



## ОСОБЕННОСТИ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, М. В. МИРОНОВА, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Показано, что при наплавке в постоянном продольном магнитном поле (ПРМП) частотой 50 Гц глубина и площадь проплавления основного металла уменьшаются, если продольная компонента индукции превышает уровень в 50...60 мТл. При наплавке проволокой в ПРМП на оси дуги образуется разрежение. Постоянное и переменное магнитное поле частотой 50 Гц оказывают тормозящее действие на скорость потоков жидкого металла в ванне, и это является одним из основных факторов, приводящих к уменьшению глубины проплавления основного металла при дуговой наплавке проволокой под флюсом.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, низколегированная сталь, продольное магнитное поле, индукция, сварочная ванна, давление дуги, проплавление

При дуговой сварке в продольном магнитном поле (ПРМП) наблюдается такое неблагоприятное явление, как уменьшение глубины проплавления основного металла [1], что применительно к процессу дуговой наплавки проволокой под флюсом является благоприятным. В работе [2] отмечено, что при наплавке проволокой под флюсом увеличение индукции ПРМП частотой 50 Гц снижает глубину проплавления основного металла. Ввиду важности для практики наплавочных работ эффект снижения эффективности проплавления основного металла при воздействии ПРМП требует углубленного изучения. Настоящая работа посвящена уточнению эффекта влияния ПРМП на глубину и площадь проплавления основного металла при наплавке, а также причин, лежащих в основе этого влияния.

Наплавки выполняли на постоянном токе обратной полярности проволокой Св-08ГА (ферромагнетик) диаметром 4 мм на пластины из стали 09Г2С (ферромагнетик) толщиной 20 мм под флюсом АН-348А в ПРМП на режиме:  $I_n = 500...550$  А,  $U_d = 30...32$  В,  $v_n = 27$  м/ч. Во всех экспериментах продольную компоненту индукции  $B_z$  измеряли у поверхности этой пластины при расстоянии от плоского торца электрода до пластины 5 мм. Индукцию постоянного ПРМП измеряли миллитесламетром типа ЭМ-4305 с датчиком Холла с базой 1×1 мм, а переменного ПРМП — миллитесламетром типа Ф-4356 с датчиком Холла с базой 4×4 мм.

Для создания магнитного поля использовали соленоид с ферромагнитным сердечником, установленный соосно с электродом. Наплавки осуществляли с воздействием постоянного и пере-

менного ПРМП частотой 50 Гц. Чтобы уменьшить радиальные компоненты индукции  $B_r$  у электрода в жидком металле ванны, выполняли также наплавки проволокой Св-12Х18Н10Т (немагнитной) диаметром 4 мм на пластины толщиной 20 мм из такой же стали под флюсом АН-20С на указанных выше режимах. На рис. 1, а, б приведены данные поперечных макрошлифов валиков при наплавке с неизменной скоростью подачи проволоки. При увеличении индукции  $B_z$  как знакопеременного частотой 50 Гц, так и постоянного ПРМП глубина проплавления  $H_{пр}$  уменьшается в одинаковой степени (рис. 1, а, кривые 1 и 2). Кроме того, при использовании немагнитных материалов, когда в зоне жидкого металла у электрода практически отсутствует компонента индукции  $B_r$ , глубина  $H_{пр}$  и площадь проплавления  $F_{пр}$  основного металла также значительно уменьшаются при увеличении индукции  $B_z$  ПРМП частотой 50 Гц (рис. 1, а, кривые 3, б). Характерно, что при индукции  $B_z \leq 50...60$  мТл глубина проплавления практически не изменяется, а при  $B_z \geq 50...60$  мТл начинает существенно уменьшаться. Поскольку при включении ПРМП наблюдается снижение  $I_n$  и увеличение  $U_d$ , выполняли также наплавки, когда при воздействии ПРМП увеличивали скорость подачи проволоки и сохраняли (во всех экспериментах) одинаковое значение тока наплавки  $I_n$ . Данные о глубине проплавления  $H_{пр}$  и площади проплавления  $F_{пр}$  в зависимости от индукции ПРМП (рис. 1, б) в этом случае практически совпали с данными, приведенными на рис. 1, а, совпали также и установленные зависимости. Для выявления причин наблюдаемых эффектов выполнили исследования, результаты которых изложены ниже.

Давление дуги определяли при наплавке проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм открытой дугой путем прохождения дуги над вольфрамовым

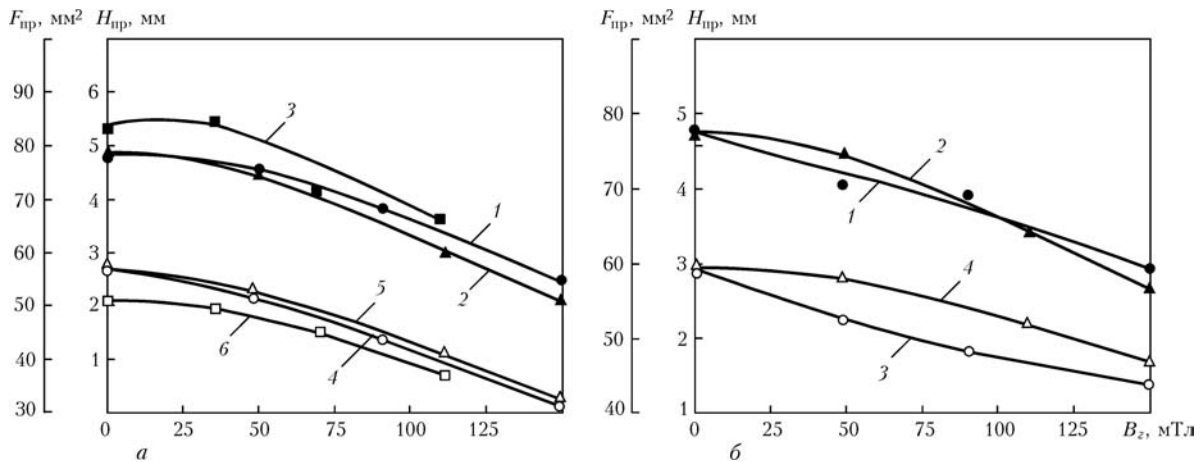


Рис. 1. Влияние индукции  $B_z$  ПРМП на параметры  $H_{пр}$  (темные значки) и  $F_{пр}$  (светлые): *a* —  $v_{под} = \text{const}$ : 1, 4 — Св-08ГА Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 5 — Св-08ГА Ø 4 мм, постоянное ПРМП; 3, 6 — Св-06Х19Н9Т Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; *б* —  $I_n = \text{const}$ : 1, 3 — Св-08ГА Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 4 — Св-08ГА Ø 4 мм, постоянное ПРМП

зондом диаметром 1,0 мм, ось которого установлена на расстоянии 1,5 мм от поверхности пластины, и измерения усилия, оказываемого потоками в плазме дуги на зонд. Установка для измерений и методика исследования газодинамического давления дуги описана в работе [3]. Выполнить указанные измерения оказалось возможным, поскольку при плавлении электрода образовывались чрезвычайно мелкие капли, которые не приводили к замыканию вольфрамового зонда на изделие. Распределение давления дуги по радиусу получали после обработки экспериментальных данных о силе воздействия дуги на вольфрамовый зонд по следующей методике.

Как и в работе [3], исходной информацией служили записи во времени  $t$  усилий, которые оказывала перемещающаяся со скоростью наплавки дуга на неподвижный зонд. Типичные осциллограммы записи силы воздействия дуги на зонд приведены на рис. 2, *a* и *б* соответственно для процесса горения дуги без воздействия и с воздействием ПРМП. Полученные кривые были симметричны. С учетом масштаба изображения по горизонтали (по времени) и скорости наплавки расстояние между точками *A* и *B* на этих рисунках соответствует диаметру дуги  $D$ . Вследствие достаточной симметрии кривых определяли значение радиуса  $R$  ( $R = D/2$ ) и выполняли их обработку на одной из ветвей этой кривой вдоль радиуса  $R$ .

Сечение дуги (в виде круга), в котором измеряли силу воздействия дуги на зонд, разбивали на серию колец, которым соответствовали номера  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ,  $n$  — количество колец, рис. 2, *в*). Силу воздействия дуги на зонд  $F_j$ , когда он находился в  $i$ -м положении, определяли из осциллограмм (рис. 2, *a*, *б*). При этом принимали, что на всей площади выделенного  $j$ -го кольца газодинамическое давление дуги  $p_j$  было постоянным. Усилие, оказываемое на зонд, пропорционально площади зонда, введенного в  $j$ -е кольцо. В общем

виде уравнение для определения силы воздействия дуги на зонд в  $i$ -м положении имеет вид

$$F_i = C_{л3} d_3 \sum_{j=1}^i p_j 2l_{ij} \quad (1)$$

где  $i$  — номер положения зонда ( $i = 1, \dots, n$ );  $d_3$  — диаметр зонда, вводимого в дугу;  $l_{ij}$  — половина длин участков зонда, находящихся в  $j$ -м кольце при  $i$ -м положении зонда,  $l_{ii} = \sqrt{R_i^2 - h_i^2}$ ,  $l_{ij} = \sqrt{R_j^2 - h_i^2} - \sqrt{R_{j+1}^2 - h_i^2}$  ( $j < i$ ),  $h_i = R_i + R_{i+1}/2$ ,  $R_j = R - R/n$  ( $j - 1$ );  $h_i$  — расстояние от оси сечения дуги до оси зонда при  $i$ -м его положении;  $R_j$  — внешний радиус  $j$ -го кольца;  $C_{л3}$  — коэффициент лобового сопротивления проволоки, являющийся функцией числа Рейнольдса [4]:

$$Re = \frac{v_{п3} d_3 \rho}{\eta}$$

где  $v_{п3}$  — скорость потока плазмы;  $\eta$  — динамическая вязкость плазмы;  $\rho$  — плотность плазмы дуги.

Проведенные оценки показали, что для дуговой плазмы [5]  $10^2 < Re < 10^4$ , при этом значение  $C_{л3}$  близко к 1 [6]. В расчетах было принято  $C_{л3} = 1,0$ .

На рис. 2, *в* в качестве примера приведены соответствующие обозначения для случая разбивки круга на пять колец. С помощью программы Microsoft Excel находили давление  $p_j$  в каждом кольце. Например, значение давления  $p_1$  в первом кольце (наружном) определяли из уравнения, вытекающего из (1), приняв значение силы  $F_1$  из рис. 2, *a* при положении зонда на расстоянии  $h_1$  от оси дуги. Далее определяли давление  $p_2$  во втором кольце, считая известным значение давления  $p_1$  в первом кольце и т. д. Блок расчетных формул для  $n = 5$  имеет вид

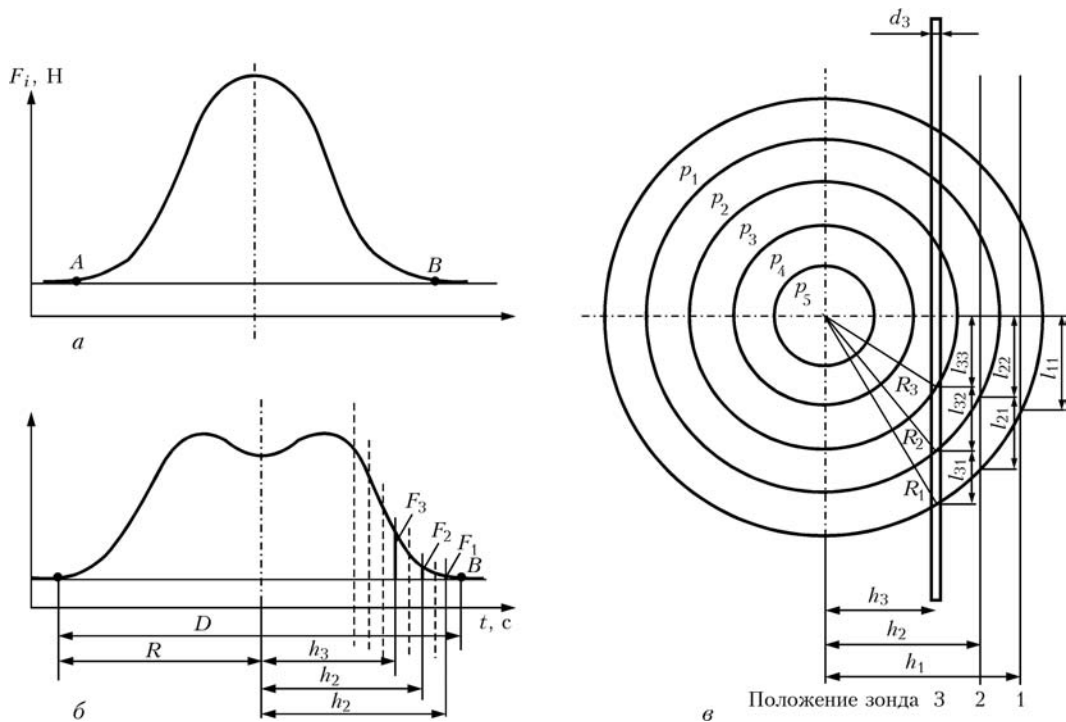


Рис. 2. Схема к расчету распределения газодинамического давления дуги вдоль радиуса  $R$ : а, б — осциллограммы усилия  $F_i$  перемещавшей со скоростью наплавки дуги на зонд соответственно без воздействия и с воздействием ПРМП; в — схема обработки результатов измерений (обозначения см. в тексте)

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{F_1}{2C_{л3} d_3 l_{11}}, \\
 p_2 &= \left[ \frac{F_2}{C_{л3} d_3} - p_1 2l_{21} \right] \frac{1}{2l_{22}}, \\
 p_3 &= \left[ \frac{F_3}{C_{л3} d_3} - p_1 2l_{31} - p_2 2l_{32} \right] \frac{1}{2l_{33}}, \\
 p_4 &= \left[ \frac{F_4}{C_{л3} d_3} - p_1 2l_{41} - p_2 2l_{42} - p_3 2l_{43} \right] \frac{1}{2l_{44}}, \\
 p_5 &= \left[ \frac{F_5}{C_{л3} d_3} - p_1 2l_{51} - p_2 2l_{52} - p_3 2l_{53} - p_4 2l_{54} \right] \frac{1}{2l_{55}}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$F_{\text{инт}} = \sum_{j=1}^n p_j \pi (R_j^2 - R_{j+1}^2), \tag{3}$$

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{инт}}}{\pi R^2}. \tag{4}$$

Интегральная сила воздействия дуги на основной металл (рис. 4, кривые 1, 2), а также среднее газодинамическое давление дуги (рис. 4, кривые 3, 4) при малых значениях индукции ПРМП увеличиваются при повышении индукции как постоянного, так и переменного ПРМП частотой 50 Гц. Характерно, что эти параметры стабили-

Отметим, что описанный метод позволяет определить давление струй паров металла электрода и плазмы на зонд, но не может дать сведений об избыточном давлении магнитного поля внутри дуги. Данные распределения газодинамического давления вдоль радиуса дуги  $R$  (рис. 3) показали, что при увеличении индукции  $B_z$  ПРМП давление в осевой зоне дуги с плавящимся электродом уменьшается, а в направлении радиуса увеличивается, проходя через максимум, что соответствует данным работы [7], установленным для процесса сварки вольфрамовым электродом в аргоне. Интегральную силу воздействия дуги и среднее газодинамическое давление на основной металл определяли соответственно по формулам

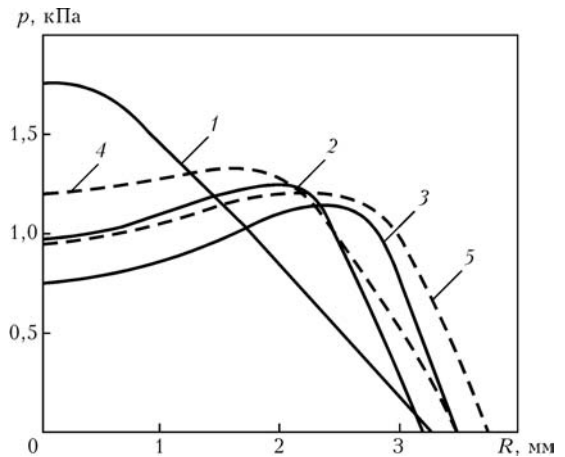


Рис. 3. Распределение газодинамического давления дуги вдоль радиуса  $R$  с воздействием постоянного ПРМП (2, 3) и с ПРМП частотой 50 Гц (4, 5): 1 —  $B_z = 0$ ; 2, 4 — 63...65; 3, 5 — 100 мТл

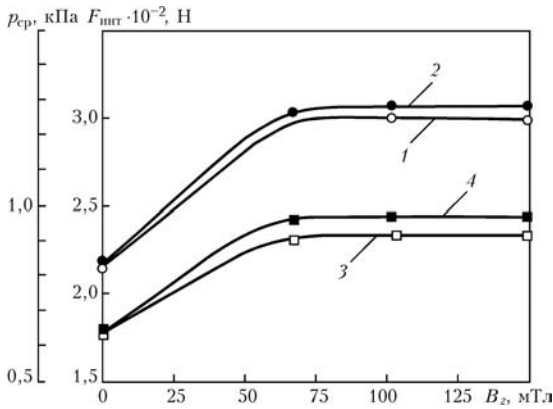


Рис. 4. Влияние индукции  $B_z$  ПРМП на интегральное усилие (1, 2) и среднее газодинамическое давление дуги (3, 4): 1, 3 — постоянное ПРМП; 2, 4 — ПРМП частотой 50 Гц

зируются, если индукция ПРМП превышает ориентировочно значения 50...60 мТл.

Таким образом, наблюдаемое уменьшение  $H_{пр}$  при увеличении индукции  $B_z$  ПРМП и особенно при  $B_z$  свыше 50...60 мТл (см. рис. 1) не может быть объяснено изменением интегрального усилия дуги, либо среднего давления дуги, поскольку они не снижаются в указанном диапазоне индукций ПРМП. Полагали, что объяснение факта снижения  $H_{пр}$  при увеличении индукции  $B_z$  ПРМП необходимо искать, анализируя явления, связанные с гидродинамикой жидкого металла в сварочной ванне и прежде всего с торможением потоков этого металла при воздействии ПРМП.

Воздействие постоянного ПРМП на движущийся из головной в хвостовую часть ванны со скоростью  $v$  жидкий металл индуцирует в этом металле поперечное электрическое поле напряженностью  $E$  (рис. 5) [8]. Этот процесс приводит к возникновению поперечного напряжения  $U = Eb_b$  (где  $b_b$  — ширина ванны). Выделим трубку тока, показанную на рис. 5. В этой трубке напряжение  $U$  вызывает появление поперечного индуцированного тока  $I$ . Так как направление скорости  $v$  перпендикулярно направлению вектора  $B_z$ , то для модуля напряженности электрического поля можно записать:

$$E = vB_z, \quad (5)$$

$$U = Eb_b = IR, \quad (6)$$

где  $R$  — сопротивление контура, по которому замыкается ток  $I$  (по основному металлу).

Из формул (5) и (6) следует, что значение тока пропорционально  $B_z$  и  $v$ :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{Eb_b}{R} = \frac{b_b B_z v}{R}. \quad (7)$$

На выделенную трубку с током  $I$  действует сила  $F$  [8]:

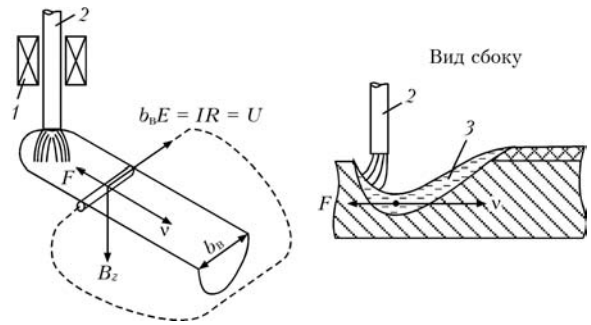


Рис. 5. Схема к расчету силы  $F$ , тормозящей скорость потока металла в ванне: 1 — соленоид, генерирующий ПРМП; 2 — электрод; 3 — жидкий металл сварочной ванны

$$F = IB_z b_b. \quad (8)$$

Используя выражение (7) и исключив ток, получаем

$$F = \frac{\rho B_z^2 b_b^2}{R}. \quad (9)$$

Отметим, что сила  $F$  всегда направлена встречно вектору  $v$ , т. е. уменьшает скорость потока. Рассмотренные явления в ванне близки по сути к явлениям, протекающим в МГД-генераторах, когда на движущийся в магнитном поле поток электропроводного материала (плазмы) также действует тормозящая сила. При воздействии знакопеременного ПРМП (в том числе и частотой 50 Гц) направление силы  $F$  при смене направления индукции  $B_z$  не меняется. Тормозящий эффект сохраняется и в этом случае, только тормозящая сила  $F$  будет пульсировать с удвоенной частотой ПРМП. Таким образом, при воздействии и постоянного, и знакопеременного ПРМП тормозящая сила  $F$  приводит к уменьшению скорости  $v$  придонного потока металла, увеличению толщины жидкой прослойки жидкого металла под дугой и, как следствие, уменьшению глубины и площади проплавления основного металла.

Действием указанного фактора торможения потоков жидкого металла можно также объяснить снижение глубины и площади проплавления основного металла при наплавке с воздействием ПРМП частотой 50 Гц, когда изделие и электрод не являются ферромагнетиками.

При увеличении индукции  $B_z$  ПРМП частотой 50 Гц очертания зоны проплавления соответствуют возрастающему давлению дуги в направлении радиуса (см. рис. 3), которое проявляется в снижении  $H_{пр}$  в центре (по оси) валика и возрастании  $H_{пр}$  в периферийной (по ширине валика) части. Вероятно, как это наблюдалось при наплавке вольфрамовым электродом в аргоне [3], и плотность теплового потока дуги вдоль радиуса при воздействии ПРМП имеет максимум не в центре активного пятна дуги на изделии, а изменяется так же, как и газодинамическое давление дуги.

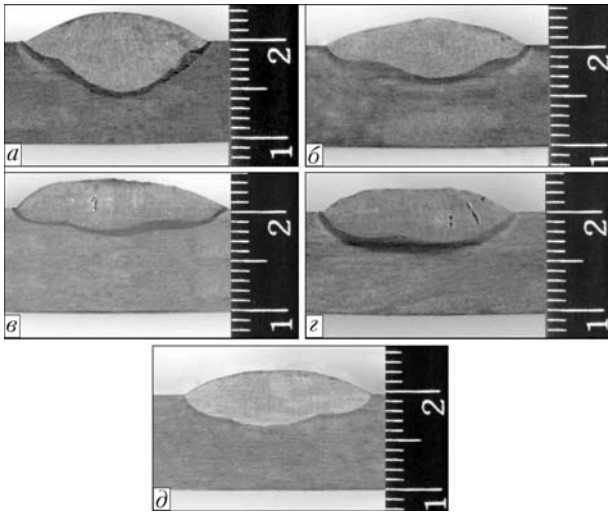


Рис. 6. Макрошлифы наплавки, выполненных при  $v_{\text{под}} = \text{const}$ : а — наплавка без ПРМП; б — ПРМП частотой 50 Гц,  $B_z = 90$  мТл; в — то же,  $B_z = 150$  мТл; г — постоянное ПРМП,  $B_z = 110$  мТл; а-г — проволока Св-08ГА и пластина из стали 09Г2С ( $I_{\text{н}} = 500 \dots 550$  А,  $U_{\text{д}} = 30 \dots 32$  В); д — ПРМП частотой 50 Гц,  $B_z = 70$  мТл, проволока и пластина из немагнитных материалов

Вероятно также, что аналогично и диаметр активного пятна дуги на изделии несколько возрастает при увеличении индукции  $B_z$  ПРМП. Сравнение очертаний зоны проплавления металла при наплавке без ПРМП (рис. 6, а) и с использованием ПРМП частотой 50 Гц и индукцией  $B_z = 90$  мТл (рис. 6, б) показывает, что очертания этой зоны не изменяются, уменьшается лишь глубина проплавления и увеличивается ширина валика. При воздействии ПРМП с индукцией  $B_z = 150$  мТл  $H_{\text{пр}}$  уменьшается в центре валика и возрастает в периферийной части (по ширине) валика (рис. 6, в). Особенно это проявляется при использовании для наплавки постоянного ПРМП с индукцией порядка  $B_z > 110$  мТл (рис. 6, г). Аналогично изменяется форма зоны проплавления и при наплавке постоянным ПРМП и частотой 50 Гц с использованием немагнитных электрода и изделия (рис. 6, д). Можно полагать, что определенный вклад в формирование такого очертания зоны проплавления вносят не только изменяющиеся по радиусу плотность потока в анодном пятне дуги на изделии и газодинамическое давление плазмы столба дуги, но и электродные капли. При воздействии как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП капли на торце электрода приобретают импульс силы и скорости, направленные по касательной к ок-

ружности и вниз, т. е. они движутся по конусной поверхности. Своим теплосодержанием и импульсом капли способствуют росту проплавления металла по краям валика. Однако основной вклад в общее снижение глубины  $H_{\text{пр}}$  и площади проплавления  $F_{\text{пр}}$  основного металла при воздействии ПРМП вносит тормозящее действие на скорость придонного потока металла в ванне из головной ее части в хвостовую осевая (продольная) составляющая индукции ПРМП. Тормозящее действие на скорость потоков металла в ванне пропорционально квадрату индукции  $B_z$  ПРМП и скорости этих потоков.

## Выводы

1. При дуговой наплавке проволокой под флюсом глубина проплавления основного металла уменьшается, если значение продольной компоненты индукции постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП превышает уровень порядка 50...60 мТл. Это наблюдается при использовании проволок и изделий как из ферромагнитных, так и немагнитных материалов.

2. Уменьшение эффективности проплавления основного металла при наплавке с воздействием постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП определяется не только изменением распределения давления по радиусу дуги и радиуса дуги, а в основном торможением этим полем придонного потока жидкого металла из головной в хвостовую часть ванны.

1. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман и др. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля // Свароч. пр-во. — 1993. — № 6. — С. 30–31.
3. Размышляев А. Д., Миронова М. В., Дели А. А. Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне // Автомат. сварка. — 2008. — № 3. — С. 21–25.
4. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. — Киев: Наук. думка, 1989. — 864 с.
5. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
6. Рабинович Е. З. Гидравлика. — М.: Недра, 1980. — 280 с.
7. О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке / В. Н. Селяненок, В. А. Блинков, Ю. В. Казаков, В. Н. Баженов // Свароч. пр-во. — 1975. — № 11. — С. 5–7.
8. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. — Ч. 1. — М.-Л.: Энергия, 1965. — 358 с.

It is shown that at surfacing in a constant longitudinal magnetic field (CLMF) with 50 Hz frequency the depth and area of base metal penetration decrease, if the magnitude of the longitudinal component of induction exceeds its level by 50...60 mT. At wire surfacing in CLMF a rarefaction forms on the arc axis. The constant and variable magnetic field of 50 Hz frequency has a braking action on the velocity of liquid metal flows in the pool, and this is one of the main factors leading to decrease of the penetration depth of the base metal in submerged-arc surfacing with wire.

Поступила в редакцию 06.02.2008