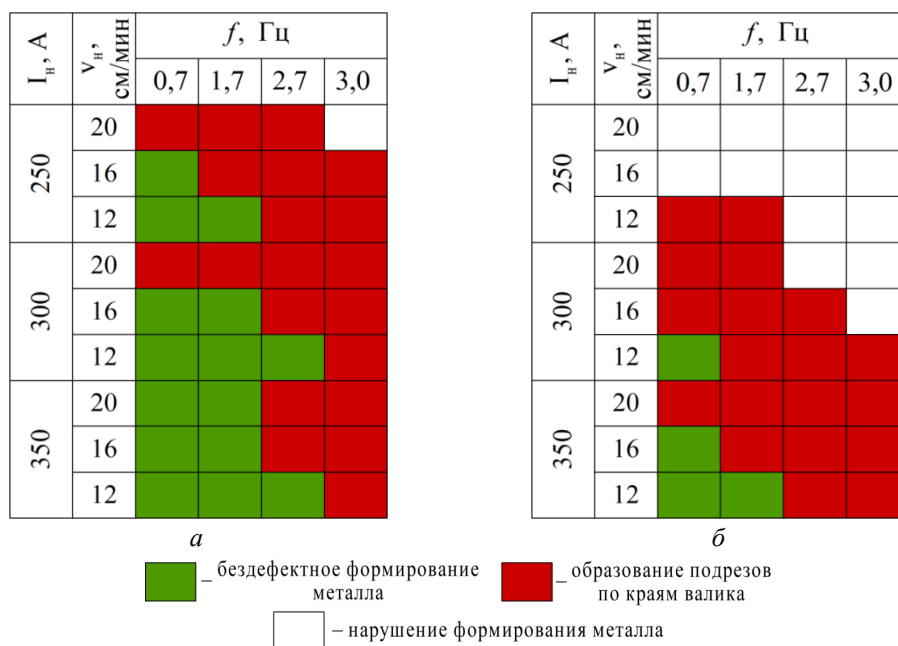


Рис. 3. Диаграмма областей рабочих режимов наплавки при использовании амплитуды колебаний:
а – 10 мм; б – 15 мм

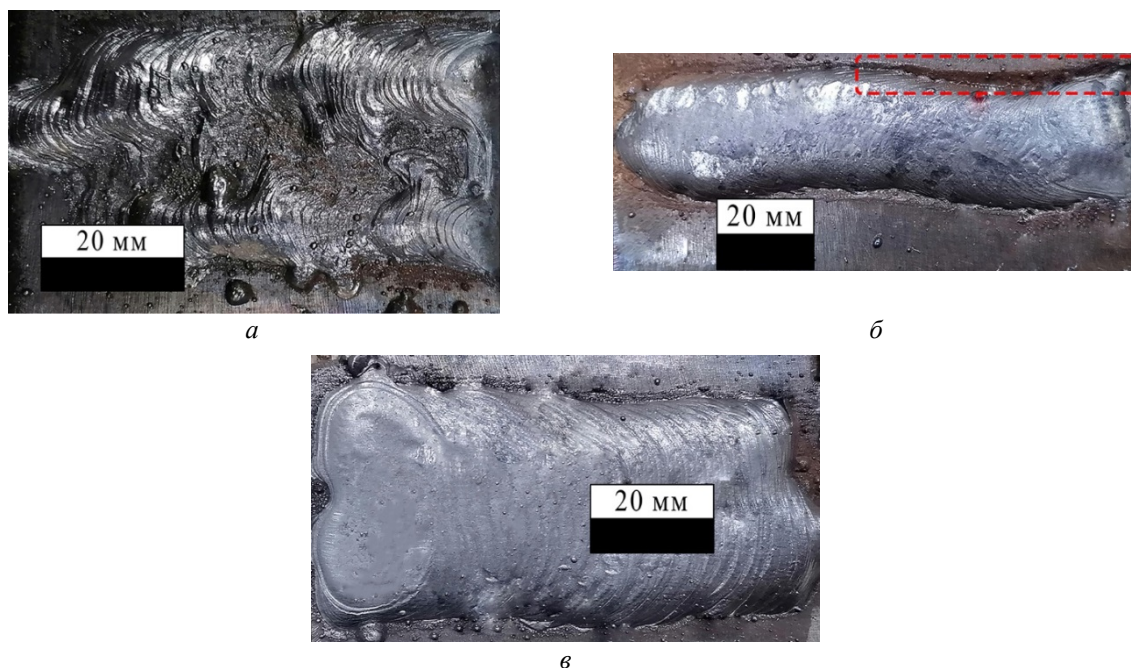


Рис. 4. Внешний вид наплавленных валиков:

а – нарушение формирования; *б* – с образованным подрезом (обозначен рамкой); *в* – валик сформированный без дефектов

к более активному оттеснению жидкого металла. А при увеличении частоты помимо роста мгновенной скорости наплавки сокращается время нахождения электрода в краевых участках ванны. В этих условиях нет возможности заполнить оплавленные полости электродным металлом, вследствие чего формируется подрез.

Совокупное увеличение амплитуды и частоты колебаний приводит к настолько большому увеличению мгновенной скорости, что не позволяет расплаву образовать общую ванну и нарушает формирование наплавленного валика.

На рис. 5 представлены макросечения наплавленных валиков без видимых дефектов, а в табл. 2 приведены их геометрические параметры. Отсутствие седлообразного профиля проплавления связано с относительно не боль-

шой амплитудой колебания, при которой перемещающаяся по поверхности сварочной ванны дуга успевает сформировать в объеме расплава и в зоне термического влияния близкое к равномерному тепловое поле. Во всех наплавленных валиках, за исключением не сформированных, доля основного металла в наплавленном составляет ~ 40 %, но с увеличением величины тока она может достигать 50 %. Если для целей плакирования коррозионностойкими сталями такая доля участия основного металла является достаточно большой, а поэтому нежелательной, то при наплавке подслоя усреднение химического состава в результате перемешивания основного и электродного металлов способствует формированию плавного градиента изменения свойств от изделия к износостойкому слою.

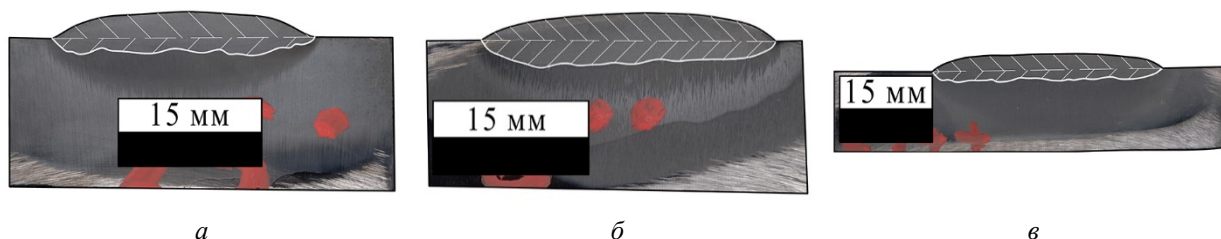


Рис. 5. Макросечения валиков, наплавленных на различных режимах:

а – $I_n = 250$ А, $v_n = 12$ см/мин, $A = 10$ мм, $f = 0,7$ Гц; *б* – $I_n = 350$ А, $v_n = 20$ см/мин, $A = 10$ мм, $f = 1,7$ Гц;
в – $I_n = 350$ А, $v_n = 12$ см/мин, $A = 15$ мм, $f = 0,7$ Гц

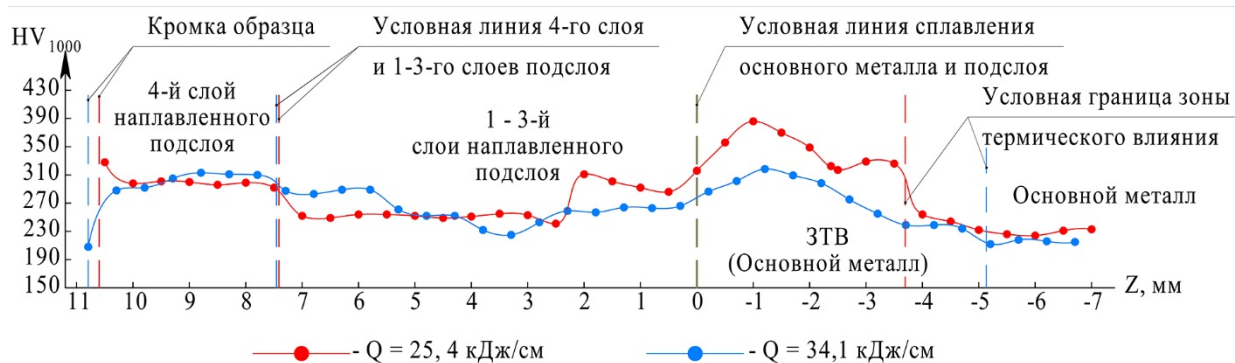


Рис. 6. Распределение твердости по сечению наплавленного металла в зависимости от погонной энергии наплавки ($A = 10$ мм, $f = 0,7$ Гц)

Также повышенное проплавление основного металла способствует формированию более протяженной зоны термического влияния, что приводит к термической обработке слоев, расположенных ниже. В условиях многопроход-

ной многослойной наплавки такой прием позволит дополнительно улучшить плавность изменения механических свойств по сечению наплавленной композиции.

Таблица 2

Геометрические параметры наплавленных валиков

Контролируемый геометрический параметр	Наплавленный валик (см. рис. 5)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>v</i>
Ширина наплавленного валика, мм	27,44	28,38	37,36
Высота наплавленного валика, мм	2,72	2,07	2,55
Глубина проплавления основного металла, мм	1,65	2,83	1,8
Угол сопряжения поверхностей наплавленного металла и основного, α , °	152	135	136
Площадь наплавленного металла, мм ²	55,32	57,54	78,47
Площадь проплавленного металла, мм ²	36,53	53,34	53,88
Доля участия основного металла в наплавленном, %	40	48	41
Коэффициент полноты валика	0,74	0,98	0,82

Анализ геометрических характеристик поперечного сечения наплавленных валиков позволяет сделать вывод, что применение поперечных колебаний электрода в диапазоне установленных рабочих режимов позволяет получить хорошо сформированные валики с плавным сопряжением поверхностей наплавленного и основного металла (угол $\alpha > 120^\circ$). При использовании амплитуды колебаний 15 мм незначительная выпуклость поверхности валика изменяется на плоский профиль, что позволяет уменьшить взаимное перекрытие валиков при многопроходной наплавке, а также снизить припуски на механическую обработку наплавленного слоя.

Выводы

1. Установлено, что диапазон режимов наплавки колеблющимся электродом в защитном газе с бездефектным формированием наплавлен-

ных валиков достаточно узок и находится в области относительно высоких значений сварочного тока (350 А), малых значений скорости наплавки (до 16 см/мин) и частоты колебаний электрода (менее 2 Гц).

2. Для формирования подслоя перед износостойкой наплавкой технологически более выгодно использовать погонную энергию более 30 кДж/см, что при хороших технологических свойствах наплавленного валика способствует более плавному градиенту изменения свойств при переходе от основного металла к наплавленному износостойкому слою в условиях многопроходной многослойной наплавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабинец, А. А. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков / А. А. Бабинец [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 5. – С. 17–21.

2. Сенченков, И. К. Расчетный метод оценки стойкости наплавленного металла при одновременном действии циклических механических и термических нагрузок / И. К. Сенченков [и др.] // Технологические системы. – 2011. – № 4. – С. 89–96.
3. Якушин, Б. Ф. Новая технология формирования подслоя при износостойкой дуговой наплавке / Б. Ф. Якушин, А. В. Сударев, В. Н. Куценко // Сварка и диагностика. – 2010. – № 5. – С. 32–37.
4. Разиков, М. И. Установка для дуговой наплавки электродом большого диаметра с поперечными колебаниями / М. И. Разиков, Н. В. Королев // Сварочное производство. – 1963. – № 9. – С. 37–38.
5. Котылев, В. А. Автоматическая сварка плакирующего слоя двухслойной стали с механическими колебаниями / В. А. Котылев, В. П. Тихонов, В. Ф. Чабуркин // Сварочное производство. – 1970. – № 9. – С. 13–14.
6. Пахолук, А. П. Оптимизация процесса дуговой широкоослойной наплавки поверхностей цилиндров малых диаметров / А. П. Пахолук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1980. – № 6. – С. 49–52.
7. Полосков, С. С. Анализ влияния параметров поперечных колебаний на процесс широкоослойной наплавки плавящимся электродом с токоведущей присадочной проволокой / С. С. Полосков [и др.] // Сварка и диагностика. – 2022. – № 5. – С. 28–33.
8. Ерофеев, В. А. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоев на стальную подложку / В. А. Ерофеев, С. К. Захаров, О. В. Кузнецов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 11. – С. 132–138.
9. Тугушев, Б. Ф. Наплавка колеблющимся электродом цилиндрических поверхностей деталей при их восстановлении / Б. Ф. Тугушев [и др.] // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – № 3. – С. 24–29.
10. Панков, И. С. Сварочная установка с колеблющейся головкой / И. С. Панков // Сварочное производство. – 1967. – № 1. – С. 42.
11. Акулов, А. И. Особенности формирования шва при сварке в углекислом газе с поперечными колебаниями электрода / А. И. Акулов, В. В. Спицын, Г. Г. Чернышов // Сварочное производство. – 1965. – № 11. – С. 32–34.
12. Lai H. [и др.] The effect of oscillating traverse welding on performance of Cr-Fe-C hardfacing alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – № 46. – С. 5171–5181.
13. Яковлев, В. В. Методика расчета тепловых процессов при наплавке массивных тел / В. В. Яковлев [и др.] // Сварка и диагностика : сб. докл. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2014. – С. 154–159.
14. Яковлев, В. В. Разработка технологии наплавки массивных изделий / В. В. Яковлев [и др.] // Сварка и диагностика : сб. докл. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2014. – С. 160–166.
15. Кушнерев, Д. М. Широкоослойная наплавка под керамическим флюсом цилиндрических деталей / Д. М. Кушнерев [и др.] // Автоматическая сварка. – 1974. – № 12. – С. 48–50.
16. Литвиненко-Арьков, В. Б. Расчет режима дуговой наплавки колеблющимся электродом оправок трубокатного стана / В. Б. Литвиненко-Арьков [и др.] // Сварка и диагностика. – 2010. – № 5. – С. 20–24.
17. Соколов, Г. Н. Наплавка колеблющимся электродом цилиндрических деталей штампов для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, А. С. Трошков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2009. – № 3. – С. 8–11.
18. Чернышов, Г. Г. Регулирование размеров и формы сварочной ванны и шва при сварке в CO_2 с поперечными колебаниями электрода / Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов // Сварочное производство. – 1970. – № 10. – С. 35–37.
19. Данилов, А. И. Расчет температуры на поверхности полубесконечного тела при движении дуги по синусоидальному закону / А. И. Данилов, Г. З. Мармур // Сварочное производство. – 1980. – № 12. – С. 5–6.
20. Цыган, Б. Г. Особенности и технология коррозионностойкой наплавки колеблющимся электродом / Б. Г. Цыган, А. Ф. Мироненко, В. Г. Демченко // Сварочное производство. – 1969. – № 2. – С. 22–25.
21. Фастов, С. А. Особенности формирования наплавленного металла со структурой бейнита под влиянием повторных нагревов / С. А. Фастов [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 77–83.
22. Ерохин, А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – Москва : «Машиностроение», 1973. – 448 с.
23. Jenney, C. L. Welding handbook. Vol. 1. Welding science and technology / C. L. Jenney, A. O'Brien – 9th edition. – Miami : American welding society, 2001. – 985 p.