

04;12

## Управление положением канала дугового разряда в вакуумно-дуговых установках

© А.В. Воронин, А.А. Семенов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: voronin.mhd@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 9 апреля 2001 г.)

Теоретически и экспериментально исследовано поведение электрической дуги в магнитном поле. Установлено, что поведение электрической дуги может определяться пондеромоторным взаимодействием дуги с токнесущими элементами, а в неоднородном магнитном поле — токами Холла и диамагнетизмом ее плазмы. Показана возможность управления положением канала дугового разряда, горящего между торцами цилиндрических электродов с помощью неоднородных магнитных полей. Рассмотренные авторами методы и устройства позволяют, в частности, управлять электродуговыми источниками тепла при термической обработке металлов.

### Введение

В промышленности во многих технологических процессах широко используются электрические дуги. При этом свободно горящая дуга хаотически перемещается в зазоре между электродами и ее поведение и характеристики неоднозначны. Например, при плавке металла в вакуумно-дуговых печах может происходить вынос дуги на стенки тиглей, что приводит либо к снижению качества выплавленного металла либо к аварии. Существующие способы управления положением дуги недостаточно эффективны и не дают желаемого результата [1,2], так как используется либо управление параметрами электродугового источника, косвенно влияющими на положение дуги, либо уменьшение вредных последствий неуправляемого взаимодействия электрической дуги с окружающими ее конструктивными элементами. Существует необходимость жесткого управления местоположением канала дугового разряда в промежутке между электродами.

В настоящей работе рассмотрены некоторые возможности активного управления положением электрической дуги постоянного и переменного тока [3]. Электрическую дугу можно рассматривать как проводник с током и тогда использовать пондеромоторное взаимодействие тока дуги с токопроводами для стабилизации местоположения канала дугового разряда. В то же время электрическую дугу можно рассматривать как плазменный проводник и для ее управления использовать свойства плазмы.

### Использование пондеромоторного взаимодействия токопроводов с электрической дугой для стабилизации ее положения

Использование неоднородных магнитных полей токов в подводящих электродах или других внешних токопроводов для стабилизации положением канала дугового

разряда представляется одним из самых простых и привлекательных способов управления [4].

Рассмотрена задача пондеромоторного взаимодействия тока электрической дуги с токами в подводящих электродах, выполненных в виде двух соосных полубесконечных цилиндров, разделенных дуговым промежутком. Дуга считалась бесконечно тонким линейным током, перпендикулярным торцевым поверхностям электродов. Получено выражение для силы, действующей на единицу длины проводника с током, протекающим между полубесконечными цилиндрическими электродами. При соосном положении проводника с током в дуговом зазоре эта сила равна нулю. Однако при сколь угодно малом удалении проводника от оси появляется радиальная сила, выталкивающая проводник за пределы дугового промежутка. Причем значение этой силы увеличивается по мере удаления проводника от оси электродов. Длина дугового промежутка слабо влияет на величину выталкивающей силы.

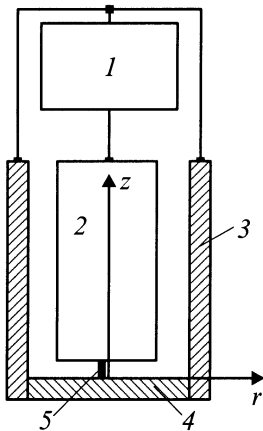
Таким образом, исследования показывают, что электрическая дуга между двумя соосными достаточно длинными цилиндрическими электродами не имеет устойчивого положения в зазоре. Уменьшить уровень радиальной дестабилизирующей силы можно, например, с помощью коаксиального токопровода.

Рассмотрена задача пондеромоторного взаимодействия проводника с током, расположенного между дном проводящего тигля и торцом полубесконечного проводящего цилиндра (рис. 1). В этой геометрии токопроводами служили цилиндрический электрод, дно тигля с проводимостью  $\sigma_b$  и стенки тигля с проводимостью  $\sigma_w$ . Дуга также рассматривалась в виде бесконечно тонкого линейного тока, перпендикулярного торцу электрода и дну тигля. Полагалось, что перераспределение тока в электроде происходит в бесконечно тонком слое его торца. Распределением тока по толщине стенок и дна тигля пренебрегалось, т. е. токи полагались поверхностными.

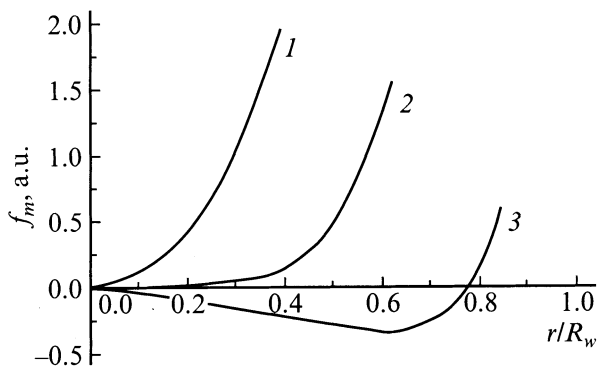
В выражении для расчета радиальной силы  $F_m$ , действующей на единицу длины проводника с током, проте-

кающим между дном тигля и торцом электрода, важно соотношение проводимостей между дном и стенкой тигля [4]. Можно выделить следующие три предельных случая, определяющих поведение электрической дуги в геометрии магнитного поля коаксиальных электродов: а)  $\sigma_w \ll \sigma_b$  — случай малой проводимости стенки тигля; б)  $\sigma_w = \sigma_b$  — случай равной проводимости дна и стенки тигля; в)  $\sigma_b \ll \sigma_w$  — случай малой проводимости дна тигля.

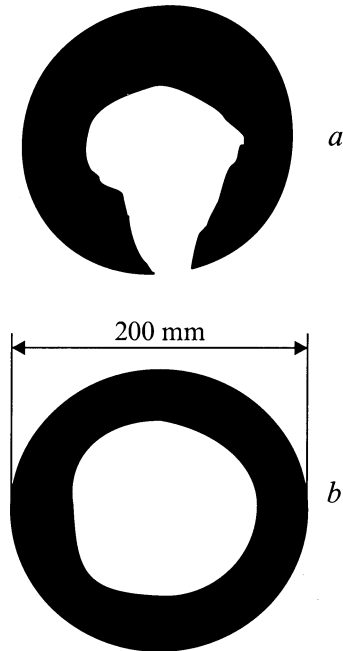
Результаты расчетов показывают, что первые два случая качественно не отличаются от рассмотренной ранее задачи с аксиальными электродами. Для случая малой проводимости дна тигля по сравнению со стенкой ( $\sigma_b \ll \sigma_w$ ) установлено, что при  $R_c/R_w \geq 0.9$  ( $R_e$  — радиус электрода,  $R_w$  — внутренний радиус тигля) существует область  $0 \leq R \leq 0.75R_w$ , в которой сила  $F_m$ , действующая на дугу, направлена к оси системы, т.е. равновесное положение является устойчивым (рис. 2). Случай малой проводимости дна относительно стенок



**Рис. 1.** Схема коаксиального расположения электродов: 1 — источник тока, 2 — цилиндрический электрод, 3 — стенка тигля, 4 — дно тигля, 5 — канал дугового разряда.



**Рис. 2.** Зависимость силы  $f_m$ , действующей на единицу длины проводника с током между коаксиальными электродами в радиальном направлении, от расстояния до оси электродов ( $f_m = 10^7 \cdot F_m \cdot R_e / I^2$ , где  $I$  — ток разряда А,  $R_e$  — в м,  $F_m$  — в Н/м). Случай малой проводимости дна тигля по сравнению со стенкой ( $\sigma_b \ll \sigma_w$ ).  $R_e/R_w$ : 1 — 0.5, 2 — 0.7, 3 — 0.9.



**Рис. 3.** Фольга, проплавленная в условиях, когда проводимости дна и стенки равны ( $\sigma_w = \sigma_b$ ) (a) и когда проводимости стенки много меньше проводимости дна ( $\sigma_w \ll \sigma_b$ ) (b).

на практике реализуется, например, при плавке титана в медных тиглях.

Экспериментальная проверка результатов расчета по стабилизации положения канала дугового разряда осуществлялась с помощью проплавления алюминиевых фольг, плотно совмещаемых с торцом верхнего электрода. Фольги, проплавленные при условии одинаковой (рис. 3, a) и малой проводимостей (рис. 3, b) дна тигля, подтверждают результаты проведенного расчета. Как и ожидалось в первом случае получены следы хаотического перемещения канала дугового разряда по торцу электрода с выходом на периферию электрода. Другая картина наблюдалась во втором случае. Видно, что канал дугового разряда не выходит на периферию электродов и его местоположение ограничено областью, максимальный радиус которой меньше радиуса верхнего электрода.

### Управление положением канала дугового разряда постоянного тока неоднородным магнитным полем

Электрическая дуга является плазменным проводником, и естественно для управления ею использовать свойства плазмы, в частности ее диамагнетизм. Однако при изучении поведения плазменных проводников в пространственно неоднородных магнитных полях авторы столкнулись с парадоксальным с точки зрения диамагнетизма плазмы явлением. Плазменный столб дуги постоянного тока в зависимости от направления тока в нем может устойчиво располагаться как в области минимального, так и в области максимального магнитного поля.

Причем условие замагниченности, необходимое для диамагнитного взаимодействия, может не выполняться.

Обзор работ, посвященных электрическим дугам, показал, что имеется ряд экспериментальных данных по стабилизации местоположения дуги в области максимума магнитного поля, не имеющих удовлетворительного теоретического объяснения [5,6].

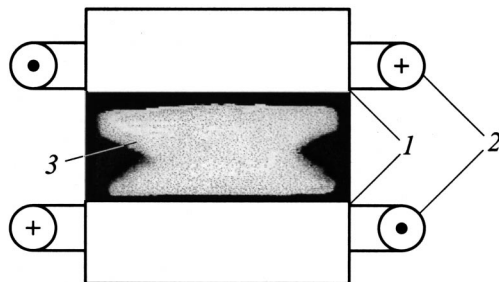
Такое поведение дугового разряда удалось объяснить при учете эффекта Холла, проявляющегося в появлении дополнительного тока, перпендикулярного приложенным электрическому и магнитному полям [7]. Взаимодействие тока Холла с внешним магнитным полем и определяет поведение дугового разряда. Был выполнен эксперимент, который подтвердил теоретическое предсказание [8].

### Использование диамагнетизма плазмы дуги переменного тока для управления ее положением

Как показано в [8], направление силы, обусловленной токами Холла, зависит от направления тока в дуге. В дугах переменного тока, горящих в неоднородных магнитных полях, усредненная по периоду тока дуги сила Холла оказывается равной нулю и диамагнитный эффект становится существенным. Поэтому его можно использовать для воздействия на плазменный столб дуги [9].

Если в дуговом промежутке создать магнитное поле, нарастающее от оси к периферии электродов, то канал дугового разряда должен находиться в области минимального магнитного поля (в минимуме  $B$ ). Перемещение электрической дуги можно задавать перемещением минимума напряженности магнитного поля. Критерием применимости диамагнетизма для удержания дуги является условие замагниченности электронной компоненты плазмы.

Результаты расчетов диамагнитных сил  $F_d$ , удерживающих электрическую дугу, а также экспериментальных исследований показали, что эффективное удержание электрической дуги обеспечивается в магнитном поле антипробкотрона. Магнитное поле создавалось с помощью двух коротких электромагнитных катушек, расположен-



**Рис. 4.** Плазма дугового разряда в магнитном поле антипробкотрона. 1 — электроды, 2 — катушки с током, 3 — дуговой разряд.

ных соосно с электродами, симметрично относительно дугового зазора и встречно направленными токами.

На рис. 4 приведен светящийся объем плазмы дугового разряда переменного тока в магнитном поле антипробкотрона. Видно соосное с электродами расположение канала дугового разряда с резкими границами. Минимальное сжатие разряда соответствует положению максимального градиента магнитного поля.

### Заключение

Теоретически и экспериментально установлено, что поведение электрической дуги в неоднородном магнитном поле может определяться диамагнетизмом ее плазмы, токами Холла, пондеромоторным взаимодействием дуги с токонесущими элементами. Показана возможность управления положением канала дугового разряда, горящего между торцами цилиндрических электродов с помощью неоднородных магнитных полей. Предложена схема и определены параметры токоподводов, позволяющие использовать пондеромоторное взаимодействие электрической дуги с токонесущими элементами для ее стабилизации. Осуществлена локализация канала дугового разряда переменного тока в заданном месте дугового зазора, использующая диамагнетизм плазмы. Осуществлено управление положением дуги постоянного тока неоднородным магнитным полем, учитывающее токи Холла. Рассмотренные методы и устройства позволяют, в частности, управлять электродуговыми источниками тепла при термической обработке металлов.

### Список литературы

- [1] Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
- [2] Свенчанский А.Д., Гуттерман К.Д. Автоматическое регулирование печей. М., Л.: Энергия, 1965. 300 с.
- [3] Rusakov A.I., Semenov A.A., Voronin A.V. // Proc. XVII ISDEIV. Berley (California), 1996.
- [4] Воронин А.В., Русаков А.И., Семенов А.А. // Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб., 1989. № 1366.
- [5] Wroe H. // Britt. Appl. Phys. 1958. Vol. 9. N 12. P. 488–491.
- [6] Дороднов А.М. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1858–1869.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [8] Воронин А.В., Русаков А.И., Семенов А.А. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 4. С. 20–30.
- [9] Воронин А.В., Русаков А.И., Семенов А.А. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб., 1989. № 1379.