



ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ

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

Уточнены причины повышения производительности процесса расплавления электрода при дуговой наплавке под флюсом на токе обратной полярности в продольном магнитном поле (ПРМП). Показано, что эффект увеличения коэффициента расплавления электродной проволоки зависит от ее магнитных свойств и проявляется не только для постоянного ПРМП, но и для знакопеременного частотой 50 Гц.

Ключевые слова: дуговая наплавка, продольное магнитное поле, капля электродного металла, коэффициент расплавления электрода, магнитные свойства, ферромагнетика

В работах [1, 2] показано, что при дуговой сварке под флюсом в постоянном продольном магнитном поле (ПРМП) коэффициент расплавления электродной проволоки α_p при прямой полярности процесса повышается на 50, при обратной — на 30, при сварке на переменном токе — на 40 %. Установлено также [2], что переменное ПРМП с частотой 50 Гц не влияет на α_p проволоки вследствие высокой инерционности расплава капли на торце электрода. Обнаруженные особенности наблюдали при использовании ферромагнитных электродных проволок Св-08А диаметром 3...5 мм.

Повышение α_p проволоки в процессе сварки при воздействии постоянного ПРМП в работах [2, 3] объясняют тем, что капля в этом случае вращается под действием электромагнитных сил, при этом уменьшается ее толщина в направлении оси электрода и время существования, что улучшает условия теплопередачи через каплю.

Представления о том, что при воздействии ПРМП капля вращается (или может вращаться), подтверждают расчеты электромагнитных сил, выполненные в работе [4], а также данные кинограмм поведения капли при сварке в аргоне немагнитной проволокой ЭИ-395 с воздействием ПРМП [5].

В работах [1–4] вращение капли при воздействии ПРМП объясняют действием объемных электромагнитных сил, вектор которых в каждом элементарном объеме капли направлен по касательной, т. е. азимутально. При этом полагают, что электромагнитные силы в капле возникают от взаимодействия осевой составляющей индукции ПРМП с радиальной компонентой плотности тока

в капле. В работе [3] принято допущение, что на радиальную составляющую плотности тока в капле приходится половина полной плотности тока в капле, которое, на наш взгляд, не является обоснованным по следующим причинам.

Данные о размере капель на торце электрода, плавящегося дугой под флюсом, которые приведены в работе [6], получены рентгено съемкой процесса сварки под флюсом и только их следует признавать достоверными. По этим данным для обратной полярности процесса сварки масса капли (в диапазоне токов сварки 500...750 А, в котором осуществляли наплавки под флюсом) не превышает 0,28 г. Тогда объем капли (в виде шара при плотности жидкого металла 7,0 г/см³) составит 0,04 см³, а ее диаметр $d_k = 4,3$ мм, т. е. диаметр капли меньше диаметра электрода $d_k < d_s$ (в работе [6] электрод по площади сечения соответствовал диаметру 5,3 мм). При указанных соотношениях диаметров капли и электрода можно полагать, что активное пятно дуги полностью охватывает каплю. В наших исследованиях наплавку осуществляли проволоками диаметрами 5 и 4 мм, поэтому можно принять, что указанное соотношение $d_k < d_s$ также выполнялось.

В работе [7] путем моделирования процесса методом RR сеток было установлено, что радиальная плотность тока в капле незначительна даже при условии, что пятно дуги полностью охватывает каплю.

При воздействии ПРМП вращающаяся капля не может иметь форму, отличную от эллипсоидной, вследствие неустойчивости других форм ее поверхности [8, 9], что также принято в работе [3]. Маловероятным представляется предположение о том, что при воздействии ПРМП активное пятно дуги размещается на участках жидкой капли, расположенных вне диаметра электрода (что привело бы к увеличению радиальной составляющей плотности тока в капле). Наиболее вероятным представляется, что как в обычном про-

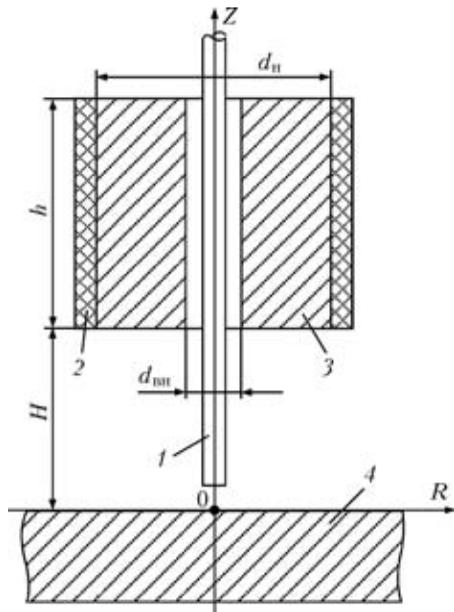


Рис. 1. Схема системы тел для расчета распределения индукции магнитного поля: 1 — электродная проволока; 2 — обмотка соленоида; 3 — сердечник соленоида; 4 — изделие (пластина)

цессе дуговой сварки, так и в процессе сварки с воздействием ПРМП радиальная составляющая плотности тока в капле значительно меньше ее осевой составляющей.

По методике, изложенной в работах [10, 11], выполнены расчеты индукции ПРМП в немагнитном зазоре ($\Delta = 5$ мм) между торцом электродной проволоки и изделием (рис. 1). Принято, что капля, расположенная в этом зазоре (пространстве), при плавлении проволок из ферромагнитных материалов является немагнитной ($\mu = 1$), температура нагрева проволоки на вылете (рис. 1) ниже точки Кюри. Проволока является ферромагнитной с постоянным значением μ (принято, что $\mu = 500$), а длина участка вылета проволоки, примыкающего к капле и нагретого выше точки Кюри, как показали расчеты, не превышала 1 мм. В расчетах принято также значение $\mu = 500$ для ферромагнитного сердечника 3 и для изделия 4, если оно является ферромагнетиком.

Расчеты показали, что при наплавке в ПРМП электродными проволоками из магнитных материалов (например, проволокой Св-08А) на пластины из магнитных и немагнитных материалов в дуговом промежутке (в зоне у торца электрода) радиальная компонента индукции B_r достигает значения 0,3...0,5 по отношению к продольной B_z (рис. 2). В связи с этим можно предположить, что электромагнитные силы в капле, обуславливающие ее вращение, возникают вследствие взаимодействия осевой плотности тока в капле (а не радиальной) с радиальной составляющей индукции B_r ПРМП. При наплавке немагнитной проволокой ($\mu = 1$) на изделие из ферромагнитных

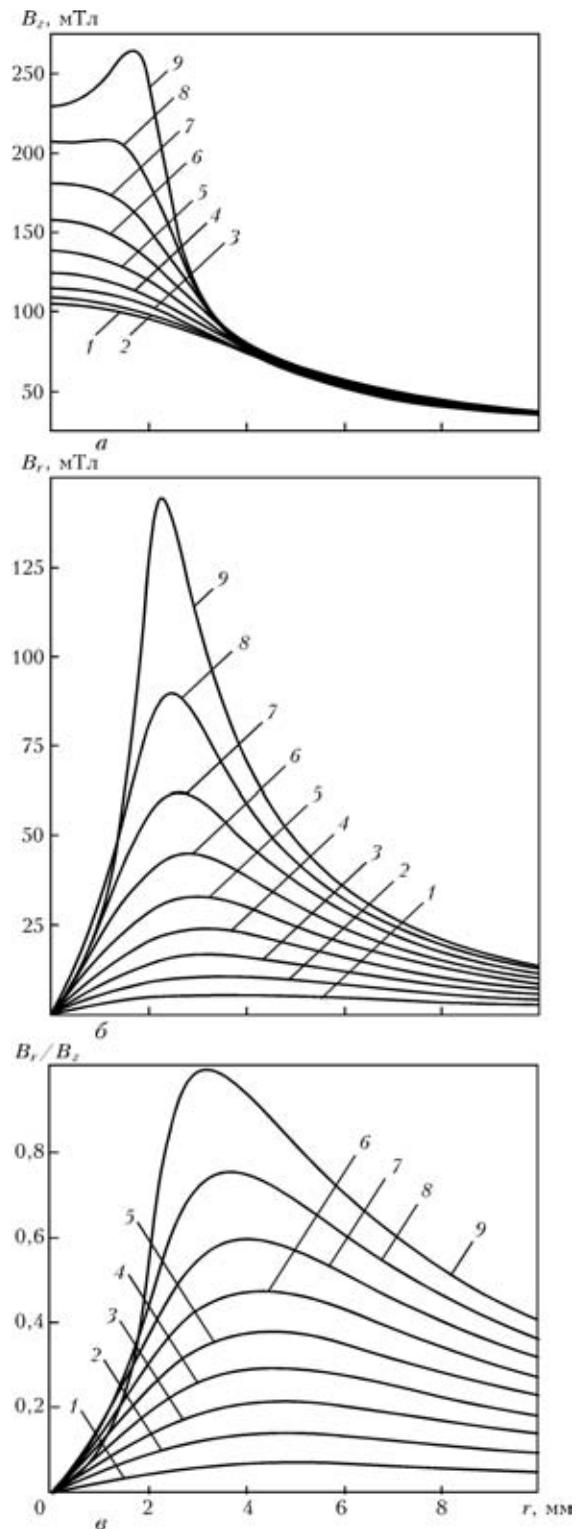


Рис. 2. Распределение компонент индукции B_z (а), B_r (б) и отношения B_r/B_z (в) вдоль оси r (последовательно при различных Z) для случая, когда проволока и изделие — ферромагнетики ($\mu = 500$): 1-9 — $Z = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5$ мм; $I_w = 2000$ А

материалов радиальная компонента индукции B_r в зоне капли пренебрежимо мала (рис. 3), поэтому электромагнитная сила будет также незначительной, и ожидаемый эффект повышения α_p электрода будет также незначительным.



Настоящая работа посвящена уточнению механизма, обуславливающего вращение капли на торце электрода и повышению α_p электрода при воздействии ПРМП в процессе наплавки постоянным током обратной полярности под флюсом.

Поскольку увеличение коэффициента расплавления электрода α_p при воздействии ПРМП адекватно уменьшению тока наплавки, то в данной работе уровень повышения α_p оценивали через относительное уменьшение тока наплавки ΔI_n , т. е. как $\Delta I_n / I_n$ (I_n — ток наплавки после включения ПРМП).

Экспериментальные наплавки выполняли автоматом АДС-1002 с независимой от напряжения дуги скоростью подачи электрода от выпрямителя ВДУ-1201 с падающей внешней характеристикой на токе обратной полярности под флюсом АН-348А. При наплавке выполняли запись параметров режима наплавки I_n , U_d самопишущими приборами типа НЗ90. Во всех экспериментах параметры режима наплавки без воздействия ПРМП, установленные предварительно по стрелочным приборам, составляли для $d_3 = 4$ мм: $I_n = 500 \dots 520$ А; $U_d = 28 \dots 30$ В; для $d_3 = 5$ мм: $I_n = 700 \dots 750$ А; $U_d = 30 \dots 32$ В, скорость наплавки $v_n = 30$ м/ч. Во всех экспериментах измеренная продольная компонента индукции составляла $B_z = 70 \dots 85$ мТл, расстояние от торца электрода до поверхности пластины $\Delta = 5$ мм, для $d_3 = 5$ мм вылет электрода $H = 40$ мм, для $d_3 = 4$ мм $H = 35$ мм. Нижний торец соленоида, генерировавшего ПРМП, находился также на указанном расстоянии от наплавляемой пластины (соответственно 40 и 35 мм). По истечении 20...30 с процесса наплавки включали постоянное либо знакопеременное ПРМП частотой 50 Гц и продолжали процесс наплавки с записью параметров режима наплавки (I_n , U_d) в течение 20...30 с. На каждом режиме выполняли по 5...10 наплавов. Усредненные экспериментальные данные приведены в таблице.

В серии экспериментов № 1 выполняли наплавки проволокой Св-08А (ферромагнитный материал) диаметром 4 мм на пластину толщиной

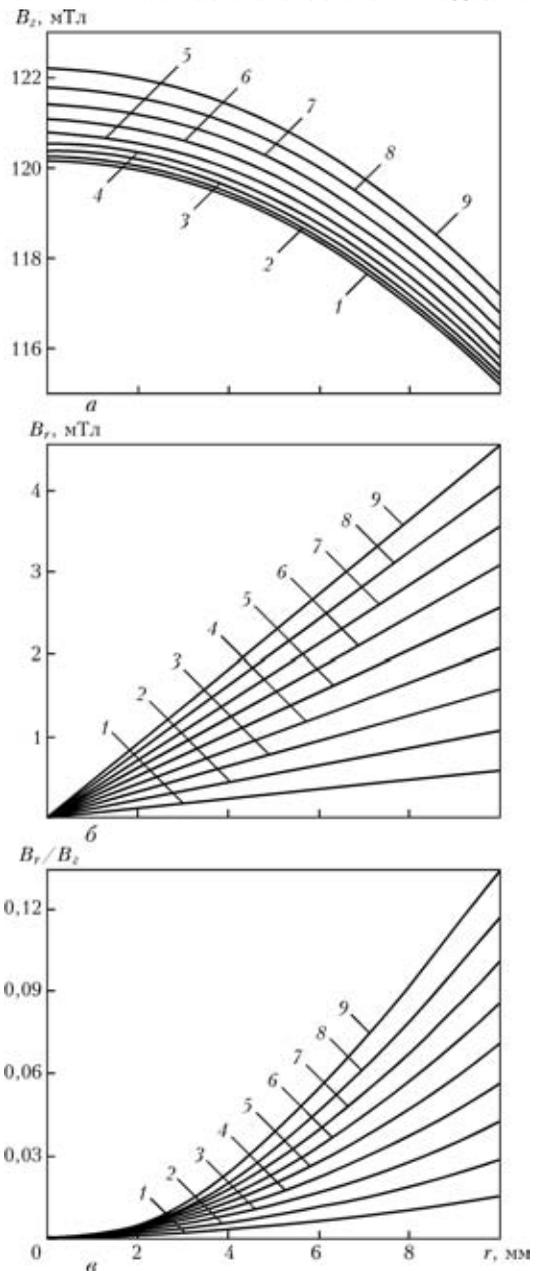


Рис. 3. Распределение компонент индукции B_z (а), B_r (б) и отношения B_r/B_z (в) вдоль оси r (последовательно при различных Z) для случая, когда проволока немагнитная ($\mu = 1$), а изделие — ферромагнетик ($\mu = 500$); обозначение кривых 1–9 см. на рис. 2

Условия выполнения экспериментальных наплавов с различным коэффициентом расплавления электрода

Номер серии эксперимента	Диаметр проволоки, мм	Сварочная проволока	Основной металл	Частота ПРМП, Гц	Повышение α_p , %
1	4	Св-08А	09Г2С	Постоянная ПРМП	30,3
2	4	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	» »	0
3	4	Св-08А	12Х18Н10Т	» »	34,5
4	4	Св-08А	09Г2С	50	22
5	4	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	50	0
6	5	Св-08А	09Г2С	Постоянная ПРМП	32
7	5	Св-08А	09Г2С	50	18,1
8	5	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	Постоянная ПРМП	0

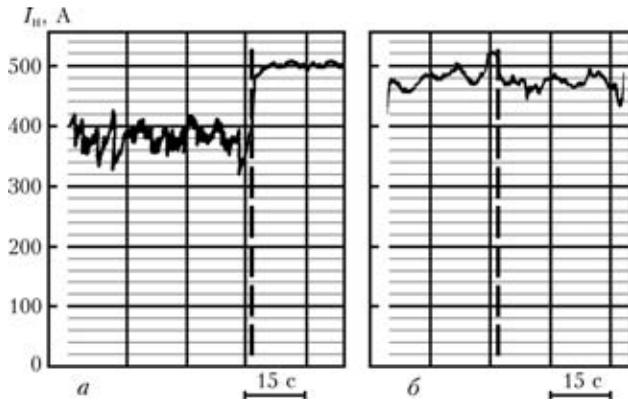


Рис. 4. Диаграммы тока при дуговой наплавке под флюсом ферромагнитной проволокой Св-08А (а) и немагнитной проволокой Св-12Х18Н10Т (б): участки справа — наплавка без воздействия ПРМП; слева — с воздействием ПРМП

20 мм из стали 09Г2С (также ферромагнитный материал). При включении постоянного ПРМП происходило уменьшение тока наплавки I_n (рис. 4, а) и увеличение напряжения на дуге U_d . Данные показали, что уменьшение $\Delta I_n / I_n$ (а следовательно, и повышение α_p) в этом случае составляет 30,3 %, что соответствует данным работ [1, 2].

При наплавке с использованием немагнитной проволоки Св-12Х18Н10Т диаметром 4 мм (серия № 2, таблица) включение постоянного ПРМП не привело к уменьшению тока наплавки, т. е. $\Delta I_n = 0$ (рис. 4, б), и повышение α_p электрода не происходило.

При наплавке с использованием проволоки Св-08А диаметром 4 мм на пластину из немагнитной стали 12Х18Н10Т (серия № 3, таблица) при включении постоянного ПРМП происходило уменьшение $\Delta I_n / I_n$ на 34,5 % (а следовательно, увеличение α_p). Эффект повышения α_p электрода при воздействии ПРМП в этом случае не меньше, чем в серии № 2 экспериментов, поскольку соотношение компонент индукции B_r / B_z (рис. 5) не меньше, чем для случая, когда изделие изготовлено из ферромагнитной стали (см. рис. 2).

Эксперименты показывают, что если сварочная проволока из немагнитного материала и компонента B_r индукции ПРМП в зоне расположения электродной капли равна нулю, то при воздействии ПРМП эффекта повышения α_p электрода не наблюдается. При плавлении электрода из ферромагнитного материала, когда компонента B_r индукции ПРМП значительна, происходит увеличение α_p электрода. Таким образом, подтверждается высказанное предположение о том, что вращение капли на торце плавящегося электрода в условиях ПРМП (а следовательно, улучшение условий передачи тепла дуги через каплю и повышение α_p) происходит под действием электромагнитных сил в капле от взаимодействия радиальной составляющей индукции ПРМП (в капле) с осевой (вдоль

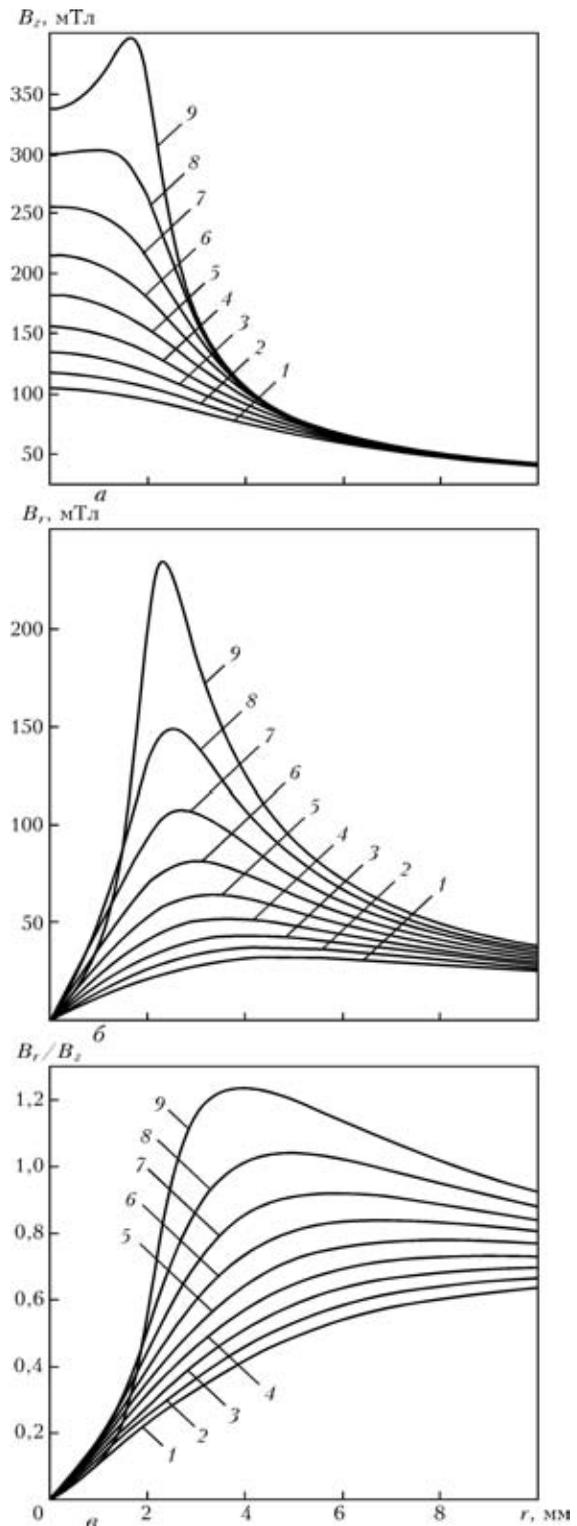


Рис. 5. Распределение компонент индукции B_z (а), B_r (б) и отношения B_r / B_z (в) вдоль оси r (последно при различных Z) для случая, когда проволока — ферромагнетик ($\mu = 500$), а изделие из немагнитного материала ($\mu = 1$); обозначение кривых 1–9 см. на рис. 2; $I_w = 2700$ А

оси электрода) составляющей плотности тока, растекающегося в капле.

Наплавки выполняли проволокой Св-08А диаметром 4 мм на пластину из стали 09Г2С с воздействием ПРМП частотой 50 Гц ($B_r = 85 \dots 89$ мТл).



В этом случае также имело место уменьшение тока наплавки (22 %, серия № 4, таблица), а при наплавке проволокой Св-12Х18Н10Т диаметром 4 мм на сталь 09Г2С при воздействии ПРМП частотой 50 Гц изменений $I_n(\alpha_p)$ не произошло (серия № 5, таблица). Аналогичные эффекты наблюдали и при наплавке проволокой диаметром 5 мм (серии № 6–8, таблица).

Таким образом, в процессе дуговой наплавки постоянным током под флюсом при воздействии постоянного ПРМП происходит уменьшение толщины капли в направлении оси электрода, улучшение условий теплопередачи через каплю, обусловленное вращением капли под действием электромагнитных сил от взаимодействия радиальной компоненты индукции ПРМП с осевой компонентой плотности тока в капле. В этом состоит отличие результатов настоящей работы от данных работ [2, 3], в которых полагали, что электромагнитные силы при наплавке в условиях постоянного ПРМП образуются от взаимодействия продольной компоненты индукции ПРМП с радиальной плотностью тока в капле. Установлено, что в отличие от данных, приведенных в работе [2], знакопеременное ПРМП частотой 50 Гц также повышает α_p электрода диаметром 4 и 5 мм, однако в меньшей степени, чем постоянное ПРМП. Кроме того, эффект повышения α_p электрода зависит от магнитной проницаемости материала электрода и можно полагать, что при воздействии ПРМП будет пропорционален увеличению значения μ электрода.

Необходимо также исследовать эффект возрастания α_p при воздействии знакопеременного ПРМП частотой до 50 Гц. Аналогичные исследования необходимо выполнить и для прямой полярности процесса наплавки под флюсом с воздействием ПРМП.

Выводы

1. Применение электродной проволоки из ферромагнитного материала приводит к значительной радиальной компоненте индукции в капле, что обуславливает искажение структуры магнитного поля в области под торцом электрода. При использовании электродов из немагнитных материалов радиальная компонента индукции ПРМП B_r незначительная.

2. Вращение капель электродного металла на торце электрода при дуговой сварке и наплавке с воздействием ПРМП и связанное с этим увеличение α_p электрода обусловлено электромагнит-

ными силами в жидком металле капли от взаимодействия радиальной (а не продольной) компоненты индукции ПРМП с осевой (а не радиальной) компонентой плотности сварочного тока в капле.

3. Увеличение коэффициента расплавления электрода происходит при воздействии постоянного ПРМП, а также ПРМП частотой 50 Гц при наплавке ферромагнитной проволокой на изделия из ферромагнитных и немагнитных материалов. При наплавке в ПРМП проволоками из немагнитных материалов увеличение коэффициента расплавления электрода не наблюдается.

1. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Повышение производительности расплавления электродной проволоки при сварке в продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1989. — № 4. — С. 18–19.
2. Биржев В. А. Теоретические и технологические основы повышения производительности дуговой сварки и наплавки во внешнем аксиальном магнитном поле: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Липецк, 1997. — 37 с.
3. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Особенности плавания электродного металла при сварке во внешнем продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1991. — № 5. — С. 28–30.
4. Пацкевич И. Р., Зернов А. В., Серафимов В. С. Влияние продольного магнитного поля на плавление и перенос электродного металла // Там же. — 1973. — № 7. — С. 8–10.
5. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка и др. // Там же. — 1972. — № 4. — С. 3–4.
6. Походня И. К., Костенко Б. А. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1965. — № 10. — С. 16–22.
7. Воропай Н. М., Колесниченко А. Ф., Лунькова О. Н. Электромагнитные силы в каплях при оплавлении цилиндрического электрода дугой // Техн. электродинамика. — 1982. — № 6. — С. 11–15.
8. Численный метод определения свободной поверхности капель электродного металла при его переносе в магнитном поле сварочных дуг / А. Ф. Колесниченко, Н. М. Воропай, О. Н. Лунькова и др. // Магн. гидродинамика. — 1977. — № 3. — С. 121–126.
9. Березовский Б. М., Судник В. А. Математическое моделирование образования капли на торце плавящегося электрода при дуговой сварке // Сварка — контроль. Итоги XX века: Материалы 19-й науч.-техн. конф. Сварщиков Урала. — Челябинск: ЗАО «МТ», 2000. — С. 24–27.
10. Лазаренко М. А., Размышляев А. Д., Чичкарев Е. А. Расчет на ЭВМ управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. — 1999. — Вып. 8. — С. 147–150.
11. Размышляев А. Д., Дели А. А., Миронова М. В. Расчет индукции управляющего продольного магнитного поля с учетом магнитных свойств сердечника, проволоки и изделия применительно к дуговой наплавке // Автомат. сварка. — 2006. — № 8. — С. 12–15.

Causes of increase in productivity of the process of electrode melting in submerged-arc cladding at a reverse-polarity current in the longitudinal magnetic field (LMF) were checked. It is shown that the effect of increase in the coefficient of melting of electrode wire depends upon its magnetic properties and shows up not only in the case of permanent LMF, but also in the case of the alternating one at a frequency of 50 Hz.

Поступила в редакцию 01.11.2006