



УДК 621.791.927.5

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ

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

Экспериментально с использованием метода разрезного анода показано, что при увеличении индукции продольного магнитного поля в зоне дуги диаметр активного (анодного) пятна на изделии уменьшается, а распределение плотности тока по радиусу его равномернее, чем при сварке без продольного магнитного поля. Методом зонда показано, что при воздействии магнитного поля газодинамическое давление в центре дуги снижается.

Ключевые слова: ТИГ-сварка, неплавящийся электрод, продольное магнитное поле, анодное пятно дуги, плотность тока, газодинамическое давление дуги

Использование продольного магнитного поля (ПРМП) расширяет технологические возможности дуговой сварки неплавящимся электродом в аргоне и электродной проволокой под флюсом [1–3]. При этом, кроме измельчения структурных составляющих металла шва, улучшается его формирование, изменяются размеры сварочной ванны (длина, ширина, глубина), определяемые в значительной степени диаметром активного пятна дуги на изделии и распределением по нему плотности тока и давления дуги.

Наиболее прост для изучения процесс дуговой сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом в аргоне. Однако даже для этого процесса и без использования ПРМП указанные характеристики дуги изучены неполно и зачастую данные о них противоречивы. Например, по данным работ [4–7] плотность тока в анодном пятне дуги на изделии убывает вдоль радиуса пятна по закону, близкому к нормальному, а в центре имеет максимальные значения порядка $5 \dots 100 \text{ А/мм}^2$ для сварочного тока порядка $100 \dots 200 \text{ А}$. По данным работы [8] плотность тока по активному пятну дуги на изделии распределена практически равномерно и составляет примерно $3 \dots 5 \text{ А/мм}^2$. И только в работе [9] было показано, что при наложении на дугу постоянного ПРМП значение плотности тока в центре пятна дуги на изделии несколько уменьшается (от 5 до $4,2 \text{ А/мм}^2$ при индукции 20 мТл и до $3,4 \text{ А/мм}^2$ при индукции 50 мТл).

При наложении на такую дугу постоянного и пульсирующего ПРМП давление ее по оси дуги уменьшается, если индукция в зоне дуги не превышает 30 мТл [10, 11], а при значительных ин-

дукциях ПРМП (порядка 80 мТл) по оси дуги образуется вакуум [3]. Это связано, как показано в работе [12], с вращением дуги вокруг продольной оси и переходом ее в колоколообразную (конусную) форму. Данные работ [10, 11], имеющие принципиальное значение, которые получены методом стробирующего отверстия, требуют более подробного изучения и уточнения с использованием других методов исследования, в частности, метода введения в дугу зонда [13], позволяющего за одно измерение получить распределение газодинамической составляющей давления дуги (скоростного напора) и соответственно скорости плазменного потока в определенном сечении дуги. Как показано в работе [14], именно газодинамическое (некоторые авторы называют его газокинетическим) давление аргоновой дуги, которое значительно больше, чем магнитостатическое, а также скорость плазменных потоков, связанная с этим давлением, являются важными факторами, определяющими глубину и форму швов.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния ПРМП на такие характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне, как диаметр анодного пятна дуги на изделии и распределение плотности тока по этому пятну, а также распределение давления в поперечном сечении дуги.

Во всех экспериментах сварку выполняли на прямой полярности электродом марки ВЛ диаметром 4 мм. Для обеспечения минимального проплавления основного металла угол заточки электрода составлял 90° (без притупления). В качестве источника питания использовали выпрямитель типа ВСЖ-303. Для создания падающей характеристики сварочного поста и регулирования сварочного тока применяли балластные резисторы типа РБ-301. Для защиты дуги использовали аргон марки А (ГОСТ 10157–73), расход которого составлял $5 \dots 7 \text{ л/мин}$. На конце сварочной горелки соосно с электродом устанавливали со-

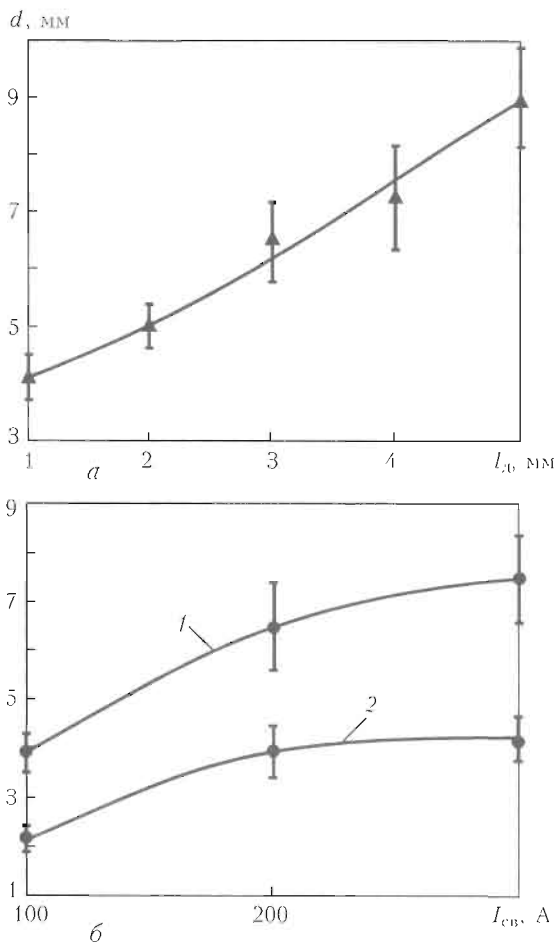


Рис. 1. Зависимость диаметра активного пятна на изделии от расстояния между электродами (а) и тока сварки (б) при $l_d = 3$ (1) и 1 (2) мм

леноид с сердечником из низкоуглеродистой стали. Обмотка соленоида имела 104 витка медного провода диаметром 2,0 мм. Диаметр анодного пятна на изделии и распределение плотности тока вдоль радиуса пятна определяли с помощью метода разрезного анода, схемы и описание которого приведены в работах [5–8]. В качестве анода использовали две медные пластины толщиной 6 мм с зазором между ними 0,2 мм. Ток через каждую из этих пластин, напряжение дуги, ток в катушке соленоида записывали осциллографом типа К-115. Скорость протяжки бумаги осциллографа составляла 250 мм/с (иногда 125 мм/с). При записи тока через пластины разрезного анода и обработке осциллограмм использовали рекомендации, приведенные в работах [4, 8].

Следует отметить, что, как и в работе [8], иногда наблюдалась задержка активного пятна дуги на первой пластине при переходе через зазор. При этом некоторая часть тока замыкалась через вторую пластину раньше, чем на нее переходило активное пятно дуги. Эти явления имели случайный характер, т. е. в большей части экспериментов оно не наблюдалось. В связи с этим при выполнении каждого эксперимента момент перехода ду-

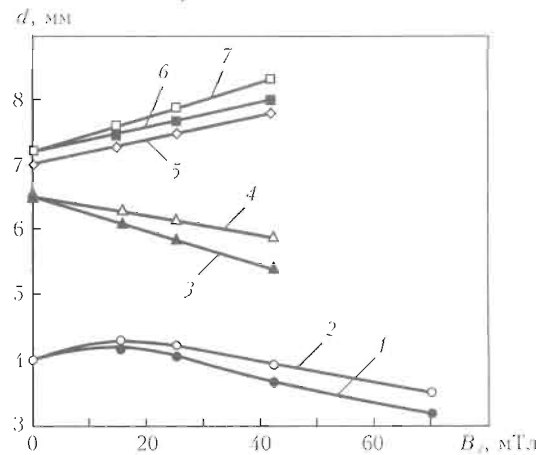


Рис. 2. Влияние индукции ПРМП на диаметр пятна дуги на изделии и диаметр давления дуги: 1, 2 — соответственно постоянное и переменное частотой 50 Гц ПРМП при $l_d = 1$; 3, 4 — то же, что 1, 2, но при $l_d = 3$ мм; 5 — максимальный диаметр столба дуги при $l_d = 3$ мм; 6, 7 — диаметр давления дуги соответственно для постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП при $l_d = 3$ мм

ги через зазор между пластинами записывали видеокамерой «Panasonic» с частотой 50 кадров/с. Осциллограммы, при снятии которых было явно выражено указанное явление, отбраковывались (не учитывались). В итоге это потребовало выполнения не менее 5...7 экспериментов на каждом режиме и этим обусловлен определенный разброс полученных данных (рис. 1).

В соответствии с рекомендациями работы [4] условный диаметр анодного пятна дуги определяли по площади, через которую протекает 95 % тока дуги. Установлено, что при сварке без ПРМП увеличение расстояния между электродами l_d приводит к росту диаметра анодного пятна (рис. 1, а) и аналогично этот диаметр возрастает при увеличении сварочного тока (рис. 1, б). При наложении на дугу постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП при расстоянии между электродами 1 мм осевая компонента индукции возрастает до 15...20 мТл, что приводит к некоторому увеличению диаметра анодного пятна дуги на изделии (рис. 2, кривые 1, 2), при дальнейшем увеличении индукции B_z диаметр несколько уменьшается. При этом постоянное ПРМП дает больший эффект, чем ПРМП частотой 50 Гц. Если расстояние между электродами составляет 3 мм, то увеличение индукции ПРМП приводит к монотонному незначительному уменьшению диаметра этого пятна (рис. 2, кривые 3, 4). При увеличении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП по данным видеосъемки (с частотой 50 кадров/с) максимальный диаметр столба дуги, наблюдаемый на расстоянии 1...1,5 мм от поверхности пластины (анода), при $l_d = 3$ мм несколько увеличивается (рис. 2, кривая 5).

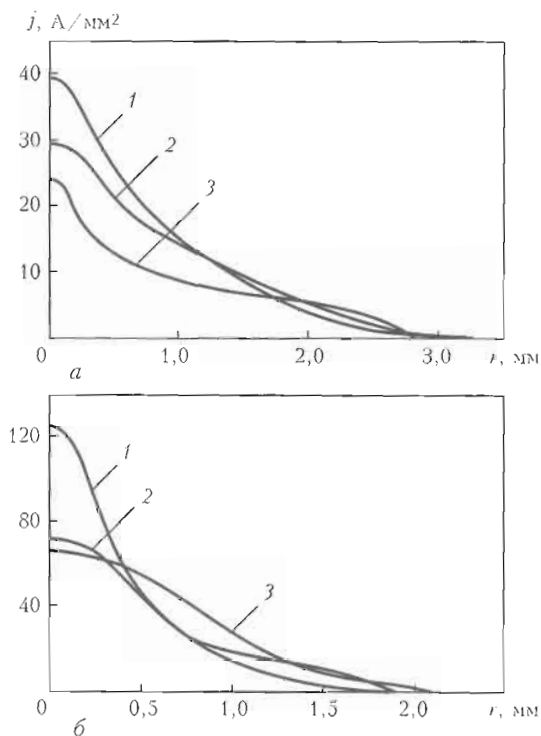


Рис. 3. Распределение плотности тока вдоль оси r при расстоянии между электродами $l_1 = 3$ (а) и 1 (б) мм без воздействия ПРМП (1), с воздействием постоянного ПРМП и $B_z = 25$ мТл (2) и с воздействием частотой 50 Гц ПРМП и $B_z = 25$ мТл (3)

Распределение плотности тока по пятну дуги на изделии получали обработкой осциллограмм по методике, изложенной в работах [5, 6] (с использованием преобразования Абея). При этом осциллограммы сканировали, их увеличенное изображение обрабатывали на компьютере и вычисляли радиальное распределение плотности тока в пятне дуги по специально разработанной программе. При увеличении индукции постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП плотность тока в центре анодного пятна существенно уменьшается, а распределение плотности тока по радиусу пятна равномернее, чем при сварке без ПРМП. В периферийной части анодного пятна плотность тока при воздействии ПРМП больше, чем без его воздействия (рис. 3). Для более короткой дуги ($l_d = 1$ мм) отмеченные изменения в распределении плотности тока значительнее, чем для более длинной дуги ($l_d = 3$ мм). При воздействии ПРМП центр анодного пятна дуги не свободен от носителей электричества (электронов), как это можно было бы предположить, учитывая форму и поведение дуги в ПРМП [12], а также наличие вакуума в осевой области ее столба при значительных индукциях ПРМП [3,11]. При наложении на дугу ПРМП с частотой в пределах 1...12,5 Гц диаметр анодного пятна имел промежуточные значения относительно наблюдаемых при постоянном ПРМП и при частоте его 50 Гц, приведенных на рис. 2. Аналогично это

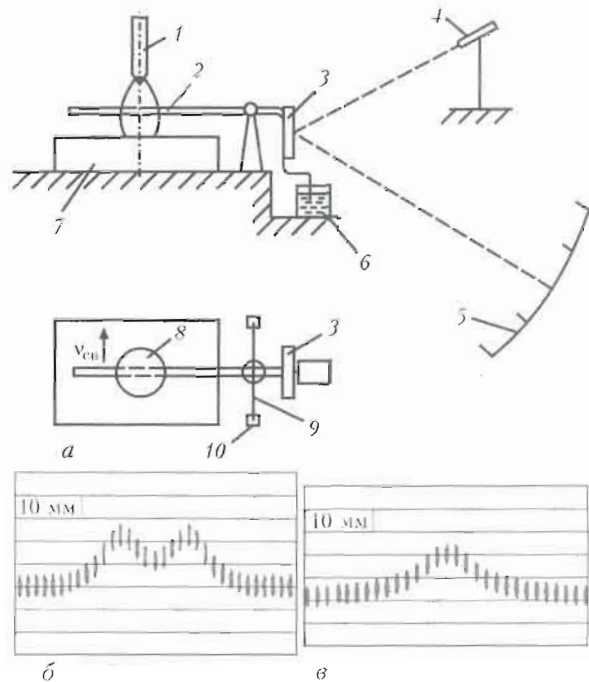


Рис. 4. Схема устройства для измерения силового воздействия дуги (а) и изображение отклонения луча на экране при $B_z = 42$ (б) и 0 (в) мТл: 1 — электрод; 2 — зонд; 3 — зеркало; 4 — лазерная указка; 5 — экран; 6 — демпфирующее устройство; 7 — изделие; 8 — дуга; 9 — струна; 10 — опоры

наблюдалось в центре анодного пятна и на кривых для распределения плотности тока.

Для изучения распределения газодинамической составляющей давления дуги (скоростного напора плазмы) по радиусу сечения, перпендикулярного оси дуги, а также диаметра этого сечения (диаметра давления) применяли методику, аналогичную изложенной в работе [13]. Датчиком давления являлся цилиндрический зонд из термостойкого немагнитного материала. Схема измерительного устройства* приведена на рис. 4, а. Зонд 2 жестко крепили к упругой струне 9 диаметром 0,4 мм (перпендикулярно). Струну с натягом закрепляли на опорах 10. При действии давления дуги на зонд 2 струна 9 закручивалась и луч, направленный от лазерной указки 4, отражался от легкого зеркальца 3 и попадал на экран 5, который для усиления чувствительности устройства устанавливали на значительном расстоянии (порядка 2 м) от зеркальца 3. Для исключения колебаний зонда 2 при воздействии дуги в установке предусмотрено демпфирующее устройство б. Процесс отклонения луча (изображение на экране) при прохождении дугой 8 зонда 2 снимали видеокамерой (с частотой 50 кадров/с).

Были опробованы зонды диаметром 1,5 мм из вольфрама, кварца и графита. При сварке на режимах: $I_{св} = 200$ А, $l_d = 3$ мм, $v_{св} = 75$ м/ч максимальную термостойкость имел вольфрам (не оп-

* Схема устройства предложена сотрудником ИЭС им. Е. О. Патона д-ром техн. наук, проф. И. В. Пентеговым.

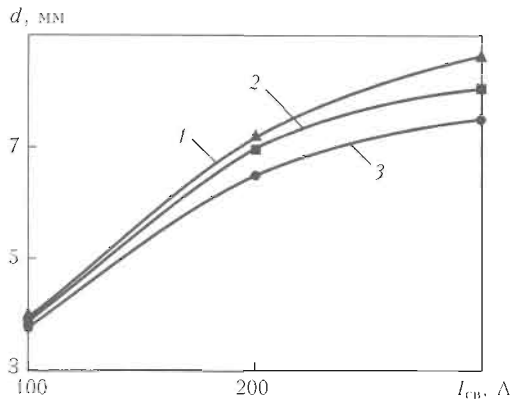


Рис. 5. Зависимость диаметров столба дуги (1), газодинамического давления дуги (2) и активного пятна дуги (3) на изделии при $l_d = 3$ мм от тока сварки

лавлялся дугой). При этом максимальное отклонение луча на экране было одинаковым, т. е. материал зонда не влиял на исследуемый показатель. Оказалось, что вольфрамовый зонд диаметром 1,0 мм также не оплавливался дугой на указанных режимах. Поэтому, учитывая целесообразность уменьшения диаметра зонда, вводимого в дугу, во всех дальнейших экспериментах использовали зонд указанного диаметра.

Как и в работе [13], тарировку устройства проводили путем воздействия на зонд потоком аргона, который подавался через прямоугольную щель размерами 8×1,5 мм на конце круглой медной трубки. При тарировке обеспечивали ламинарный режим потока аргона. Зонд располагали на расстоянии 0,4...0,5 мм от торца (щели) трубки. Расход газа фиксировали расходомером РС-3. Для определения соотношения между усилием на зонд и отклонением луча на экране к зонду подвешивали гирьки (миллиграммы разновесов). Определяли также необходимый для дальнейшей обработки данных коэффициент лобового сопротивления зонда из формулы

$$F = C_x S_3 \frac{\rho v^2}{2},$$

где F — сила, действующая на зонд, Н; C_x — коэффициент лобового сопротивления зонда; S_3 — площадь лобового сопротивления зонда, м²;

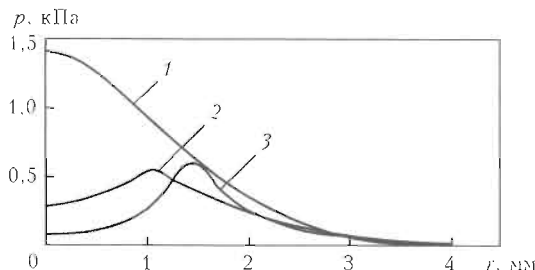


Рис. 6. Распределение газодинамического давления дуги вдоль оси r при $l_d = 3$ мм: 1 — без ПРМП; 2 — постоянное ПРМП ($B_z = 25$ мТл); 3 — переменное с частотой 50 Гц ПРМП ($B_z = 25$ мТл)

ρ — плотность аргона, кг/м³; v — скорость потока аргона, м/с.

Расчеты показали, что коэффициент лобового сопротивления зонда C_x в диапазоне скоростей потока аргона 7...20 м/с имеет практически одинаковое значение.

Типичные изображения на экране процессов отклонений луча во времени при пересечении дугой вольфрамового зонда (рис. 4 б, в) использовали для определения распределения давления по радиусу сечения дуги. Обработку осуществляли по методике, аналогичной изложенной в работе [13] с использованием ЭВМ по специально разработанной программе.

При повышении индукции ПРМП диаметр давления дуги несколько увеличивается аналогично видимому диаметру столба дуги в том же сечении (см. рис. 2). Характерно, что видимый диаметр столба дуги практически совпадает с диаметром давления дуги при заданном значении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП (см. рис. 2, кривые 5–7).

Для процесса сварки без воздействия ПРМП по мере увеличения сварочного тока диаметры столба дуги, давления дуги и анодного пятна дуги на изделии возрастают (рис. 5). При этом диаметр активного пятна дуги на изделии несколько меньше, чем диаметры столба дуги и давления дуги. С возрастанием сварочного тока разность (расхождение) между диаметром активного пятна и диаметром давления дуги увеличивается (рис. 5). Аналогичная зависимость наблюдается и при повышении индукции ПРМП (см. рис. 2).

При воздействии как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП наблюдается существенное уменьшение давления дуги на ее оси. Характерно также, что переменное ПРМП влияет на давление дуги не менее интенсивно, чем постоянное (рис. 6). При увеличении индукции постоянного (и аналогично переменного частотой 50 Гц) ПРМП давление дуги на ее оси уменьшается. Из приведенных на рис. 7, кривая 4, данных для постоянного ПРМП следует, что при индукции порядка 40 мТл и выше на оси дуги имеются отрицательные значения, что некорректно с физической точки зрения. С учетом особенностей, присущих применяемому для измерений методу (методу зондов), полученные отрицательные значения давления дуги объясняются тем, что в зоне дуги, примыкающей к ее оси, плазменный поток направлен от изделия к электроду. Приведенные на рис. 6 положительные и отрицательные значения давления дуги следует представлять как перепады газодинамических давлений, направленных соответственно от электрода к изделию и от изделия к электроду.

Полученные данные позволяют расширить представления о влиянии ПРМП на такие важные

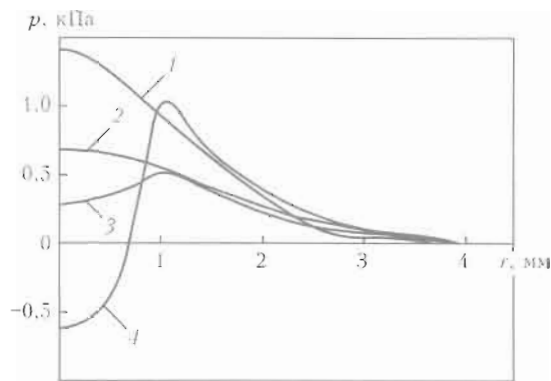


Рис. 7. Распределение газодинамического давления дуги вдоль оси r при $l_{\text{э}} = 3$ мм при постоянном ПРМП различной индукции: 1 — $B_z = 0$; 2 — 18; 3 — 25; 4 — 45 мТл

характеристики дуги, как распределение плотности тока в анодном пятне дуги, распределение давления дуги, которые являются определяющими по влиянию на эффективность проплавления основного металла и качество формирования шва с воздействием ПРМП.

Выводы

1. При увеличении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП диаметр активного пятна дуги на изделии и плотность тока в центре пятна уменьшаются, а распределение плотности тока по радиусу равномернее, чем при сварке без воздействия ПРМП.

2. Методом введения в дугу зонда подтверждены данные, полученные ранее методом стробоскопического отверстия, что при воздействии на дугу постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП газодинамическое давление дуги снижается на ее оси и повышается в периферийных областях. При индукции ПРМП порядка 40 мТл и выше на оси дуги ее плазменный поток имеет составляющую скорости, направленную от изделия к электроду.

It is demonstrated experimentally, using the split-anode method that at increase of the induction of longitudinal magnetic field in the arc zone the diameter of the active (anode spot) on the product decreases, while current density distribution along its radius is more uniform than in welding without the longitudinal magnetic field. The probe method is used to show that at the magnetic field impact the gas-dynamic pressure in the arc center decreases.

Поступила в редакцию 01.10.2007

1. Сварка с электромагнитным перемещиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман и др. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. — Мариуполь: Изд. Приазов. гос. техн. ун-та, 2000. — 245 с.
3. Биржес В. А. Теоретические и технологические основы повышения производительности дуговой сварки и наплавки во внешнем аксиальном магнитном поле: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Лидецк, 1997. — 37 с.
4. Гвоздецкий В. С. О функции распределения плотности тока в анодном пятне дуги // Автомат. сварка. — 1973. — № 12. — С. 20-24.
5. Шоек П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. — М.; Л.: Энергия, 1966. — С. 110-139.
6. Ерохин А. А., Букаров В. А., Иценко Ю. С. Влияние геометрии вольфрамового катода на некоторые характеристики сварочной дуги и проплавление металла // Свароч. пр-во. — 1971. — № 12. — С. 17-21.
7. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Там же. — 1977. — № 3. — С. 3-4.
8. Мечев В. С., Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Радиальное распределение плотности тока в анодном пятне аргоновой дуги // Автомат. сварка. — 1971. — № 8. — С. 7-10.
9. A new approach for fluid flow model in gas tungsten arc weld pool using longitudinal electromagnetic control / J. Luo, Q. Luo, Y. H. Lin, J. Xue // Welding J. — 2003. — № 8. — P. 202-206.
10. О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке / В. Н. Селянников, В. А. Блишков, Ю. В. Казаков, В. Н. Баженов // Свароч. пр-во. — 1975. — № 11. — С. 5-7.
11. Матвиш В. И., Сыроватка В. В., Флоринский Ф. Б. Влияние продольного пульсирующего электромагнитного поля на газокинетическое давление дуги // Автомат. сварка. — 1981. — № 5. — С. 6-7, 12.
12. 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.
13. Ленивкин В. А., Петров П. И., Дюржеров Н. Г. Определение скорости плазмы сварочной дуги // Свароч. пр-во. — 1984. — № 7. — С. 3-4.
14. Вороний Н. М., Кривуца И. В. Газодинамические характеристики плазменных потоков в сварочных дугах // Магнит. гидродинамика. — 1978. — № 1. — С. 132-136.