

ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК: 621.791; 533.9

Вишняков В. И., Киро С. А., Кабаненко Р.В.

*Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса
E-mail: drvishnyakov@mail.ru, serkiro1955@gmail.com*

Методика зондовой диагностики плазмы сварочного аэрозоля

Рассмотрена возможность применения зондовых измерений в плазме сварочного аэрозоля. Обнаружено, что плазма сварочного аэрозоля содержит только положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные частицы. Проведено компьютерное моделирование поведения сигнала зонда в ионно-пылевой плазме. Предложена методика обработки зондовых измерений в плазме сварочного аэрозоля.

Введение. Описание взаимодействия одиночного зонда с плазмой существенно зависит от числа Кнудсена, которое определяется отношением длины свободного пробега носителей заряда λ к характерному размеру зонда L_p : $Kn = \lambda / L_p$. В случае бесстолкновительной плазмы $Kn \gg 1$ и их взаимодействие описывается в Ленгмюровском приближении [1]. В этом случае равновесное значение потенциала одиночного зонда, которое называется плавающим потенциалом, определяется балансом потоков электронов и ионов плазмы на зонд:

$$\phi_f = \frac{kT}{2e} \ln \frac{m_e}{m_i}, \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура плазмы, e - заряд электрона, m_e - масса электрона, m_i - масса иона. Предполагается, что изотермическая плазма содержит один сорт однозарядных положительных ионов и является нейтральной, то есть средние концентрации электронов и ионов равны: $n_e = n_i = n_0$, где n_0 - невозмущенная концентрация. Плавающий потенциал имеет отрицательное значение, так как масса иона гораздо больше массы электрона.

В столкновительной плазме (например, термическая плазма) число Кнудсена $Kn \ll 1$ и теория зонда Ленгмюра становится неприменимой. Более того, поверхность зонда влияет на ионизационное равновесие плазмы, так как не только поглощает и эмитирует электроны, но и является дополнительным каналом ионизации атомов и рекомбинации ионов плазмы. С учетом этих факторов плавающий потенциал зонда в столкновительной плазме описывается уравнением [2]:

$$\frac{n_0}{v_e} \exp\left(\frac{W_{pr} + 2e\phi_f}{kT} + \text{th} \frac{e\phi_f}{4kT}\right) = 2 \text{ch} \frac{e\phi_f}{kT} - 1,$$

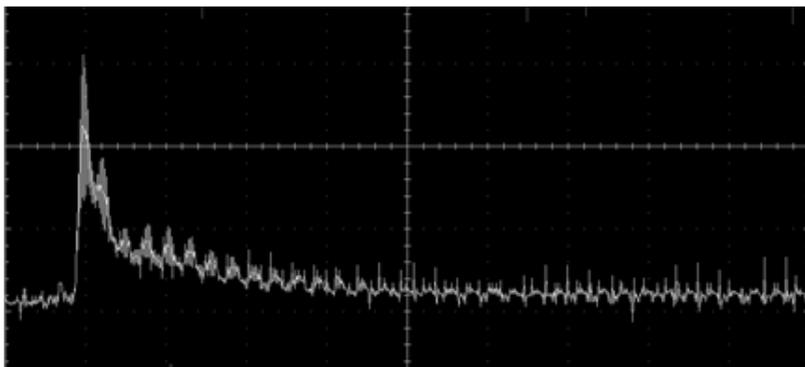


Рис. 1 Типичный сигнал одиночного зонда, простреливаемого через плазму сварочного аэрозоля

где $v_e = 2(m_e kT / 2\pi\hbar^2)^{3/2}$ – эффективная плотность состояний электрона, W_{pr} – работа выхода для материала зонда. В этом случае плавающий потенциал также имеет отрицательное значение и может быть описан аппроксимирующим выражением

$$\phi_f \cong -\frac{kT}{3e} \left(\ln \frac{n_0}{v_e} + \frac{W}{kT} \right). \quad (2)$$

Зондовые измерения в области формирования первичных нанометровых частиц (температура плазмы 1700-2500 К) при электродуговой сварке металлов в защитном газе показали, что потенциал одиночного зонда положительнее (рис.1), из чего следует, что поток положительных ионов на зонд превышает поток электронов. Это означает, что электронов в газовой фазе значительно меньше ионов, то есть газовая фаза представляет собой ионно-пылевую плазму, где большая часть электронов захвачена частицами, при этом отсутствие электронов в газовой фазе не позволяет реализоваться ионизации электронным ударом.

Частота столкновений свободных электронов с частицами намного больше, чем с ионами. Поэтому, в результате спорадических столкновений электроны поглощаются частицами, которые приобретают отрицательный заряд.

Зонд в такой плазме не может рассматриваться в рамках равновесной теории. Понятие плавающего потенциала к такому зонду неприменимо. Имеет смысл говорить только о токе ионов на зонд и описывать взаимодействие зонда с плазмой сварочного аэрозоля следует в рамках несбалансированных потоков. Настоящая работа посвящена моделированию взаимодействия зонда с ионно-пылевой плазмой и разработке методики зондовой диагностики плазмы сварочного аэрозоля, образующейся при электродуговой сварке металлов в защитном газе.

Ток зонда в ионно-пылевой плазме. Зондовые измерения производятся путем прострела зонда через область, занимаемую плазмой. При входе в об-

ласть плазмы зонд имеет температуру окружающего воздуха $T_{pr} \sim 300\text{K}$, тогда как температура плазмы [3]

$$T_{pl} = T_0 + (T_{vap} - T_0) \exp \frac{-r_0}{\tau_{mix} v_{mix}}, \quad (3)$$

и при электродуговой сварке металлов в защитном газе может изменяться в диапазоне $T_{pl} \sim 1500\text{-}2700\text{K}$ в зависимости от расстояния между точкой измерения и дугой r_0 . Здесь $T_0 = 300\text{K}$ - температура окружающей среды, $T_{vap} \sim 3000\text{K}$ - начальная температура потока паров сварочных материалов из зоны дуги, $\tau_{mix} = 1.7\text{мс}$ - постоянная времени смешения потока паров с защитным газом, $v_{mix} \sim 1.5\text{м/с}$ - средняя скорость потока парогазовой смеси в области измерения.

Из условия поглощения заряда (нейтрализации) ионов поверхностью зонда следует, что их концентрация у поверхности зонда равна нулю. Таким образом, вблизи поверхности зонда существуют градиенты температуры и концентрации ионов, которые определяют их диффузионный поток на поверхность зонда:

$$j_i = \frac{D_i}{T} \nabla(n_i T) = D_i \nabla n_i + D_i n_i \frac{1}{T} \nabla T, \quad (4)$$

где D_i - коэффициент диффузии ионов.

Нагрев зонда происходит путем передачи энергии ионами. Поэтому оба градиента в (4) определяются длиной свободного пробега ионов,

$$\nabla n_i = \frac{n_i}{\lambda_i}, \quad \nabla T = \frac{T_{pl} - T_{pr}}{\lambda_i}.$$

Учитывая, что коэффициент диффузии $D_i = (1/3)\lambda_i v_{Ti}$, где $v_{Ti} = \sqrt{8kT_{pl} / \pi m_i}$ - тепловая скорость ионов, из уравнения (4) следует:

$$j_i = \frac{1}{3} n_i v_{Ti} \left(1 + \frac{T_{pl} - T_{pr}}{T_{pr}} \right) = \frac{1}{3} n_i v_{Ti} \frac{T_{pl}}{T_{pr}}. \quad (5)$$

Наряду с потоком (5) при расчете температуры зонда следует учитывать поток атомов на зонд, который определяется только градиентом температуры (концентрация атомов у поверхности зонда незначительно превышает их концентрацию в объеме плазмы за счет нейтрализации ионов, но $n_a \gg n_i$, и таким различием можно пренебречь):

$$j_a \cong \frac{1}{3} n_a v_{Ta} \frac{T_{pl} - T_{pr}}{T_{pr}}, \quad (6)$$

где $v_{Ta} \cong v_{Ti}$ - тепловая скорость атомов.

Из уравнения (5) следует, что поток ионов на зонд зависит от отношения температуры плазмы к температуре зонда. Максимальное значение поток имеет при входе зонда в плазму, когда температура его минимальна. По мере прогрева зонда поток ионов уменьшается вплоть до значения, близкого к потоку спо-

радикальных столкновений $(1/4)n_i v_{Ti}$, что соответствует результатам измерений, представленным на рис. 1.

Измеряемый сигнал на омической нагрузке R_{pr} равен

$$U_{pr} = R_{pr} S_{pr} e j_i, \quad (7)$$

где $S_{pr} = \pi r_{pr}^2 + 2\pi r_{pr} L_{pr}$ – площадь поверхности зонда, r_{pr} – радиус цилиндрического зонда, L_{pr} – его длина.

Ионизационное равновесие в ионно-пылевой плазме. В многокомпонентной плазме сварочного аэрозоля равновесная концентрация атомов j -того компонента остывающей парогазовой смеси в окрестности зонда определяется как [3]

$$n_{Aj0} = \frac{P}{kT_{pl}} g_j, \quad g_j = \frac{g_{j0}}{\mu_j \sum_j \frac{g_{j0}}{\mu_j} + \frac{\mu_j}{\mu_0} \frac{T_{vap} - T_{pl}}{T_{pl} - T_0}}$$

где P – атмосферное давление, g_{j0} – начальная массовая доля j -того компонента в парах (определяется составом свариваемых материалов), μ_j – его молекулярная масса, μ_0 – средняя молекулярная масса окружающей среды.

В результате конденсации часть атомов j -того компонента переходит в конденсированную фазу (в каждой частице содержится $4\pi r_p^3 \rho g_j / 3m_{aj}$ атомов j -того компонента парогазовой смеси, где r_p – средний радиус частицы, ρ – ее плотность, m_{aj} – атомная масса j -того компонента). Тогда концентрация атомов j -того компонента в остывающей парогазовой смеси, содержащей частицы со средней концентрацией n_p , определяется уравнением

$$n_{Aj} = g_j \left(\frac{P}{kT_{pl}} - \frac{4\pi r_p^3 \rho n_p}{3m_{aj}} \right). \quad (8)$$

Ввиду отсутствия электронов в газовой фазе (частицы имеют отрицательный заряд), существует только два канала ионизации атомов: УФ-ионизация и поверхностная ионизация, и один канал рекомбинации за счет спорадических столкновений ионов с частицами и нейтрализацией ионов.

В дальнейшем для простоты будем считать, что парогазовая смесь содержит только один конденсирующийся и ионизирующийся компонент – железо (сварочная проволока содержит более 97% Fe).

В таком случае, поверхностная ионизация атомов определяется уравнением Саха-Ленгмюра:

$$\alpha_s = \frac{n_{is}}{n_{as}} = \frac{\sum_i}{\sum_a} \exp \frac{W_p - I}{kT}, \quad (9)$$

где n_{is} , и n_{as} – концентрации ионов и атомов железа у поверхности частицы, Σ_i и Σ_a – их статистические веса, I – потенциал ионизации железа, W_p – работа выхода для материала частиц, в данном случае - железа.

Тогда можно определить изменение концентрации ионов железа в плазме:

$$\frac{dn_i}{dt} = n_A \pi r_a^2 j_{ph} + n_A n_p v_{Ta} \sigma_{ap} \alpha_s - n_i n_p v_{Ti} \sigma_{ip} \gamma_s, \quad (10)$$

где r_a – радиус атома железа, j_{ph} – плотность потока фотонов с энергией, превышающей 7.9 эВ (потенциал ионизации железа), σ_{ap} – сечение столкновения атома с частицей, σ_{ip} – сечение столкновений иона с частицей, n_i – концентрация ионов железа в парогазовой смеси, n_A – концентрация атомов железа в парогазовой смеси (8), $\gamma_s \sim 0.05$ - коэффициент поверхностной рекомбинации ионов [4].

Условие электронейтральности ионно-пылевой плазмы $n_i = Zn_p$ (Z – заряд частиц в элементарных зарядах) предполагает, что при $n_i < n_p$ заряд частиц $|Z| < 1$, то есть заряжены далеко не все частицы. Поэтому, во-первых, при определении сечений столкновений можно пренебречь кулоновским взаимодействием и определить $\sigma_{ap} = \sigma_{ip} = \pi r_p^2$, во-вторых, пренебречь потенциальным барьером на границе плазма-частица и принять $n_{is} \cong n_i$.

В состоянии локального равновесия $dn_i/dt = 0$ и степень ионизации атомов железа в плазме сварочного аэрозоля определяется уравнением

$$\frac{n_i}{n_A} = \frac{\alpha_s}{\gamma_s} + \frac{r_a^2 j_{ph}}{n_p r_p^2 v_{Ta} \gamma_s}. \quad (11)$$

Температура зонда. Нагрев зонда определяется притоком тепла за счет энергии, переносимой ионами и атомами парогазовой смеси на зонд и оттоком тепла за счет термоэлектронной эмиссии (испарением материала зонда при измеряемых температурах можно пренебречь) и теплопроводности зонда. Поток ионов (5) переносит на зонд свою кинетическую энергию $3kT_{pl}/2$ и потенциальную энергию, равную разности между потенциалом ионизации I и работой выхода электрона из материала зонда W_{pr} [5]. Плотность потока энергии, переносимой ионами, равна

$$\Gamma_i = \frac{1}{3} n_i v_{Ti} \frac{T_{pl}}{T_{pr}} \left(I - W_{pr} + \frac{3}{2} kT_{pl} \right).$$

Плотность потока энергии, переносимой атомами равна

$$\Gamma_a = \frac{1}{2} n_A v_{Ta} \frac{T_{pl} - T_{pr}}{T_{pr}} kT_{pl},$$

где концентрация атомов n_A определяется формулой (8).

Термоэлектронная эмиссия с поверхности зонда определяется потоком Ричардсона-Дэшмана:

$$j_e^{em} = \frac{4\pi m_e (kT_{pr})^2}{(2\pi\hbar)^3} \exp\left(-\frac{W_{pr}}{kT_{pr}}\right) = \frac{1}{4} v_e v_{Te} \exp\left(-\frac{W_{pr}}{kT_{pr}}\right),$$

где $v_e = 2(m_e kT_{pr} / 2\pi\hbar^2)^{3/2}$ – эффективная плотность состояний электрона, m_e – масса электрона, \hbar – постоянная Планка, $v_{Te} = \sqrt{8kT_{pr} / \pi m_e}$ – тепловая скорость электронов.

Электроны переносят энергию, плотность потока которой равна

$$\Gamma_e = j_e^{em} \left(W_{pr} + \frac{3}{2} kT_{pr} \right).$$

Отток тепла за счет теплопроводности зонда определяется градиентом температуры вдоль зонда

$$\Gamma_q = \kappa \frac{T_{pr} - T_0}{L},$$

где κ – коэффициент теплопроводности материала зонда, L – характерная длина зонда вместе с элементами его крепления.

По порядку величины поток атомов $\Gamma_a \gg \Gamma_{ion}, \Gamma_e$, поэтому изменение температуры зонда определяется уравнением

$$\frac{dT_{pr}}{dt} = \frac{1}{\rho_{pr} V_{pr} c_{pr}} \frac{dQ}{dt} \cong \frac{S_{pr}}{\rho_{pr} V_{pr} c_{pr}} \left(\frac{1}{2} n_A v_{Ta} \frac{T_{pl} - T_{pr}}{T_{pr}} kT_{pl} - \kappa \frac{T_{pr} - T_0}{L} \right), \quad (12)$$

где Q – количество тепла, $V_{pr} = \pi r_{pr}^2 L_{pr}$ – объем зонда, ρ_{pr} – его плотность, c_{pr} – его удельная теплоемкость.

Результаты измерений. Обработка осциллограмм зондовых измерений проводилась путем подбора параметров парогазовой смеси таким образом, чтобы рассчитанное изменение сигнала зонда (7) $U_{pr}(t)$ совпадало с измеренной зависимостью $U_c(t)$. Через плазму сварочного аэрозоля, образующейся при электродуговой наплавке низкоуглеродистой стали в защитном газе ($U = 20.5$ В, $I = 95 \pm 5$ А, скорость подачи проволоки Св08Г2С – 9.2см/с, расход CO₂ – 10 л/мин), на расстоянии r_0 от столба дуги со скоростью 23 см/с простреливалась система двух одинаковых зондов, расположенных на расстоянии 0.2 мм друг от друга. Один зонд заземлен и является опорным, второй – заземлен через нагрузочное сопротивление R_{pr} и является измерительным. Температура плазмы сварочного аэрозоля в точке измерения вычислялась по формуле (3). Средняя скорость потока плазмы в области измерения $v_{mix} = 1.5$ м/с и постоянная времени смешения $\tau_{mix} = 1.7$ мс определялись независимыми измерениями.

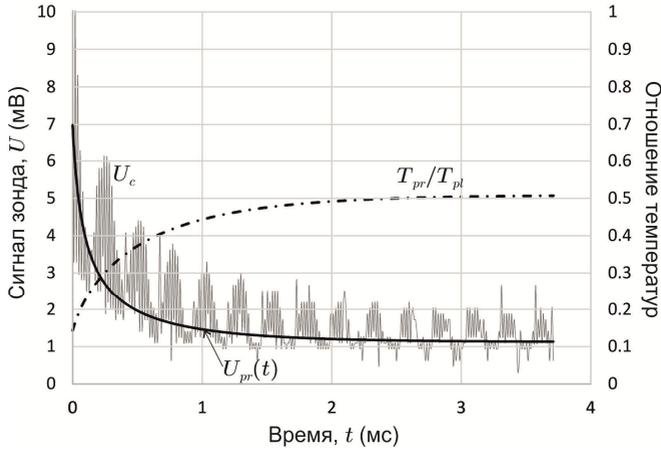


Рис. 2 Измеренные и рассчитанные значения сигнала зонда

Таблица 1. Параметры плазмы сварочного аэрозоля

Плотность потока фотонов, j_{ph}	$2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-2}$
Температура в точке измерения, T_{pl}	2000 К
Концентрация ионов, n_i	$1.1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$
Концентрация атомов, n_A	$2.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Исходная концентрация атомов, n_{A0}	$9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Концентрация частиц, n_p	10^{15} см^{-3}
Радиус частиц, r_p	1.4 нм

Сигнал зонда регистрировался цифровым осциллографом DSO3204 (Hantek, Китай) и передавался в компьютер. Из всего набора измеренных значений сигнала вырезался вектор, начальное значение которого совпадает с максимумом сигнала, что соответствует входу зонда в плазму. При этом температура зонда соответствует температуре окружающей среды. Для исключения высокочастотного шума усреднялись первые значения и по результирующей величине U_{c0} определялась концентрация ионов

$$n_i = \frac{3T_0 U_{c0}}{e v_{Tl} T_{pl} R_{pr} S_{pr}}$$

На рис.2 приведены результаты измерения и компьютерного моделирования сигнала зонда при: длина зонда $L_{pr} = 0.2 \text{ мм}$, диаметр зонда $d_{pr} = 0.35 \text{ мм}$, сопротивление нагрузки $R_{pr} = 800 \text{ ом}$, расстояние от столба дуги до точки измерения $r_0 = 1.5 \text{ мм}$.

Наилучшее совпадение расчетной $U_{pr}(t)$ и экспериментальной $U_c(t)$ кривых наблюдается, если принять параметры плазмы, отображенные в табл. 1.

Таким образом, моделирование зондового тока в ионно-пылевой плазме и уравнение энергетического баланса измерительного зонда позволяют оценить комплекс основных параметров плазмы сварочного аэрозоля в точке измерения: температуру плазмы, концентрацию ионов и степень ионизации плазмы, концентрацию частиц и их размер.

Заключение. Для плазмы сварочного аэрозоля предложена и апробирована методика зондовых измерений, основанная на измерении потенциала движущегося зонда. Показано, что плазма сварочного аэрозоля в области формирования первичных частиц содержит преимущественно положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные наноразмерные частицы. Предложена упрощенная теория зондовых измерений в плазме сварочного аэрозоля, которая позволяет интерпретировать экспериментальные результаты и оценить комплекс основных параметров плазмы сварочного аэрозоля в точке измерения.

Литература:

1. *Langmuir L.* The interaction of electron and ion space charges in cathode sheath // *Physical Review.* – 1929. - V. 33. – P. 954-989.
2. *Vishnyakov V.I.* Probe in the thermal collision plasma // *Physics of Plasmas.* – 2007. - V.14(1). – P. 013502(1-5).
3. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A.* Effect of shielding gas temperature on the welding fume particle formation: Theoretical model // *Journal of Aerosol Science.* – 2018. - V. 124. – P. 112-121.
4. *Зандберг Э.Я., Ионов Н.И.* Поверхностная ионизация. – М.: Наука, 1969. – 432 с.
5. *Benilov M.S.* Understanding and modelling plasma-electrode interaction in high-pressure arc discharge: a review // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2008. – V. 41(14). – P. 144001(1-30).

Вишняков В. І., Кіро С. А., Кабаненко Р.В.

Методика зондової діагностики плазми зварювального аерозолю.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто можливість застосування зондових вимірювань у плазмі зварювального аерозолю. Показано, що плазма зварювального аерозолю переважно містить позитивно заряджені іони і негативно заряджені нанометрові частинки. Проведено комп'ютерне моделювання поведінки сигналу зонда в іонно-пилувій плазмі. Запропоновано методику обробки зондових вимірювань у плазмі зварювального аерозолю.

Vishnyakov V. I., Kiro S.A., Kabanenko R.V.
Technique of probe diagnostics in the welding fume plasma.

SUMMARY

The possibility of using probe measurements in the welding fume plasma is considered. It was found out that welding fume plasmas contains predominantly positively charged ions and negatively charged nanometer particles. The behavior of probe signal in the ion-dust plasma is considered via numerical modelling. The procedure of the probe measuring processing in the welding fume plasma is proposed.