

УДК 621.791

Размышляев А. Д., Агеева М. В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Эффективность применения дуговой наплавки под флюсом повышается интенсифицированием процесса расплавления электродной проволоки и уменьшением глубины и площади проплавления основного металла, уменьшением доли участия основного металла в наплавленном. Для этих целей перспективным является использование внешних продольных магнитных полей (ПРМП).

Исследования, проведенные рядом авторов, показали, что применение ПРМП при сварке позволяет управлять геометрическими размерами шва [1], измельчать структуру сварного шва и повышать его служебные характеристики [2–4]. Анализ литературных данных показал, что воздействием ПРМП возможно повышение эффективности дуговой наплавки под флюсом за счет увеличения коэффициента расплавления проволоки [5] и уменьшения размеров зоны проплавления основного металла [1, 6, 7]. Однако особенности плавления электродного и основного металлов, которые практически всегда являются ферромагнетиками, в настоящее время не исследованы. Не установлено влияние частоты ПРМП и магнитных свойств электродных проволок на коэффициент их расплавления.

Целью работы является определить особенности плавления электродного и основного металлов при дуговой сварке и наплавке под флюсом с воздействием ПРМП для повышения эффективности этих процессов.

Для создания ПРМП использовали устройство (рис. 1), состоящее из катушки (2) с числом витков 144 из медного изолированного провода диаметром 2 мм и сердечника из материала – стали Ст. 3 (3). Сварочная проволока (1) проходила через мундштук, расположенный в отверстии сердечника.

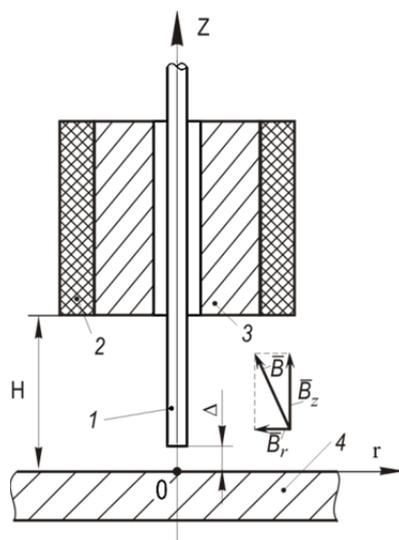


Рис. 1. Схема для измерений компонент индукций B_z и B_r ПРМП в зоне под торцем электрода:

1 – сварочная проволока; 2 – катушка; 3 – сердечник, 4 – пластина

Расстояние от плоского торца электрода (1) до пластины (4) составляло $\Delta = 5$ мм при расстоянии от нижнего торца катушки до пластины $H = 35$ мм. Для изучения индукций

ПРМП в зоне капли и дуги проводились измерения радиальной B_r и продольной B_z компонент индукции миллитесламетром типа ЭМ-4305 с датчиком Холла с измерительной базой 1×1 мм.

Расчетно-экспериментальным путем впервые показано [8], что при дуговой наплавке и сварке капля на торце ферромагнитного электрода вращается под действием электромагнитной силы, образованной радиальной компонентой индукции ПРМП B_r с осевой компонентой плотности тока в этой капле (j_z).

Для определения коэффициента расплавления электродной проволоки (α_p) при дуговой наплавке под флюсом в ПРМП выполняли экспериментальные наплавки на обратной и прямой полярности проволоками сплошного сечения Св-08А (аналог – RRSD10 (C10W), DIN 17145), Св-08Г2С (аналог – G3Si1, EN 440 или SG 2, DIN 8559), Нп-30ХГСА (аналог – UP (MSG) 1 – GZ (GW)-250-P, DIN 8555) (ферромагнетики) диаметром 4 мм под флюсом АН-348А (химсостав представлен в табл. 1), а также порошковой проволокой ПП-12Х13 (химсостав представлен в табл. 2) диаметром 3,6 мм под флюсом АН-26 (химсостав представлен в табл. 1), широко используемых для наплавки с целью повышения износостойкости роликов МНЛЗ. Наплавку осуществляли на пластины из малоуглеродистой стали толщиной 20 мм на режимах (устанавливаемых предварительно до воздействия ПРМП) при использовании проволоки сплошного сечения: $I_n = 500...530$ А; $U_d = 30...32$ В; при использовании порошковой проволоки: $I_n = 380...410$ А; $U_d = 28...30$ В. Скорость наплавки $V_n = 30$ м/ч сохраняли неизменной при выполнении всех наплавов. Оценку повышения коэффициента расплавления электродной проволоки α_p при воздействии ПРМП определяли через относительное уменьшение тока наплавки, а также по стандартной методике.

Таблица 1

Химический состав флюсов для дуговой сварки под флюсом

Марка флюса	Содержание, %					
	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
АН-348А	41-44	34-38	6.5	5.0-7.5	4.5	2.0
АН-26	29-33	2.5-4.0	4.0-8.0	15-18	19-23	1.5

Таблица 2

Химический состав порошковой проволоки ПП-12Х13 для дуговой сварки под флюсом

Марка проволоки	Содержание, %			
	C	Si	Mn	Cr
ПП-12Х13	0.16-0.24	0.30-0.70	0.30-0.70	12.00-14.00

Экспериментально установлено, что коэффициент расплавления электродной проволоки из ферромагнитного материала увеличивается при воздействии постоянного ПРМП на 30 %, а при воздействии ПРМП частотой 50 Гц на 22 % (рис. 2). При увеличении частоты до 4...6 Гц эффект повышения α_p снижается и несколько возрастает при дальнейшем увеличении частоты поля до 50 Гц (рис. 3). Коэффициент расплавления электрода при сварке или наплавке в ПРМП зависит от магнитных свойств проволок сплошного сечения и порошковых проволок, имеющих оболочки из ферромагнитных материалов. Радиальная компонента индукции B_r ПРМП в зоне электродной капли пропорциональна значению магнитной проницаемости μ электродных проволок. Эффект повышения α_p электрода при воздействии ПРМП пропорционален величине магнитной проницаемости μ материала электрода и связанным с этим возрастающим уровнем радиальной компоненты индукции B_r ПРМП в зоне капли. Для парамагнитной (немагнитной) проволоки Св-12Х18Н10Т (аналог AISI 321) повышение производительности процесса расплавления проволоки (α_p) при наплавке или сварке в ПРМП не наблюдается.

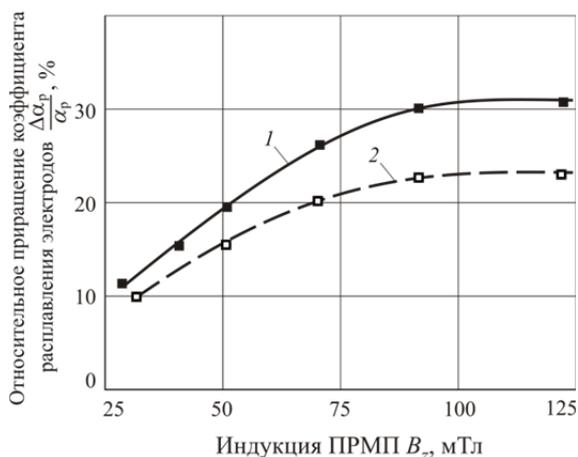


Рис. 2. Влияние продольной компоненты индукции (B_z) ПРМП на относительное приращение ($\Delta \alpha_p / \alpha_p$) коэффициента расплавления электродной проволоки Св-08А:

1 – постоянное ПРМП; 2 – ПРМП частотой $f = 50$ Гц

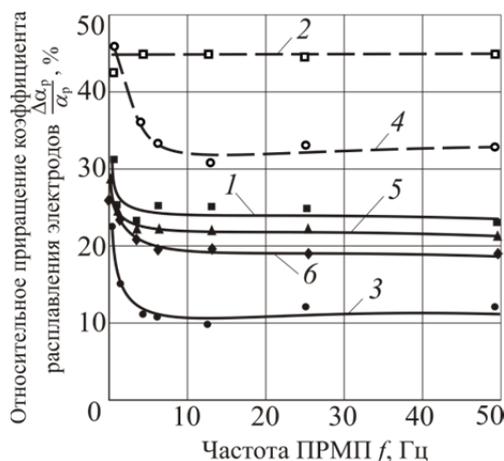


Рис. 3. Влияние частоты ПРМП на относительное приращение ($\Delta \alpha_p / \alpha_p$) коэффициента расплавления электродов:

1, 3, 5, 6 – обратная полярность; 2, 4 – прямая полярность; 1, 2 – Св-08А; 3, 4 – ПП-12Х13; 5 – Св-08Г2С; 6 – Нп-30ХГСА

Для уточнения эффективности влияния ПРМП на глубину и площадь проплавления основного металла при наплавке выполняли наплавки на постоянном токе обратной полярности проволокой Св-08А (ферромагнетик) диаметром 4 мм на пластины из малоуглеродистой стали толщиной 20 мм под флюсом АН-348А с воздействием ПРМП на режиме: $I_n = 500 \dots 550$ А, $U_d = 30 \dots 32$ В, $V_n = 27$ м/ч. Наплавку осуществляли с воздействием постоянного и знакопеременного ПРМП частотой 50 Гц. Во всех экспериментах до наплавки выполняли измерения продольной компоненты индукции B_z у поверхности этой пластины при расстоянии от плоского торца электрода до пластины 5 мм.

Результаты экспериментов при наплавке с неизменной скоростью подачи электродной проволоки представлены на рис. 4, а и 5, а. Поскольку при включении ПРМП наблюдается снижение I_n , то выполняли также наплавки, когда при воздействии ПРМП увеличивали скорость подачи проволоки, чтобы ток наплавки был таким же, как и в предыдущей серии экспериментов. Результаты представлены на рис. 4, б и 5, б. Данные о глубине H_{np} и площади F_{np} проплавления, а также доли участия основного металла в наплавленном (γ) в зависимости от индукции ПРМП в этом случае практически совпали с данными, приведенными на рис. 4, а. Уменьшение доли участия основного металла в наплавленном в 1,5-2 раза повышает эффективность использования легирующих элементов, вводимых через электродную проволоку. Установлено, что при дуговой наплавке проволокой под флюсом глубина H_{np} и площадь F_{np} проплавления основного металла существенно уменьшаются, если величина 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 материалов, так и парамагнитных (немагнитных) материалов.

Одна из причин снижения глубины проплавления основного металла – вращение дуги и переход ее в колоколообразную форму. Пятно дуги на изделии рассредоточивается, что приводит к снижению глубины проплавления основного металла и увеличению ширины шва [9]. При увеличении индукции B_z ПРМП газодинамическое давление в осевой зоне дуги уменьшается, а в направлении радиуса дуги увеличивается. Эти данные получены ранее для дуговой сварки в вольфрамовым электродом в среде аргона [10, 11]. Для дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом под флюсом влияние индукции ПРМП на форму дуги и ее газодинамическое давление будет влиять аналогично.

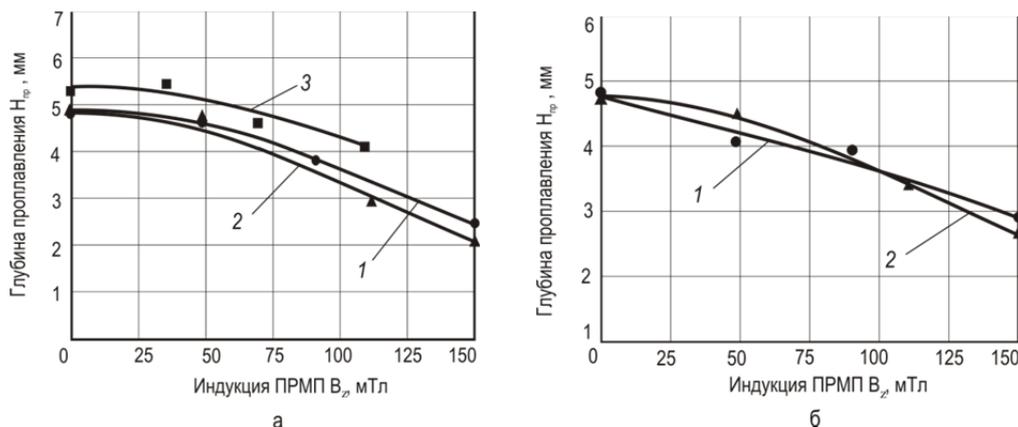


Рис. 4. Влияние индукции B_z ПРМП на параметры H_{np} :

а – $V_{нод} = const$, 1 – H_{np} : Св-08А Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2 – H_{np} : Св-08А Ø 4 мм, постоянное ПРМП; 3 – H_{np} : Св-12Х18Н10Т Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; б – $I_n = const$, 1 – H_{np} : Св-08А Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2 – H_{np}, F_{np} : Св-08А Ø 4 мм, постоянное ПРМП

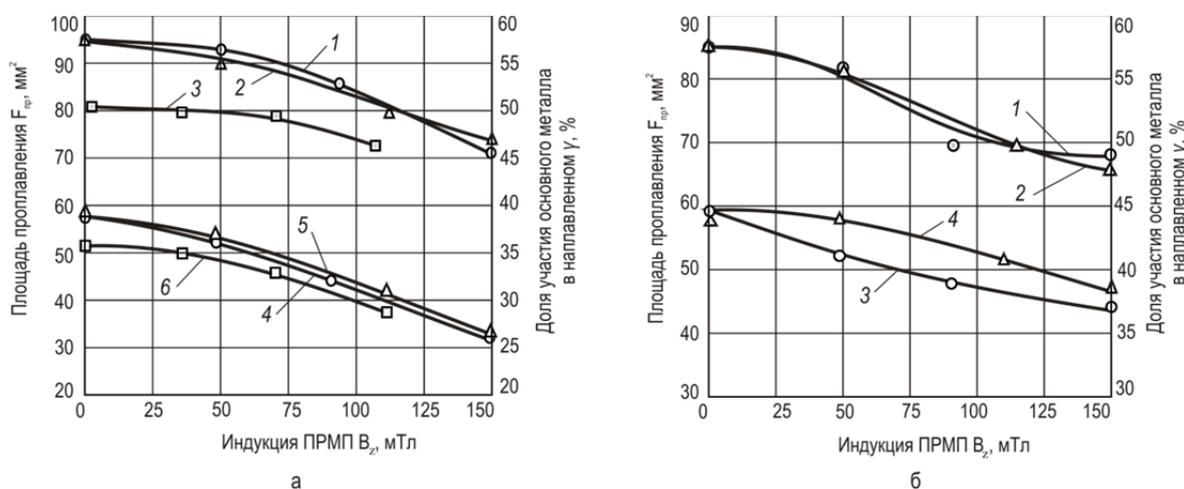


Рис. 5. Влияние индукции B_z ПРМП на параметры γ, F_{np} :

а – $V_{нод} = const$, 1, 4 – γ, F_{np} : Св-08А Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 5 – γ, F_{np} : Св-08А Ø 4 мм, постоянное ПРМП; 3, 6 – γ, F_{np} : Св-12Х18Н10Т Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; б – $I_n = const$, 1, 3 – γ, F_{np} : Св-08А Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 4 – γ, F_{np} : Св-08А Ø 4 мм, постоянное ПРМП

Экспериментальные исследования подтверждают, что при увеличении индукции B_z ПРМП очертания зоны проплавления основного металла соответствуют возрастающему давлению дуги в направлении радиуса (рис. 6), которое проявляется в снижении H_{np} в центре (по оси) валика и возрастанию H_{np} в периферийной части. Особенно это проявляется для постоянного ПРМП (рис. 6, г). Формирование такого очертания зоны проплавления обусловлено также энтальпией электродных капель, попадающих в сварочную ванну [12].

Однако было предположено, что причиной уменьшения H_{np} и F_{np} при увеличении индукции ПРМП является также тормозящее воздействие этого поля на скорость потоков жидкого металла в сварочной ванне из головной ее части в хвостовую.

Воздействие постоянного ПРМП на движущийся из головной в хвостовую часть ванны жидкий металл индуцирует в этом металле поперечное электрическое поле, как это известно из курса физики. Этот процесс приводит к возникновению силы F_m , которая тормозит поток. Рассмотренные явления в ванне близки, по сути, к явлениям, протекающим в МГД – генераторах, когда на движущийся в магнитном поле поток электропроводного материала или плазмы также действует тормозящая сила. При воздействии знакопеременного ПРМП

(в том числе и частотой 50 Гц) направление силы F_m при смене направления индукции B_z не меняется. Тормозящий эффект сохраняется и в этом случае, только тормозящая сила F_m будет пульсировать с удвоенной частотой ПРМП. Таким образом при воздействии и постоянного, и знакопеременного ПРМП тормозящая сила F_m приводит к уменьшению скорости v придонного потока металла, к увеличению толщины жидкой прослойки металла сварочной ванны под дугой и, как следствие, к уменьшению глубины и площади зоны проплавления основного металла.

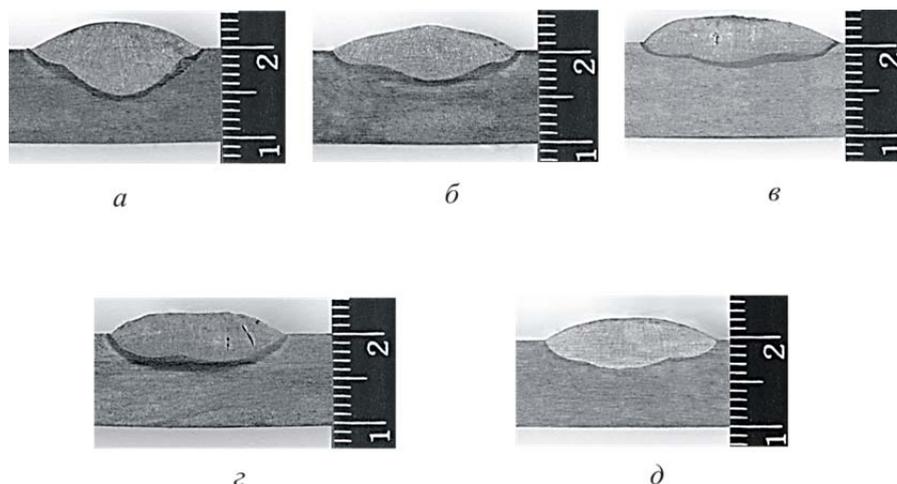


Рис. 6. Макрошлифы наплавленных валиков, выполненных при неизменной скорости подачи проволоки:

а – г – проволока Св-08А и пластина из малоуглеродистой стали ($I_n = 500...550$ А; $U_d = 30...32$ В); д – проволока и пластина из немагнитных материалов; а – наплавка без ПРМП; б – ПРМП частотой 50 Гц, $B_z = 90$ мТл; в – то же, $B_z = 150$ мТл; г – постоянное ПРМП $B_z = 111$ мТл; д – ПРМП частотой 50 Гц, $B_z = 70$ мТл

Уменьшение эффективности проплавления основного металла при наплавке с воздействием постоянного и переменного ПРМП частотой 50 Гц зависит не только от увеличения радиуса дуги и изменения распределения давления по радиусу дуги, но и от тормозящего действия этого магнитного поля на потоки жидкого металла из головной части ванны в хвостовую ее часть.

При наплавке под флюсом на прямой полярности с воздействием ПРМП глубина и площадь проплавления основного металла уменьшаются в 3 раза, а доля участия основного металла в наплавленном – в 2...2,5 раза.

Методами осциллографирования процесса дуговой наплавки было установлено, что при воздействии ПРМП как постоянного, так и переменного ПРМП частотой до 50 Гц значительно повышается его стабильность.

Разработано и изготовлено устройство для создания ПРМП и применения его при наплавке в промышленных условиях. Это устройство показало высокую работоспособность при длительной эксплуатации. На заводе в промышленных условиях внедрена технология электродуговой наплавки с использованием управляющего ПРМП изношенных деталей автотранспортной техники в виде тел вращения (роликов). Следует отметить, что процесс дуговой наплавки проволокой под флюсом является энергосберегающим процессом. При этом экономия электрической энергии на наплавку составляет 30...50 %, а производительность процесса наплавки повышается приблизительно на 25...40%. Процесс наплавки с воздействием ПРМП является и ресурсосберегающим процессом, т. е. позволяет значительно сэкономить легирующие элементы в наплавленном металле. Применение ПРМП целесообразно при наплавке как восстановительной, так и упрочнительной.

ВЫВОДЫ

Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом существенно повышается при воздействии ПРМП. Увеличение коэффициента расплавления электродной проволоки происходит при воздействии постоянного ПРМП, а также в меньшей степени при ПРМП частотой 50 Гц при наплавке ферромагнитной проволокой на изделия из ферромагнитных и немагнитных сталей. Эффект повышения α_p проволоки максимален при применении постоянного ПРМП, снижаясь при увеличении частоты ПРМП до 4...6 Гц и слабо возрастает при дальнейшем увеличении частоты поля до 50 Гц.

При наплавке проволоками из немагнитных материалов повышения коэффициента расплавления не наблюдается.

При наплавке плавящимся электродом сохраняются тенденции по влиянию ПРМП на характер распределения газодинамического давления дуги вдоль радиуса, установленные для процесса сварки вольфрамовым электродом в аргоне. Газодинамическое давление дуги вдоль ее радиуса при воздействии ПРМП в осевой зоне дуги уменьшается, а в направлении радиуса увеличивается, проходя через максимум.

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

Снижение глубины и площади проплавления основного металла в 2...2,5 раза, а доли участия основного металла в наплавленном в 1,3 раза при наплавке с воздействием ПРМП при величине индукции $B_z > 50...60$ мТл объясняется не только снижением давления дуги при действии постоянного и переменного ПРМП частотой 50 Гц, но и торможением осевого потока жидкого металла в ванне и ухудшением условий передачи тепла дуги основному металлу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке / А. Д. Размышляев. – Мариуполь : ПГТУ, 2000. – 245 с.
2. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. – Киев : Техника, 1983. – 127 с.
3. Villafuerte J. C. Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds / J. C. Villafuerte, H. W. Kerr // *Welding journal*. – 1990. – Vol. 69, № 1. – P. 1–13.
4. Malinowski-Brodnicka M. Effect of electromagnetic Stirring on GTA welds in austenitic stainless steel / M. Malinowski-Brodnicka, G. den Ouden, W. J. P. Vink // *Welding journal*. – 1990. – Vol. 69, № 2. – P. 52–59.
5. Болдырев А. М. Повышение производительности расплавления электродной проволоки при сварке в продольном магнитном поле / А. М. Болдырев, В. А. Биржев, А. В. Черных // *Сварочное производство*. – 1989. – № 4. – С. 18–19.
6. Болдырев А. М. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля / А. М. Болдырев, В. А. Биржев, А. В. Черных // *Сварочное производство*. – 1993. – № 6. – С. 30–31.
7. Y. H. Kang, S.J. Na. Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation // *The Welding Journal*. – 2003. – Vol. 82, № 5. – P. 93–99.
8. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием валиков и швов при дуговой наплавке и сварке : Монография / А. Д. Размышляев, М. В. Миронова. – Мариуполь : ПГТУ, 2009. – 243 с.
9. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка [и др.] // *Сварочное производство*. – 1972. – № 4. – С. 3–4.
10. О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке / В. Н. Селяненок, В. А. Блинков, Ю. В. Казаков [и др.] // *Сварочное производство*. – 1975. – № 11. – С. 5–7.
11. Lin M. L. Influence of arc pressure on weld pool geometry / M. L. Lin, T. W. Eagar // *Welding Journal*. – 1985. – Vol. 64, № 6. – P. 163–169.
12. Cao Z. Three-Dimensional Simulation of Transient GMA Weld Pool with Free Surface / Z. Cao, Z. Yang, X. L. Chen // *The Welding Journal*. – 2004. – Vol. 83, № 6. – P. 169–176.