

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМОТРОНА НА ХИМИЧЕСКУЮ И СТРУКТУРНУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВЫМ МЕТОДОМ

И. А. РЯБЦЕВ¹, Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ¹, И. А. БАРТЕНЕВ², Г. Н. ГОРДАНЬ¹,
И. Л. БОГАЙЧУК¹, Л. М. КАПИТАНЧУК¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²КарГТУ. 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, бульвар Мира, 56. E-mail: igor_svar@mail.ru

Изучено влияние амплитуды и частоты колебаний плазматрона на формирование наплавленных валиков, характер проплавления основного металла, а также на структурную и химическую неоднородность в зоне соединения наплавленного и основного металлов. Наибольшее влияние на форму валика и его микроструктуру оказывает амплитуда колебаний плазматрона — с увеличением амплитуды увеличивается ширина валика и снижается его высота. Исследовали также влияние частоты колебаний плазматрона на характер проплавления основного металла и на химическую и структурную неоднородность в зоне соединения основного и наплавленного металла вдоль направления наплавки. При наплавке с колебаниями плазматрона наблюдается волнистая конфигурация границы соединения наплавленного и основного металлов в продольном направлении с большей частотой выступов и впадин, которая повторяет частоту колебаний плазматрона. Установлено, что с увеличением частоты колебаний плазматрона, и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание основных легирующих элементов резко меняется. Библиогр. 6, рис. 11.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, колебания плазматрона, амплитуда и частота колебаний, проплавление основного металла, химическая и структурная неоднородность, формирование наплавленного металла

Известно, что плазменно-порошковая наплавка в большинстве случаев выполняется с колебаниями плазматрона. Это позволяет за один проход наплавлять валики заданной ширины и высоты с минимальным проплавлением основного металла [1–6]. Анализ показывает, что, если не учитывать электрические показатели режима наплавки и скорость подачи порошка, то основное влияние на эти характеристики наплавленных валиков оказывают амплитуда и частота колебаний плазматрона, а также скорость наплавки. Причем, все эти характеристики взаимосвязаны, и при изменении одной из них для получения качественных наплавленных валиков необходимо корректировать две другие характеристики.

Целью настоящих исследований было изучение влияния амплитуды и частоты колебаний плазматрона на формирование наплавленных валиков, характер проплавления основного металла, а также на структурную и химическую неоднородность в зоне соединения наплавленного и основного металлов.

На первом этапе исследовано влияние амплитуды и частоты колебаний плазматрона, а также тока наплавки на формирование валиков наплавленного металла. При этом амплитуда изменялась в пределах 0...7 мм, частота — 30...90 мин⁻¹, ток — 210...270 А. Скорость наплавки состав-

ляла 10 м/ч, подача порошка 3,3 кг/ч, присадочный порошок ПР-10Р6М5. Наплавку одиночных валиков выполняли на пластины стали Ст3 толщиной 15 мм. Исследования формы валиков и их структуры выполняли на поперечных макро- и микрошлифах.

Наиболее значительное влияние на форму валика и его микроструктуру оказывает амплитуда колебаний плазматрона. С увеличением амплитуды увеличивается ширина валика и снижается его высота (рис. 1, а). При наплавке без колебаний ($A = 0$) на токе 240...245 А валик высокий и имеет небольшой подворот (коэффициент формы валика равен 1,8), хотя в целом формирование хорошее. При амплитуде 2...3 мм формирование хорошее, в поперечном сечении валик имеет полукруглую форму с углом смачивания менее 90°. С дальнейшим увеличением амплитуды колебаний ширина валика b увеличивается, а его высота h уменьшается, и валик становится более плоским.

Влияние тока наплавки на форму валика обычное, т. е. с возрастанием тока валик становится ниже и шире (рис. 1, б). Но даже при довольно больших для скорости 10 м/ч значениях тока (270 А) и подачи порошка (3,3 кг/ч), наплавка с колебаниями позволяет избежать заметного проплавления основного металла.

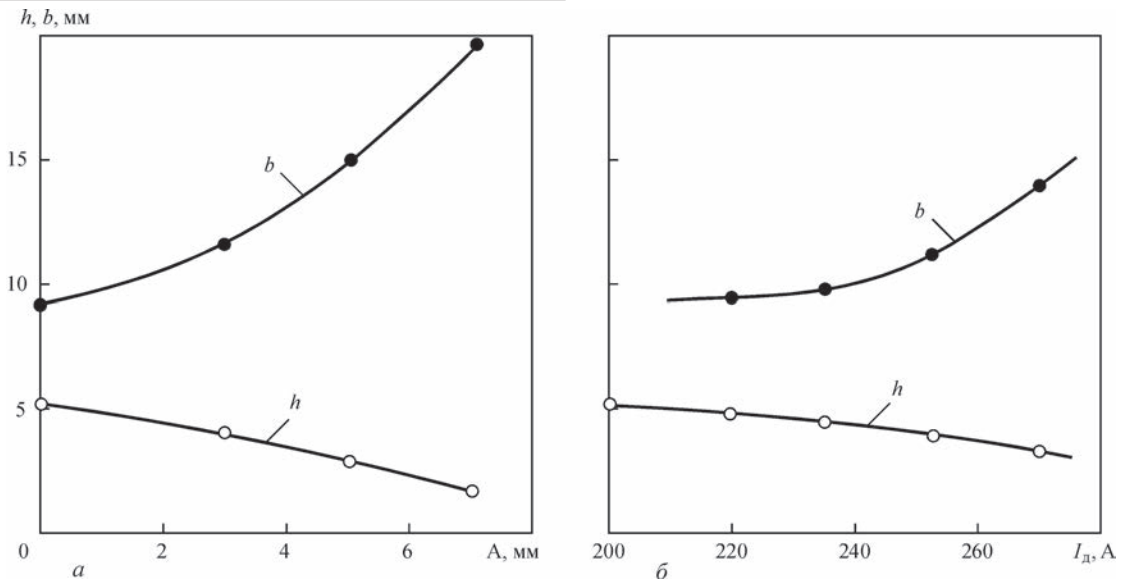


Рис. 1. Влияние амплитуды колебаний A ($I_d = 245$ А; частота колебаний $f = 70$ мин⁻¹) (а) и тока I_d ($A = 3$ мм; $f = 70$ мин⁻¹) (б) на высоту h и ширину b наплавленного валика

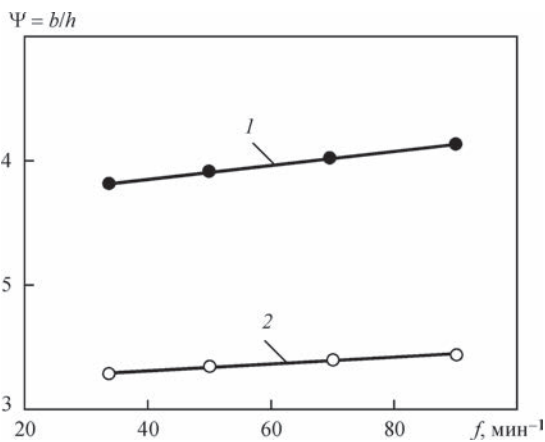


Рис. 2. Влияние амплитуды A и частоты колебаний плазмотрона f на форму наплавленного валика ($I_d = 245$ А): 1 — $A = 5$ мм; 2 — 25

Увеличение частоты колебаний плазмотрона очень мало влияет на коэффициент формы валика (рис. 2), причем он возрастет за счет весьма не-

значительного снижения высоты валика, т. е. валик становится более плоским. Хорошее формирование краев валика отмечается при частоте более 60 мин⁻¹.

Микроструктура наплавленного металла при значениях амплитуды колебаний плазмотрона 0...3 мм отличается крупным зерном (рис. 3, а). При амплитуде 5 мм и более значительно возрастает доля мелких, почти равноосных зерен (рис. 3, б), которые при наплавке без колебаний присутствуют лишь в незначительных количествах вблизи линии сплавления и в поверхностной зоне валиков.

На следующем этапе были проведены исследования влияния частоты колебаний плазмотрона на характер проплавления основного металла и на химическую и структурную неоднородность в зоне соединения основного и наплавленного металла вдоль направления наплавки. Эксперименты проводились на следующих режимах: амплитуда колебаний $A = 10$ мм; частота колебаний f : обра-

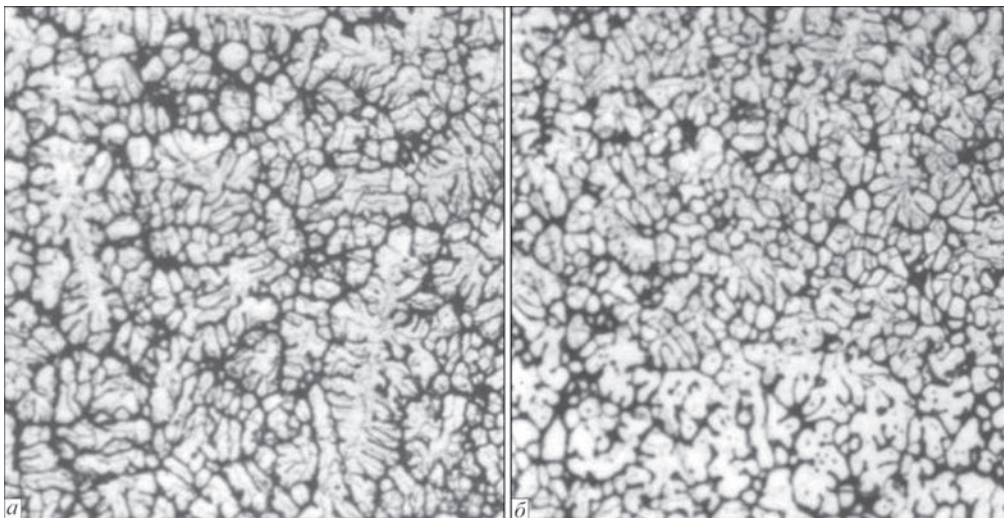


Рис. 3. Микроструктура ($\times 300$) наплавленного металла типа стали Р6М5 при $I_d = 245$ А: а — $A = 0$ мм, $f = 0$ мин⁻¹; б — $A = 5$ мм, $f = 70$ мин⁻¹

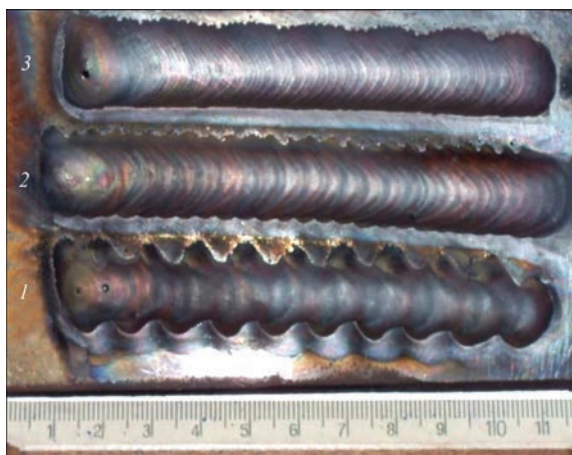


Рис. 4. Внешний вид валиков, наплавленных плазменно-порошковым методом с колебаниями плазмотрона при частоте, мин^{-1} : 1 — 40; 2 — 60; 3 — 90 (амплитуда колебаний — 10 мм) зец 1 — 40 мин^{-1} , образец 2 — 60 мин^{-1} , образец 3 — 90 мин^{-1} ; ток — 180 А; скорость наплавки — 10,5 м/ч; подача порошка — 3,0 кг/ч, присадочный порошок ПР-Х18Н9. Внешний вид наплавленных валиков приведен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что с увеличением частоты колебаний плазмотрона, при неизменной амплитуде колебаний плазмотрона и скорости наплавки, формирование наплавленных валиков улучшается, валики становятся более гладкими. При этом чешуйчатость на поверхности валиков соответствует частоте колебаний плазмотрона.

Наплавленные валики были разрезаны по центру вдоль продольной оси. После шлифовки и полировки образцы протравлены электролитическим методом в растворе хромовой кислоты и проведены их металлографические исследования. Такая подготовка образцов позволила оценить структурную и химическую неоднородность

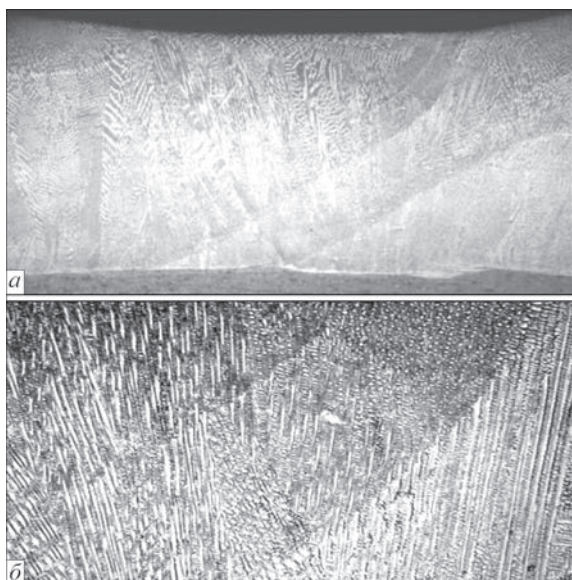


Рис. 5. Продольное сечение наплавленного валика 1: а — макроструктура ($\times 20$); б — микроструктура ($\times 100$)

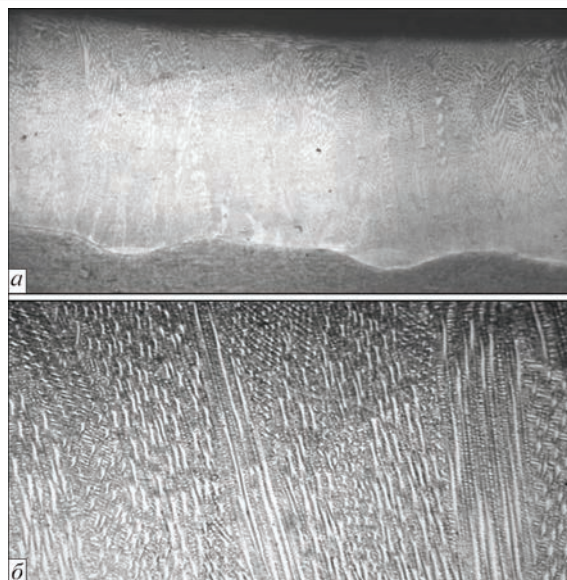


Рис. 6. Продольное сечение наплавленного валика 2: а — макроструктура ($\times 20$); б — микроструктура ($\times 100$)

в зоне соединения основного и наплавленного металлов по длине наплавленных валиков.

При увеличении $\times 20$ на продольном шлифе наплавленного валика 1 (рис. 5, а) зафиксирована четкая и достаточно ровная линия сплавления, с небольшими впадинами (увеличением проплавления) в местах прохождения плазменной дуги.

Кристаллизация наплавленного металла дендритная (рис. 5, б). Микроструктура состоит из аустенитной матрицы и выделений δ -феррита по границам кристаллитов. Ширина кристаллитов составляет 20...35 мкм. При поперечном перемещении плазмотрона при наложении одного слоя на другой видна граница между ними и область перекрытия, причем граница между слоями сохраняется от поверхности наплавленного металла к линии сплавления с основным металлом.

Со стороны наплавленного металла располагается переходный слой, имеющий промежуточную твердость между твердостью наплавленного и основного металла. Ширина этого слоя составляет 5...50 мкм и зависит от проплавления основного металла, т. е. от изменения состава наплавленного слоя при перемешивании основного и наплавленного металла. Ширина ЗТВ для наплавленного валика 1 составляет 2600...2700 мкм.

На рис. 6 приведена макро- и микроструктура наплавленного валика 2. В этом случае линия сплавления наплавленного металла с основным металлом имеет волнистый характер, с чередующимися впадинами и выступами, повторяющими колебания плазмотрона (рис. 6, а). При этом впадины (местное увеличение глубины проплавления) соответствуют местам непосредственного прохождения плазменной дуги, а выступы (местное снижение глубины проплавления) — результат воздействия на основной металл периферий-

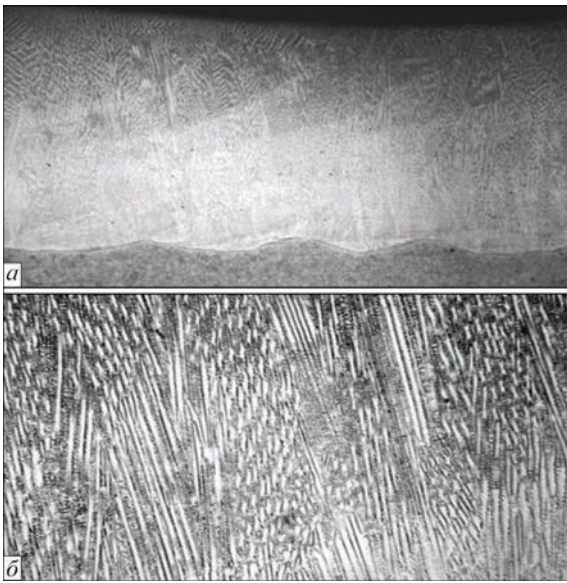


Рис. 7. Продольное сечение наплавленного валика 3: *a* — макроструктура ($\times 20$); *б* — микроструктура ($\times 100$)

ной зоны дуги. Кристаллизация наплавленного металла дендритная, во впадинах наплавленный металл имеет более дисперсную ячеистую структуру. Столбчатые кристаллиты прорастают от линии сплавления с основным металлом к поверхности образца и имеют ширину 15...20 мкм.

При поперечном перемещении плазматрона при наложении одного слоя на другой, видимая граница между соседними слоями (в отличие от валика 1) не фиксируется, что свидетельствует о хорошем перемешивании наплавленного металла (рис. 6, б). Ширина переходного слоя вдоль линии сплавления составляет 2...40 мкм. Ширина ЗТВ — 3700 ... 3800 мкм.

На рис. 7 представлена макро- и микроструктура наплавленного валика 3. Линия сплавления наплавленного и основного металла также имеет

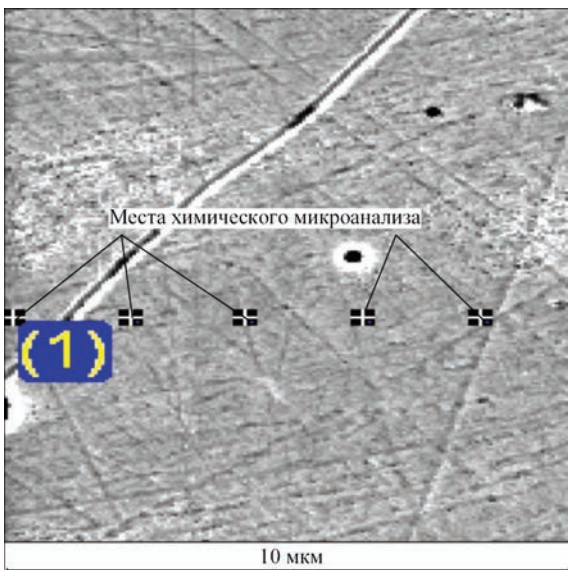


Рис. 8. Иллюстрация проведения химического микроанализа на Оже-микронзонде

волнистый характер, но с бóльшей частотой выступов и впадин, чем в наплавленном валике 2, что объясняется более высокой частотой колебаний плазматрона (рис. 7, *a*). По линии соединения со сталью Ст3 наблюдается тонкий слой переменной ширины от 2 до 20 мкм. Ширина ЗТВ составляет 4200...4500 мкм. Четко видны вытянутые кристаллиты, которые расположены перпендикулярно к линии сплавления и которые имеют ширину 15...20 мкм. Микроструктура наплавленного металла валика 3 аналогична микроструктуре наплавленных валиков 1 и 2 и состоит из аустенита и δ -феррита, расположенного по границам кристаллитов.

Исследовали химический состав наплавленного и основного металла поперек линии их сплавления. Расстояние между соседними замерами составляло приблизительно 2 мкм (рис. 8). Исследования проводили на Оже-микронзонде Jamp-9500F фирмы «JEOL», оборудованном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром INCA Penta FETx3. Энергия первичного электронного пучка составляла 10 кэВ при токе зонда 500 пА. Перед исследованием проводилась очистка поверхности

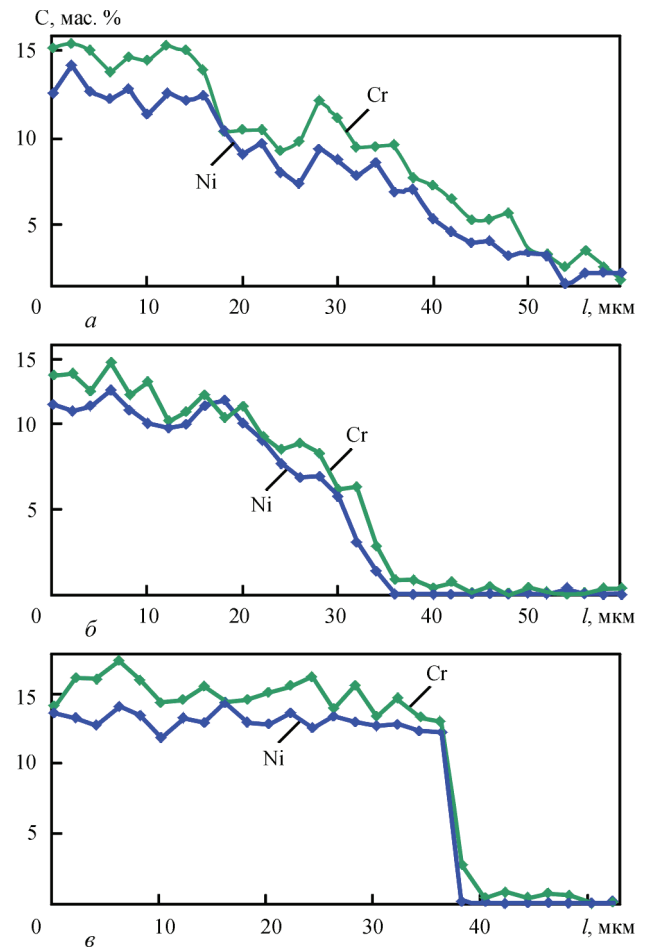


Рис. 9. Распределение хрома и никеля в образце 1 в зоне сплавления: *a* — прямой участок на линии сплавления; *б* — впадина на линии сплавления; *в* — выступ на линии сплавления

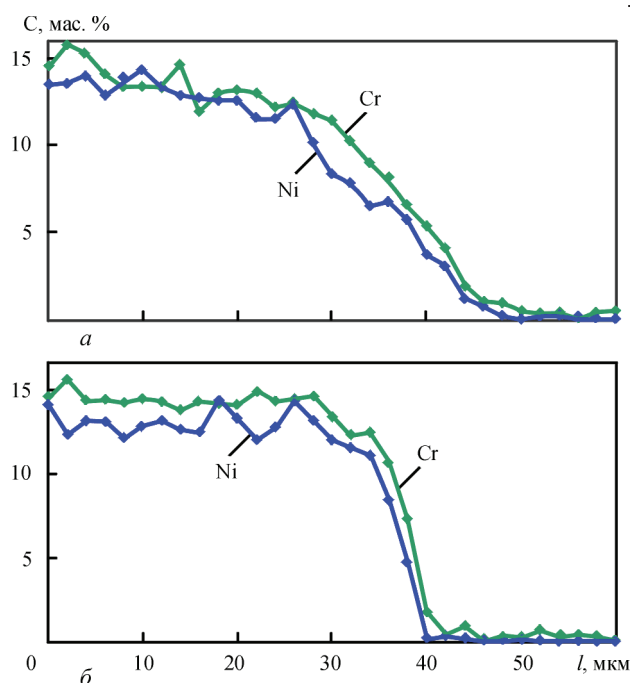


Рис. 10. Распределение хрома и никеля в образце 2 в зоне сплавления: *a* — впадина на линии сплавления; *б* — выступ на линии сплавления

образцов ионами аргона Ar^+ с энергией 500 эВ в течение 10 мин (скорость травления составляла 1 нм/мин).

На образце 1 исследовали распределение основных легирующих элементов (никеля и хрома) на прямом участке, выступе и впадине на линии сплавления основного и наплавленного металлов (рис. 9).

В образцах 2 и 3, наплавленных с более высокой частотой колебаний плазматрона, выделить на линии сплавления прямолинейные участки достаточной протяженности для проведения анализов оказалось затруднительным. По этой причине на этих образцах распределение основных легирующих элементов (никеля и хрома) исследовали на выступе и впадине на линии сплавления основного и наплавленного металлов (рис. 10, 11). В этих образцах, по сравнению с образцом 1, наблюдается более резкое изменение содержания основных легирующих элементов наплавленного металла на границе сплавления.

Следует отметить, что с увеличением частоты колебаний возрастает скорость поперечного перемещения плазматрона, соответственно уменьшается время непосредственного воздействия плазменной дуги на основной металл. Именно этим, по-видимому, можно объяснить тот факт, что с увеличением частоты колебаний плазматрона и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание основных легирующих элементов резко меняется от наплавленного к основному металлу.

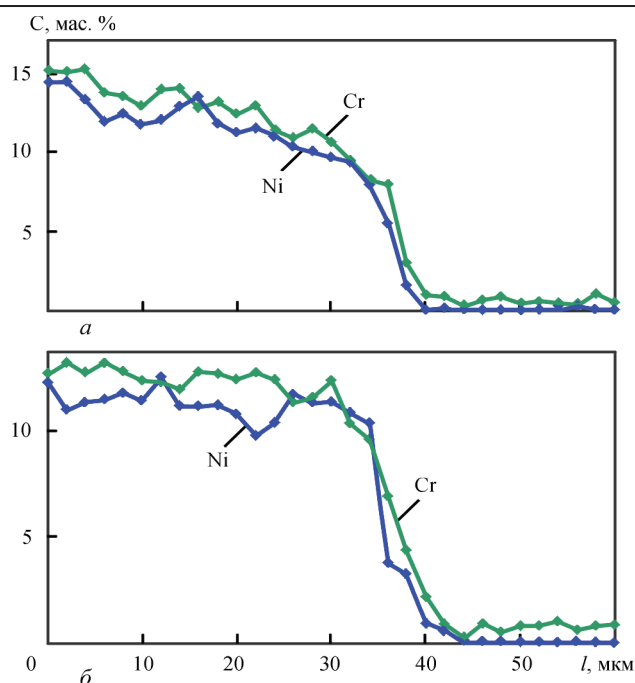


Рис. 11. Распределение хрома и никеля в образце 3 в зоне сплавления: *a* — впадина на линии сплавления; *б* — выступ на линии сплавления

Выводы

1. При плазменно-порошковой наплавке исследовано влияние амплитуды и частоты колебаний плазматрона на формирование наплавленных валиков. При неизменных других показателях режима наплавки (скорость наплавки, ток, скорость подачи порошка) наиболее значительное влияние на форму валика оказывает амплитуда колебаний плазматрона — с ее увеличением растет ширина валика и снижается его высота.

2. Исследования влияния частоты колебаний плазматрона на структурную неоднородность металла, наплавленного плазменно-порошковым методом, показали:

линия сплавления наплавленного и основного металлов в продольном направлении имеет волнистый характер с частотой выступов и впадин, которая повторяет частоту колебаний плазматрона; при этом впадины (местное увеличение глубины проплавления) соответствуют траектории непосредственного прохождения плазменной дуги, а выступы (местное снижение глубины проплавления) — результат воздействия на основной металл периферийной зоны дуги;

при увеличении частоты колебаний плазматрона с 40 до 90 мин^{-1} происходит лучшее перемешивание слоев наплавленного металла, выравнивание и измельчение структуры по его сечению.

3. С увеличением частоты колебаний плазматрона и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание леги-

руюющих элементов на этой границе резко меняется от наплавленного к основному металлу.

Список литературы

1. Гладкий П. В., Фрумин И. И. (1965) Плазменная наплавка. *Автоматическая сварка*, **3**, 23–27.
2. Вайнерман А. Е., Шоршоров М. Х., Веселков В. Д., Новосадов В. С. (1969) *Плазменная наплавка металлов*. Ленинград, Машиностроение.
3. Вайнерман А. Е., Захаров В. Ф., Сютьев А. Н. (1975) *Наплавка сжатой дугой нержавеющей стали на углеродистые и низколегированные стали*. Ленинград, ЛДНТП.
4. Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. (2007) *Плазменно-порошковая наплавка в арматуростроении*. Киев, Экотехнология.
5. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. (2007) *Плазменно-порошковая наплавка*. Киев, Экотехнология.
6. Рябцев И. А., Сенченков И. К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.

References

1. Gladky, P.V., Frumin, I.I. (1965) Plasma surfacing. *Avtomatich. Svarka*, **3**, 23-27 [in Russian].
2. Vajnerman, A.E., Shorshorov, M.Kh., Veselkov, V.D., Novosadov, V.S. (1969) *Plasma surfacing of metals*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Vajnerman, A.E., Zakharov, V.F., Syutiev, A.N. (1975) *Surfacing with constricted arc of stainless steel on low-carbon and low-alloy steels*. Leningrad, LDNTP [in Russian].
4. Pereplyotchikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma-powder surfacing in reinforcement engineering*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
5. Gladky, P.V., Pereplyotchikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma-powder surfacing*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing operations*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].

I. O. Ryabtsev¹, С. Ф. Переpletчиков¹, I. A. Барте́нев²,
Г. М. Гордань¹, I. Л. Богайчук¹, Л. М. Капитанчук¹

¹ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²КарДТУ. 100027, Республіка Казахстан, м. Караганда,
бульвар Миру, 56. E-mail: igor_svar@mail.ru

**ВЛИВ АМПЛИТУДИ І ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ
ПЛАЗМОТРОНА НА ХІМІЧНУ ТА СТРУКТУРНУ
НЕОДНОРІДНІСТЬ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО
ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИМ МЕТОДОМ**

Вивчено вплив амплітуди і частоти коливань плазмотрона на формування наплавлених валиків, характер проплавлення основного металу, а також на структурну і хімічну неоднорідність в зоні з'єднання наплавленого і основного металів. Найбільший вплив на форму валика і його мікроструктуру надає амплітуда коливань плазмотрона — зі збільшенням амплітуди збільшується ширина валика і знижується його висота. Досліджували також вплив частоти коливань плаз-

мотрона на характер проплавлення основного металу і на хімічну та структурну неоднорідність в зоні з'єднання основного і наплавленого металу вздовж напрямку наплавлення. При наплавленні з коливаннями плазмотрона спостерігається хвиляста конфігурація границі з'єднання наплавленого і основного металів в поздовжньому напрямку з більшою частотою виступів і западин, яка повторює частоту коливань плазмотрона. Встановлено, що зі збільшенням частоти коливань плазмотрона і на виступах, і на западинах на границі сплаву зменшується перемішування наплавленого і основного металів і зміст основних легуючих елементів різко змінюється. Бібліогр. 6, рис. 11.

Ключові слова: плазмово-порошкове наплавлення, коливання плазмотрона, амплітуда і частота коливань, проплавлення основного металу, хімічна і структурна неоднорідність, формування наплавленого металу

I. A. Ryabtsev¹, E. F. Perepletchikov¹, I. A. Bartenev²,
G. N. Gordan¹, I.L. Bogaychuk¹, L. M. Kapitanchuk¹

¹E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua
²Karaganda State Technical University
56 Mira Str., Karaganda, 100027, Kazakhstan.
E-mail: igor_svar@mail.ru

**EFFECT OF AMPLITUDE AND FREQUENCY
OF PLASMATRON OSCILLATIONS ON CHEMICAL
AND STRUCTURAL INHOMOGENEITY OF METAL
DEPOSITED BY PLASMA-POWDER METHOD**

Effect of amplitude and frequency of plasmatron oscillation on formation of deposited beads, nature of base metal penetration as well as structural and chemical inhomogeneity in zone of joining of deposited and base metal was investigated. The plasmatron oscillation frequency has the largest effect on bead shape and its microstructure, increase of amplitude rises bead width and decrease of its height. Effect of plasmatron oscillation frequency on nature of base metal penetration and chemical and structural inhomogeneity in zone of joining of base and deposited metals along deposition direction was also investigated. In deposition with plasmatron oscillations there is a wavy configuration of interface of deposited and base metals in longitudinal direction with larger frequency of projections and depressions, which repeats plasmatron oscillation frequency. It is determined that increase of plasmatron oscillation frequency on projections as well as depressions on fusion boundary promotes decrease of deposited and base metals and content of main alloying elements rapidly falls. 6 Ref. , 11 Fig.

Keywords: plasma-powder surfacing, oscillation plasmatron, amplitude and frequency of oscillations, base metal penetration, chemical and structural inhomogeneity, formation of deposited metal

Поступила в редакцію 26.03.2018