

ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК: 621.791; 533.9

Вишняков В. И., Опря М. В., Эннан А. А.-А.

Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса

E-mail: drvishnyakov@mail.ru, serkiro1955@gmail.com

Влияние щелочной присадки в защитном газе на дисперсный состав сварочного аэрозоля.

Рассмотрен ионизационный баланс в плазме сварочного аэрозоля при электродуговой сварке металлов в защитном газе. Наличие конденсированных частиц приводит к ионизации атомов газа на поверхности частиц и смещению ионизационного баланса в области пространственного заряда вокруг частицы. Поэтому, средние концентрации электронов и ионов в плазме изменяются в присутствии заряженных частиц. Это влияет на процесс образования зародышей и, соответственно, изменяет скорость образования частиц сварочного аэрозоля. Измерены скорости образования частиц при различном содержании присадок калия в защитном газе. Расчетная концентрация зародышей при различном содержании присадок калия в защитном газе хорошо коррелирует с полученными экспериментальными данными.

Введение. Электродуговая сварка в защитном газе сопровождается выделением высокотемпературных паров металлов в окружающее пространство. В процессе смешения паров с окружающей средой происходит их остывание, образование зародышей новой фазы, рост и коалесценция зародышей, отвердевание капелек и образование первичных частиц, их коагуляция и образование ингаляционных частиц сварочного аэрозоля размером до микрометра, представляющих опасность для здоровья сварщиков и окружающей среды [1]. Поэтому, исследования, направленные на разработку методов управления дисперсным и химическим составом ингаляционных частиц в процессе их формирования, имеют большое прикладное значение для создания безопасных условий труда в сварочном производстве.

Образование зародышей новой фазы происходит в результате гетерогенной ион-индуцированной нуклеации, т.е. центрами конденсации являются ионы. Источником ионов является ионизация атомов парогазовой смеси, и поверхностная ионизация атомов на конденсированных частицах. В газовой фазе ионизация происходит, как за счет столкновений с электронами (термическая ионизация), так и за счет взаимодействия с УФ-излучением дуги. Таким образом, существует по крайней мере три канала ионизации, которые необходимо учитывать при описании ионизационного равновесия плазмы сварочного аэрозоля. Кроме того, разные каналы ионизации-рекомбинации влияют друг на друга, поскольку каждый из них изменяет количество электронов и ионов в системе, что приводит к изменению интенсивности рекомбинации в каждом из каналов.

В работе представлены результаты теоретического изучения ионизационного равновесия в плазме сварочного аэрозоля и экспериментального исследования влияния степени ионизации плазмы на дисперсный состав ингаляционных частиц сварочного аэрозоля.

Концентрация носителей заряда в пылевой плазме. Ионизационное равновесие в термической плазме описывается уравнением Саха

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{\sum_i}{\sum_a} v_e \exp \frac{-I}{kT} \equiv K_S, \quad (1)$$

где n_e , n_i и n_a – средние по области локального термодинамического равновесия (ЛТР) концентрации электронов, ионов и атомов, соответственно, причем $n_a = n_A - n_i$, n_A – исходная концентрация атомов; \sum_i и \sum_a – статистические суммы ионов и атомов; $v_e = 2(m_e kT / 2\pi\hbar^2)^{3/2}$ – эффективная плотность состояний электрона; I – потенциал ионизации атомов; k – постоянная Больцмана; T – температура Кельвина; m_e – масса электрона; \hbar – постоянная Планка, K_S – константа Саха.

Плазма сварочного аэрозоля подвержена воздействию ультрафиолетового излучения дуги. На ионизационное равновесие влияет излучение с энергией фотона, превышающей потенциал ионизации атомов $h\nu \geq I$. При сварке штучными электродами (покрытие содержит соединения щелочных металлов) в плазме присутствует присадка щелочных металлов (например, калия с потенциалом ионизации $I^K = 4.34$ эВ, или натрия с потенциалом ионизации $I^{Na} = 5.14$ эВ), именно она определяет ионизацию плазмы. Сварочная дуга излучает ультрафиолет в указанном диапазоне с плотностью потока фотонов $j_{ph} \sim 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Такая интенсивность мало влияет на ионизационное равновесие в зоне конденсации паров сварочных материалов при температуре плазмы $T \sim 2000 - 3000 \text{ К}$. Однако в зоне коагуляции первичных частиц, при температуре $T < 1500 \text{ К}$, ионизация УФ-излучением оказывается определяющей.

При сварке в защитном газе пары не содержат щелочную присадку. Ультрафиолетовое излучение дуги не поглощается щелочными атомами, поэтому в окружающее пространство проникает коротковолновое излучение, что, например, обуславливает интенсивное образование озона при этом способе сварки. Источником ионов являются атомы конденсирующихся веществ, в основном атомы железа с потенциалом ионизации $I^{Fe} = 7,9$ эВ. Ввиду того, что потенциал ионизации этих атомов гораздо выше, чем щелочных металлов, интенсивность термической ионизации меньше, чем при использовании штучных электродов, но выше интенсивность УФ-ионизации за счет большей плотности потока фотонов (используется $j_{ph} = 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

Учет УФ-ионизации производится путем модернизации константы Саха [2]:

$$K_S^* = \frac{\sum_i v_e \exp \frac{-I}{k_B T} + \frac{\pi r_a^2 j_{ph}}{\gamma_{ei}}}{\sum_a} \quad (2)$$

где r_a – радиус ионизируемого атома; γ_{ei} – коэффициент электрон-ионной рекомбинации, $\gamma_{ei} \sim 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [3].

Электрическая нейтральность плазмы означает, что

$$n_e = n_i = n_0, \quad (3)$$

где n_0 – невозмущенная концентрация, которая легко определяется из уравнений (1) и (3):

$$n_0 = \sum_j \frac{K_{sj}^*}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{n_{Aj}}{K_{sj}^*}} - 1 \right), \quad (4)$$

где K_{sj}^* – константа (2) для j -того ионизирующегося компонента паров, n_{Aj} – исходная концентрация атомов этого компонента.

После конденсации паров плазма насыщена капельками растущих зародышей, которые взаимодействуют с электронами и ионами плазмы. В процессе остывания происходит отвердевание капелек и образование первичных частиц, которые тоже взаимодействуют со свободными электронами и ионами. В результате межфазного взаимодействия происходит зарядка конденсированных частиц. При этом вокруг заряженных частиц образуется область пространственного заряда (ОПЗ), где происходит изменение концентраций электронов и ионов плазмы в поле частицы. Непосредственно у поверхности частицы концентрация электронов определяется балансом потока электронов, которые эмитируют из частицы за счет термоэлектрической миссии и за счет внешнего фотоэффекта [2]

$$I_e^{em} = 4\pi a^2 \frac{4\pi m_e (kT)^2}{(2\pi\hbar)^3} \exp \frac{-W}{kT} + \pi a^2 Y_j \quad (5)$$

и обратного потока электронов из плазмы к частице за счет спорадических столкновений

$$I_e^{ads} = \pi a^2 v_{eT} n_{es}, \quad (6)$$

где a – радиус частицы; W – работа выхода электрона из частицы; Y – квантовый выход внешнего фотоэффекта; $v_{eT} = \sqrt{8kT / \pi m_e}$ – тепловая скорость электрона; $n_{es} = n_0 \exp(V_b / kT)$ – поверхностная концентрация электронов; V_b – потенциальный барьер в плазме у поверхности частицы.

Например, при термоэмиссии (без учета фотоэмиссии) поверхностная концентрация электронов равна $n_{es} = v_e \exp(-W / kT)$, и поверхностная ионизация определяется уравнением Саха-Ленгмюра [4]. В общем случае, с учетом фотоэмиссии, поверхностная концентрация электронов,

$$n_{es} = v_e \exp \frac{-W}{kT} + \frac{Y_j}{v_{eT}}, \quad (7)$$

соответственно, поверхностная ионизация плазмы

$$\frac{n_{is}}{n_{as}} = \frac{K_S^*}{v_e \exp\left(\frac{-W}{kT} + \frac{Y_j}{v_{eT}}\right)}, \quad (8)$$

при этом следует учитывать, что уравнение (8) записано только для одного компонента паров, т.е. в общем случае необходимо производить суммирование по всем ионизирующимся компонентам.

Степень ионизации атомов плазмы в ОПЗ и вне его (вдали от частицы) разная. Это связано с дополнительными каналами ионизации и рекомбинации на поверхности частицы (8), что отличает ОПЗ от остального объема плазмы. В работах [5, 6] было предложено учитывать этот факт путем введения эффективного значения потенциала ионизации, зависящего от потенциала поля частицы. Этот метод сложен для применения в рассматриваемой системе, так как кроме термической ионизации учитывается УФ-ионизация.

Существует другой подход к этой проблеме, описанный в [7, 8, 9]. В равновесной плазме для носителей заряда применяется распределение Больцмана $n_e \sim \exp(e\varphi / kT)$, $n_i \sim \exp(-e\varphi / kT)$. Тогда ОПЗ можно рассматривать как область, где происходит отклонение плазмы от равновесия. Соответственно, концентрации электронов и ионов могут быть описаны распределениями

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right) + \delta n, \quad n_i = n_0 \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right) + \delta n, \quad (9)$$

где неравновесная добавка δn одинакова для электронов и ионов, так как генерация или рекомбинация электрона сопровождается появлением или исчезновением одного иона (при рассматриваемой температуре учитываются только однозарядные положительные ионы).

Зависимость неравновесной добавки от потенциала была определена в [7]:

$$\delta n = n_0 \frac{\exp \Phi - 1}{2 \cosh \Phi - 1},$$

откуда следуют распределения для электронов и ионов [8]:

$$n_e = n_0 \frac{\exp(2\Phi)}{2 \cosh \Phi - 1}, \quad (10a)$$

$$n_i = n_0 \frac{\exp(-2\Phi) + 2 \sinh \Phi}{2 \cosh \Phi - 1}, \quad (10b)$$

где $\Phi = e\varphi / kT$ - безразмерный потенциал.

В невозмущенной области плазмы вдали от частицы выполняется условие нейтральности (3) и невозмущенная концентрация по-прежнему определяется уравнением (4). У поверхности частицы концентрация электронов определяется уравнением (7), что позволяет определить потенциальный барьер, используя (10a):

$$\frac{n_0}{n_{es}} \exp\left(\frac{3V_b}{k_B T}\right) - \exp\left(\frac{2V_b}{k_B T}\right) + \exp\left(\frac{V_b}{k_B T}\right) - 1 = 0 \quad (11)$$

Нейтральность всего объема плазмы при наличии заряженных частиц определяется как

$$Zn_p = \bar{n}_e - \bar{n}_i, \tag{12}$$

где Z – средний заряд частиц в элементарных зарядах; n_p – их средняя концентрация; \bar{n}_e и \bar{n}_i – средние по всему объему значения электронной и ионной концентраций.

Средние значения концентраций можно вычислить, определив количество носителей заряда, приходящихся на одну частицу, т.е. рассчитав интегралы от распределений (10) по ячейке Вигнера-Зейтцы, которая определяется сферой радиуса $R_w = (3 / 4\pi n_p)^{1/3}$, описанной вокруг частицы:

$$N_{eW} = 4\pi \int_a^{R_w} r^2 n_e dr, \quad N_{iW} = 4\pi \int_a^{R_w} r^2 n_i dr. \tag{13}$$

Тогда средние по всему объему значения электронной и ионной концентраций равны: $\bar{n}_e = N_{eW} n_p$ и $\bar{n}_i = N_{iW} n_p$. Однако, для вычисления (13) необходимо знать пространственное распределение потенциала.

Распределение потенциала в окрестности частицы, вообще говоря, неизвестно, так как неизвестно решение сферически симметричного уравнения Пуассона-Больцмана [6]. В плоском случае решением является функция [5]

$$\Phi(r) = 2 \ln \left(\frac{1 + \tanh \frac{\Phi_s}{4} \cdot \exp \frac{a-r}{r_D}}{1 - \tanh \frac{\Phi_s}{4} \cdot \exp \frac{a-r}{r_D}} \right) = 4 \operatorname{atanh} \left(\tanh \frac{\Phi_s}{4} \cdot \exp \frac{a-r}{r_D} \right), \tag{14}$$

где $\Phi_s = V_b / kT$ – безразмерная высота барьера; $r_D = \sqrt{kT / 8\pi e^2 n_0}$ – длина экранирования (дебаевский радиус).

Анализ численного решения сферически симметричного уравнения Пуассона-Больцмана позволил на основе (14) сконструировать функцию, которая хорошо коррелирует с этим численным решением:

$$\Phi(r) = \left(4 + \frac{r_D}{a} \right) \cdot \operatorname{atanh} \left(\tanh \frac{\Phi_s}{4 + \frac{r_D}{a}} \cdot \frac{a}{r} \exp \frac{a-r}{r_D} \right), \tag{15}$$

причем, если высота потенциального барьера подчиняется условию

$$\exp \left| \frac{\Phi_s}{2} \right| \leq 10 \frac{r_D}{a}, \tag{16}$$

то функция (15) хорошо совпадает с известным потенциалом Дебая:

$$\varphi(r) = V_b \frac{a}{r} \exp \frac{a-r}{r_D}.$$

Эволюция концентрации ионов при остывании плазмы сварочного аэрозоля. Концентрация ионов в плазме сварочного аэрозоля представляет особый интерес, ввиду того, что ионы являются центрами ион-индуцированной нуклеации. При сварке штучными электродами источниками ионов являются

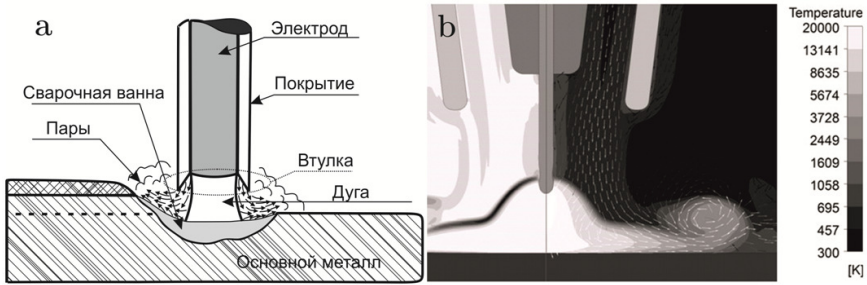


Рис. 1. Схема сварки штучным электродом (а) и компьютерное моделирование [9] сварки в защитном газе (б)

атомы щелочных металлов (калий и натрий), которые содержатся в покрытии электрода. Во время сварки металлический стержень электрода выгорает быстрее, чем его покрытие, поэтому образуется втулка, внутри которой происходит ионизация паров (рис. 1а). УФ-излучение дуги интенсивно поглощается щелочной присадкой, поэтому в окружающую среду проникает в основном длинноволновое излучение с энергией фотона $h\nu < 4.3\text{eV}$ (потенциал ионизации калия), что соответствует длине волны $\lambda > 288\text{nm}$.

Таким образом, в окружающую среду истекают уже ионизированные пары. Например, электрод УОНИ 13/55 содержит 3% калия и 6% натрия. Для каждого из металлов щелочной присадки вычисляется своя константа Саха: K_S^K и K_S^{Na} . Результирующая равновесная концентрация определяется уравнением (4), где исходные значения концентрации атомов определяются условием формирования паровоздушной смеси в результате смешения паров металлов с окружающим воздухом [11]:

$$n_{Aj} = \frac{P}{kT} \frac{g_j}{\mu_j} \left(\sum_j \frac{g_j}{\mu_j} + \frac{1}{\mu_\infty} \frac{T_0 - T}{T - T_\infty} \right)^{-1}, \quad (17)$$

где P – атмосферное давление, g_j – начальная массовая доля j -того компонента, μ_j – его молекулярная масса, μ_∞ – молекулярная масса окружающей среды (воздух – при сварке покрытыми электродами, защитный газ – при сварке в защитном газе), T_0 – начальная температура, T_∞ – температура окружающей среды. Текущая температура рассматриваемой области плазмы сварочного аэрозоля определяется уравнением

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (18)$$

где τ – постоянная времени смешения (определяется экспериментально).

Зависимость концентрации атомов щелочной присадки от температуры определяется из уравнений (17), зависимость равновесной невозмущенной концентрации – уравнением (4) и зависимости концентрации электронов и ионов –

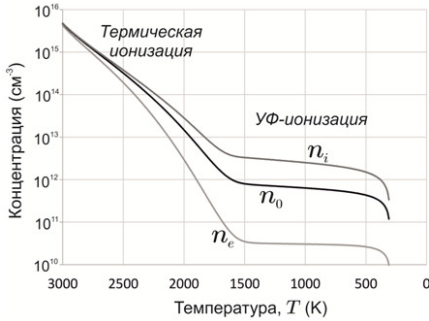


Рис. 2. Зависимости концентраций электронов и ионов от температуры паровоздушной смеси, при сварке штучными электродами (концентрация частиц $n_p = 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

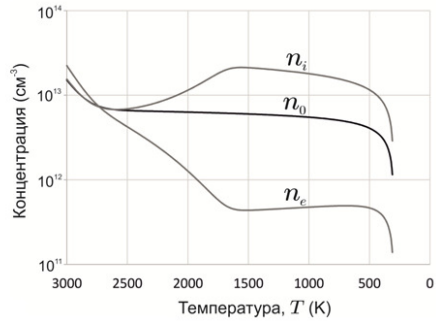


Рис. 3. Зависимости концентраций электронов и ионов от температуры парогазовой смеси, при сварке в защитном газе (концентрация частиц $n_p = 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

уравнениями (13) с учетом отклонения от равновесия в ОПЗ (10). Результирующие зависимости концентраций электронов и ионов от температуры паровоздушной смеси, образующейся при сварке штучными электродами, представлены на рис.2. Из расчетов следует, что отклонение от равновесия увеличивается с понижением температуры смеси, когда определяющую роль начинает играть УФ-ионизация. На рис.3 представлены зависимости концентраций электронов и ионов от температуры парогазовой смеси, образующейся при сварке в защитном газе для следующего исходного компонентного состава паров: железо – $g_{Fe} = 0.91$, марганец – $g_{Mn} = 0.07$, кремний – $g_{Si} = 0.015$, медь – $g_{Cu} = 0.005$.

При сварке в защитном газе влияние неравновесной ионизации выше, чем при сварке покрытыми электродами. Это обусловлено низкой равновесной степенью ионизации. При больших значениях потенциала ионизации атомов уравнение (8) дает величину поверхностной ионизации гораздо меньшую, чем при потенциале ионизации щелочных атомов. Это приводит к более заметному отклонению от равновесия за счет добавок к концентрации δn (9).

Если в защитный газ ввести щелочную присадку, то концентрация ионов в парогазовой смеси увеличится. Зависимости концентрации ионов от температуры парогазовой смеси для разного содержания калия в защитном газе приведены на рис.4. В начальный момент времени (при температуре 3000 К) смешения еще нет, и концентрация ионов определяется начальным составом паров. Однако по мере смешения паров с защитным газом, происходит увеличение концентрации ионов за счет ионизации атомов калия. Даже очень низкое содержание щелочной присадки (0.01%) приводит к существенному увеличению концентрации ионов и, соответственно, электронов, что должно оказывать воздействие на процессы нуклеации и роста зародышей.

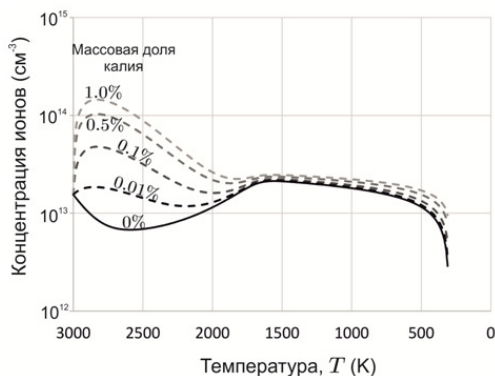


Рис. 4. Залежності концентрації іонів від температури парогазової суміші, при сварці в захисному газі з присадкою калію (концентрація частиць $n_p = 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

Експериментальне дослідження впливу вмісту щелочної присадки в захисному газі на дисперсний склад сварочного аерозолю. Для вивчення впливу вмісту присадки калію в захисному газі була використана експериментальна установка, схема якої представлена на рис.5. Сварочний аерозоль отримували в сварочній камері в процесі наплавки металу на обертаючийся (10б/мин) диск (діаметр 180 мм, товщина 12 мм) з низькоуглеродистого сталі Ст3 полуавтоматом інвертного типу «Патон ПСИ-250P DC MMA/MIG/MAG».

Параметри режиму наплавки електродної проволокою Св08Г2С діаметром 0,8мм: зворотня полярність (електродна проволока є позитивним, а наплавляється диск - негативним полюсами), постійний струм $95 \pm 5 \text{ А}$ і напруга $20 \pm 0,2 \text{ В}$, швидкість подачі проволоки $8,6 \pm 0,1 \text{ см/с}$. Во всіх дослідах підтримували постійними відстань між контактним наконечником і наплавляється диском (9 мм) і кут (90°), виміряний між диском і осью проволоки.

Введення присадки калію в захисний газ (CO_2) здійснювали за допомогою пневматичного медичного небулайзера (Vega Technologies Inc.) з сіткою з нержавіючої сталі (розмір ячеек 100 мкм). Для розпилення водного розчину карбонату калію використовувався потік (4 л/мин) сухої двоокси вуглероду. Утворюється при розпиленні аерозоль (середній діаметр крапель $\approx 6 \text{ мкм}$), поступає в камеру змішування/сушки через центральне отвір пористої пластини з нержавіючої сталі. Для ущільнення пористої пластини по периметру і в центральній отвір використовувалися тефлонові кільця. Додатковий супутній потік сухої двоокси вуглероду (5 л/мин) вводився в камеру змішування/сушки нижче пористої пластини. Додатковий потік необхідний для забезпечення рекомендованого потоку захисного газу в процесі сварки, сушки крапель розчину, і транспортування отриманого аерозолю час-

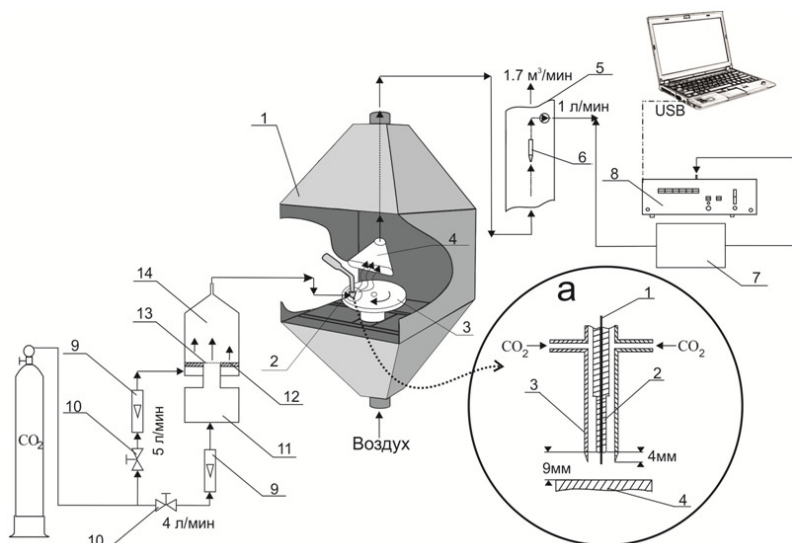


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – сварочная камера; 2 – сварочная горелка; 3 – вращающийся диск для наплавки металла; 4 – щелевой воздухозаборник; 5 – вертикально расположенная труба; 6 – наконечник пробоотборной трубки для изокINETического отбора проб; 7 – аэрозольный разбавитель; 8 – лазерный аэрозольный спектрометр; 9 – газовые ротаметры; 10 – газовые краны; 11 – небулайзер (распылитель) раствора карбоната калия; 12 – пористая пластина из нержавеющей стали; 13 – сетка из нержавеющей стали; 14 – камера смешения/сушки. Рис.5а Схема сварочной горелки: 1 – электродная проволока; 2 – контактный наконечник; 3 – газовое сопло сварочной горелки (внутренний диаметр 15 мм); 4 – диск для наплавки металла

тиц карбоната калия в газовое сопло сварочной горелки с минимальными потерями на осаждение в магистрали подачи защитного газа.

Массовый расход раствора в процессе распыления определяли путем измерения изменения массы небулайзера за время каждого испытания. Концентрацию присадки калия в защитном газе варьировали путем изменения концентрации карбоната калия в водном растворе в диапазоне 1÷25%. При измерениях счетной концентрации частиц сварочного аэрозоля использовался аэрозольный разбавитель с коэффициентом разбавления 230 для расхода потока пробы 1 л/мин. Дисперсный состав аэрозоля измеряли с помощью лазерного аэрозольного спектрометра ЛАС-П с каналами (мкм): 0.15-0.2; 0.2-0.25; 0.25-0.3; 0.3-0.4; 0.4-0.5; 0.5-0.7; 0.7-1.0; 1.0-1.5; >1.5 (Научно-исследовательский физико-химический институт имени Карпова, модель 9814.290.000). Измеренная с помощью ЛАС-П счетная концентрация ($1/\text{см}^3$) частиц сварочного аэрозоля в пробе, пересчитывалась на скорость образования (1/мин) частиц в процессе сварки, принимая во внимание расход воздуха $1,7 \text{ м}^3/\text{мин}$, удаляемого из сварочной камеры, и коэффициент разбавления пробы [12]. Результаты измерений

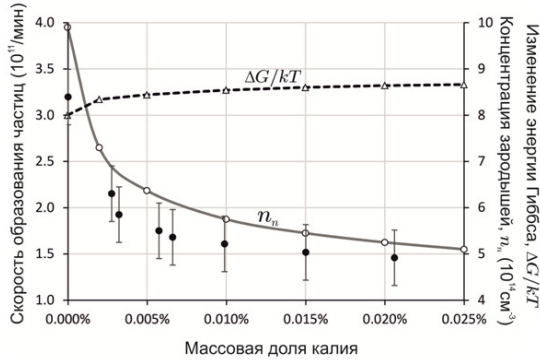


Рис. 6. Влияние массовой доли калия в защитном газе на скорость образования частиц сварочного аэрозоля

в зависимости от процентного содержания калия в защитном газе представлены на рис. 6.

Сварочный аэрозоль образуется в результате гетерогенной иониндуцированной нуклеации в парогазовой среде, насыщенной электронами. Поэтому, обмен зарядами и энергией между зародышами и средой влияет на процесс нуклеации. В работах [2, 13] было предложено следующее выражение для описания изменения свободной энергии Гиббса при нуклеации:

$$\Delta G = 4\pi r_n^2 \sigma - \frac{4}{3} \pi r_n^3 \frac{\rho k T \ln S}{m_a} + E_\sigma + E_{ex} + E_q, \tag{19}$$

где r_n – радиус зародыша, $\sigma = \sigma_0 r_n / (r_n + 2\delta)$ – поверхностное натяжение капли зародыша, σ_0 – поверхностное натяжение плоской поверхности, δ – длина Толмена, m_a – атомная масса конденсирующегося вещества, ρ – его плотность, S – перенасыщение конденсирующегося пара в парогазовой смеси.

Первые два члена в правой части уравнения (19) описывают классическую гомогенную нуклеацию. Величина E_σ – изменение поверхностного натяжения в результате образования двойного слоя в капле зародыша, которое в кулоновском приближении определяется как

$$E_\sigma \cong -\frac{Z_n V_b}{2},$$

где Z_n – заряд зародыша.

Величина E_{ex} – изменение свободной энергии в результате передачи энергии электроном при поглощении или эмиссии электрона:

$$E_{ex} = -Z_n \left(W_n + \frac{3}{2} kT \right),$$

где W_n – работа выхода.

Величина E_q – изменение свободной энергии в результате обмена зарядами, которое для проводящего зародыша определяется как

$$E_q = \frac{e^2}{2} \left(\frac{Z_n^2}{r_n} + \frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_i} \right),$$

где r_i – радиус иона.

Концентрация равновесных зародышей с радиусом $r_n = r_{eq}$, которая определяется минимумом функции $\Delta G(r_n)$, равна [2]

$$n_n = \frac{n_{a0}}{N_{an} + N_{an}^{-3/2} \exp \frac{\Delta G(r_{eq})}{kT}}, \quad (20)$$

где n_{a0} – исходная концентрация конденсирующихся атомов, N_{an} – количество атомов в зародыше: $N_{an} = 4\pi\rho r_n^3 / 3m_a$.

Зависимость концентрации зародышей (20) от массовой доли калия в защитном газе среде также представлена на рис.6. С увеличением доли калия концентрация зародышей уменьшается, что определяется межфазным взаимодействием в процессе нуклеации, которое приводит к росту отрицательного заряда зародыша с увеличением концентрации электронов в парогазовой среде. Увеличение концентрации электронов приводит к росту членов E_σ , E_{ex} , E_q в уравнении (19) и, соответственно, к увеличению изменения свободной энергии Гиббса в процессе нуклеации ΔG , что также продемонстрировано на рис.6. Как следует из (20), увеличение $\Delta G(r_{eq})$ приводит к снижению концентрации зародышей.

Исходная концентрация зародышей определяет все остальные процессы, происходящие при формировании агломератов первичных частиц – ингаляционных частиц сварочного аэрозоля, в том числе и скорость их образования при сварке в защитном газе. Корреляция между скоростью образования частиц сварочного аэрозоля и исходной концентрацией зародышей хорошо видна на рис.6.

Закключение. Поверхность заряженных конденсированных частиц является причиной смещения ионизационного равновесия в плазме, которое влияет на среднюю концентрацию электронов и ионов в плазме. Это самосогласованный процесс, так как концентрации носителей заряда определяют заряд зародышей, а заряд зародышей влияет на сам процесс нуклеации, т.е. на размер и концентрацию зародышей.

Добавление присадки калия в защитный газ приводит к увеличению концентрации носителей заряда в плазме сварочного аэрозоля, что вызывает увеличение отрицательного заряда зародышей и рост изменения свободной энергии Гиббса при нуклеации. Это является причиной уменьшения концентрации зародышей и, соответственно, уменьшения скорости образования ингаляционных частиц сварочного аэрозоля.

Таким образом, введение незначительных присадок калия (менее 0,1%) в защитный газ позволяет минимизировать негативное воздействие сварочного аэрозоля на здоровье сварщиков, также приводит к поглощению коротковолнового УФ-излучения дуги и способствует снижению интенсивности образования токсичного озона в процессе сварки.

Литература:

1. *Вишняков В.И., Киро С.А., Опря М.В., Эннан А.А.* Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. Часть V. Формирование конечных агломератов. // Физика аэродисперсных систем. - 2014. - Вып. 51. - С. 87-98
2. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Ennan, A.A.* Formation of primary particles in welding fume // Journal of Aerosol Science. – 2013. - V. 58. - P. 9-16.
3. *Pal' A.F., Starostin A.N., Filippov A.V.* Charging of dust grains in a nuclear-induced plasma at high pressures // Plasma Physics Reports. – 2001. - V. 27(2). - P. 143-152.
4. *Dresser M.J.* The Saha-Langmuir equation and its application // Journal of Applied Physics. – 1968. - V. 39. - P. 338-339.
5. *Vishnyakov V.I., Dragan, G.S.* Electrostatic interaction of charged planes in the thermal collision plasma: Detailed investigation and comparison with experiment // Physical Review E. - 2005. V. 71, 016411(1-9).
6. *Vishnyakov V.I., Dragan G.S., Evtuhov, V.M.* Nonlinear Poisson-Boltzmann equation in spherical symmetry // Physical Review E. - 2007. – V. 76, 036402(1-5).
7. *Vishnyakov V.I.* Interaction of dust grains in strong collision plasmas: Diffusion pressure of nonequilibrium charge carriers // Physics of Plasmas. - 2005. – V. 12, 103502(1-6).
8. *Vishnyakov V.I.* Electron and ion number densities in the space charge layer in thermal plasmas // Physics of Plasmas. - 2006. – V. 13, 033507(1-4).
9. *Vishnyakov V.I., Dragan, G.S.* Ordered spatial structures of dust grains in the thermal plasma // Physical Review E. – 2006. - V. 73, 026403(1-7).
10. *Dreher M., Füssel U., Schnik M.* Simulation of shielding gas flow inside the torch and in the process region of GMA welding // Mathematical Modelling of Weld Phenomena 9, Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2009. – P. 127-138.
11. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A.* Effects of shielding gas temperature and flow rate on the welding fume particle size distribution // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 55-61.
12. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Shvetz O.I., Ennan, A.A.* Nonequilibrium ionization of welding fume plasmas; Effect of potassium additional agent on the particle formation // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 113. – P. 178-188.
13. *Vishnyakov V.I., Kiro, S.A., Ennan A.A.* Heterogeneous ion-induced nucleation in thermal dusty plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2011. – V. 44, 215201(1-7).

Вишняков В. І., Опря М. В., Еннан А. А.-А.

Вплив лужної присадки у захисному газі на дисперсний склад зварювального аерозолю.

АНОТАЦІЯ

Досліджено іонізаційний баланс у плазмі зварювального аерозолю при електродуговому зварюванні металів у захисному газі. Присутність конденсованих частинок спричиняє іонізацію атомів газу на поверхні частинок і призводить до зміщення іонізаційного балансу в області просторового заряду навколо частинки. Тому, середні концентрації електронів та іонів у плазмі змінюються в присутні заряджених частинок. Це впливає на процес утворення зародків та, відповідно, змінює швидкість утворення частинок зварювального аерозолю. Виміряні швидкості утворення частинок при різному вмісті домішок калію в захисному газі. Розрахункова концентрація зародків при різному вмісті домішок калію в захисному газі добре корелює з одержаними експериментальними даними.

Vishnyakov V.I., Oprya M.V., Ennan A. A.-A.

Effect of alkaline additional agent in shielding gas on disperse composition of welding fume.

SUMMARY

The ionization balance in the welding fume plasma is studied for gas metal arc welding. The presence of condensed particles causes the ionization of gas atoms on the particle surface and leads to ionization balance displacement in the space charge layer around particle. Therefore, the average electron and ion number densities are changed, when charged particles are present in the plasma. It leads to the nucleation process change and, accordingly, influences the fume formation rate. The measured particle formation rates for different potassium additives in the shielding gas are presented. The calculated nuclei number densities for gas metal arc welding with potassium additive, which correlates well with experimental data, are demonstrated.