

## ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК: 621.791; 533.9

**Вишняков В. И.<sup>1</sup>, Козицкий С. В.<sup>2</sup>, Эннан А. А.-А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса

<sup>2</sup>Национальный университет «Одесская морская академия», г. Одесса

E-mail: drvishnyakov@mail.ru

### Ионизационное равновесие в зоне нуклеации плазмы сварочного аэрозоля

*Рассмотрены механизмы ионизации плазмы, образованной в сварочном аэрозоле при сварке в защитном газе. Показано, что при гетерогенной ион-индуцированной конденсации паров железа образуется настолько большое число зародышей, что их концентрация значительно превосходит концентрации ионов плазмы. Это вызывает захват свободных электронов зародышами. В результате формируется ионно-пылевая плазма, в которой основным механизмом ионизации атомов является поверхностная ионизация.*

**Ключевые слова:** сварочный аэрозоль, плазма, ионизационное равновесие, поверхностная ионизация.

**Введение.** Ионизационное равновесие в низкотемпературной комплексной плазме, содержащей электроны, ионы и атомы, без дополнительных источников ионизации определяется ионизацией атомов электронным ударом и описывается хорошо известным уравнением Саха [1].

Существует двухкомпонентная электронно-пылевая плазма [2, 3] которая возникает, например, при эмиссии электронов горячими частицами пыли в вакууме или буферном газе, которая не имеет каналов ионизации и рекомбинации, обусловленных столкновениями электронов с атомами и ионами. Равновесное состояние такой плазмы описывается балансом потока эмиссии электронов и обратного потока, обусловленного столкновениями электронов с частицами пыли.

Однако может существовать и другой вид двухкомпонентной плазмы, когда концентрация электронов  $n_e$  много меньше концентрации ионов  $n_i$  и пылевых частиц  $n_p$ . В этом случае условие нейтральности представляется в виде  $n_i = -Z_p n_p$ , где  $Z_p$  – среднее значение зарядового числа частиц, и наличием электронов можно пренебречь. Такая плазма возникает в конденсирующемся газе (конденсация продуктов сгорания в пламени, конденсация водяного пара в тропосфере, конденсация паров металлов в плазме сварочного аэрозоля и пр.), когда концентрация сконденсированных зародышей может быть больше, чем концентрация ионов, обусловленных равновесной термической ионизацией.

Частота электрон-ионных столкновений  $f_{ei} = n_i v_{Te} \pi b_0 \ln \Lambda$ , где  $v_{Te}$  – тепловая скорость электронов:  $v_{Te} = \sqrt{8kT / \pi m_e}$ ,  $b_0 = e^2 / 3kT$  – прицельный параметр [4],

$\ln \Lambda = \ln(r_D / b_0)$  – кулоновский логарифм,  $r_D = \sqrt{kT / 8\pi e^2 \sqrt{n_e n_i}}$  – длина экранирования. Частота столкновений электронов с нейтральными частицами радиусом  $r_p$   $f_{ep} = n_p v_{Te} \pi r_p^2$  при большой концентрации частиц может быть больше, чем  $f_{ei}$ .

Например, плазма сварочного аэрозоля представляет собой остывающую смесь высокотемпературных паров металла и защитного газа. При остывании смеси до температуры  $T \sim 2700\text{К}--2800\text{К}$  начинается нуклеация [5]. Начальная концентрация атомов железа, которое является основным компонентом паров, составляет  $n_A \sim 10^{18} \text{см}^{-3}$ . Уравнение Саха дает значение равновесной концентрации электронов и ионов  $n_{e(i)} \sim 10^{13} \text{см}^{-3}$ . Равновесная концентрация сконденсированных зародышей  $n_p \sim 10^{15} - 10^{16} \text{см}^{-3}$  радиусом  $r_p \sim 0.3 \text{нм}$ . Конденсация представляет собой гетерогенную ион-индуцированную нуклеацию. Поэтому изначально зародыши заряжены положительно. В этих условиях электроны захватываются зародышами, нейтрализуя их. Таким образом, возникает ионно-пылевая плазма [6], в которой  $f_{ep} \gg f_{ei}$  и электроны продолжают захватываться каплями зародышей, заряжая их отрицательно.

В настоящей статье рассматриваются особенности ионизационного равновесия в такой ионно-пылевой плазме, возникающей в зоне нуклеации сварочного аэрозоля.

**Ионизационное равновесие комплексной плазмы с учетом УФ-ионизации.** Плазма сварочного аэрозоля отличается наличием мощного источника ультрафиолетового излучения, каковым является дуга. Генерация электронов и ионов излучением определяется уравнением

$$\frac{dn_{e(i)}}{dt} = \pi r_a^2 n_a j_{ph} \equiv Q_{UV}, \quad (1)$$

где  $r_a$  – радиус атома,  $n_a$  – текущая концентрация атомов,  $j_{ph}$  – плотность потока фотонов с энергией, превышающей потенциал ионизации атомов  $I = 7.9 \text{эВ}$  (для железа), которая определяется интегрированием по распределению Планка:

$$j_{ph} = \xi \frac{2\pi(kT_{arc})^3}{c^2 h^3} \int_{I/kT_{arc}}^{\infty} \frac{x^2 dx}{\exp x - 1}, \quad (2)$$

где  $\xi \sim 0.3$  – коэффициент рассеяния,  $c$  – скорость света,  $h$  – постоянная Планка,  $T_{arc}$  – эффективная температура дуги,  $k$  – постоянная Больцмана.

При сварке в защитном газе наблюдаемая мощность коротковолнового УФ-излучения составляет  $\sim 5 \text{Вт/м}^2$ , что соответствует эффективной температуре дуги  $T_{arc} \sim 5000 \text{К}$  и обеспечивает плотность потока фотонов с энергией  $h\nu \geq 7.9 \text{эВ}$  равную  $j_{ph} \sim 10^{16} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ .

Интенсивность ионизации атомов электронным ударом равна [1]

$$Q_V^{ion} = n_e n_a k_{ion}, \quad (3)$$

где  $k_{ion} = \pi r_a^2 v_{Te}$  - константа скорости ионизации.

Интенсивность трехчастичной рекомбинации равна

$$Q_V^{rec} = n_e^2 n_i k_{rec}, \quad (4)$$

где  $k_{rec} = k_{ion} / K_S$  – константа скорости рекомбинации,  $K_S$  – константа Саха для термической ионизации:

$$K_S = \frac{\sum_i v_e \exp \frac{-I}{kT}}{\sum_a},$$

где  $\sum_i$  и  $\sum_a$  – статистические веса ионов и атомов соответственно,  $v_e = 2(m_e kT / 2\pi\hbar^2)^{3/2}$  - эффективная плотность состояний электронов.

При обычной термической ионизации баланс уравнений (3) и (4):  $Q_V^{ion} = Q_V^{rec}$  приводит к уравнению Саха

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = K_S. \quad (5)$$

При наличии УФ ионизации баланс следует описывать иным уравнением:

$$Q_{UV} + Q_V^{ion} = Q_V^{rec}. \quad (6)$$

В этом случае равновесная ионизация описывается уравнением

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = K_S \left( 1 + \frac{j_{ph}}{n_e v_{Te}} \right). \quad (7)$$

В отсутствие пылевой компоненты (до начала нуклеации) нейтральность плазмы означает, что  $n_e = n_i = n_0$ , где  $n_0$  – невозмущенная концентрация, которая определяется, как следует из (7), решением уравнения

$$n_0^3 + K_S n_0^2 - K_S \left( n_A - \frac{j_{ph}}{v_{Te}} \right) n_0 - K_S n_A \frac{j_{ph}}{v_{Te}} = 0$$

и в области температур  $T > 2000$  К практически не отличается от значений, полученных из уравнения Саха (5) при заданной плотности потока фотонов.

**Нуклеация.** Пары металлов, истекающие из зоны дуги находятся при температуре  $T_0 \sim 3000$  К. Они смешиваются с защитным газом, температура которого составляет  $T_{sg} = 300$  К и остывают. Для описания системы используется отслеживание эволюции модельного объема парогазовой смеси. Ввиду того, что парогазовая смесь представляет собой турбулентный поток, распространяющийся со скоростью  $\sim 1-3$  м/сек, каждый момент времени эволюции модельного объема соответствует некоторой области пространства в окрестности дуги. Поэтому, такое рассмотрение позволяет отследить все процессы, происходящие в сварочном аэрозоле.

Температура парогазовой смеси в модельном объеме описывается выражением [7]

$$T = T_{sg} + (T_0 - T_{sg}) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{mix}}\right), \quad (8)$$

где  $\tau_{mix}$  – постоянная времени смешения, определяемая экспериментально. В рассматриваемой системе  $\tau_{mix} = 1.7$  мс [8].

Концентрация конденсирующихся атомов в парогазовой смеси также изменяется во времени, что описывается выражением

$$n_{Aj} = \frac{P}{kT} g_j, \quad g_j = \frac{g_{j0}}{\mu_j \sum_j \frac{g_{j0}}{\mu_j} + \frac{\mu_j}{\mu_{sg}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{mix}}\right)}, \quad (9)$$

где  $P$  – атмосферное давление,  $g_{j0}$  – исходная массовая доля компонента в парах,  $\mu$  – молекулярная масса.

Концентрации носителей заряда плазмы определяются суммой решений уравнения Саха (5) для каждого компонента. Таким образом, начальная область эволюции парогазовой смеси является равновесной термической плазмой, так как влиянием УФ-излучения можно пренебречь. В рассматриваемой системе исходная доля паров железа  $g_{Fe0} = 0,97$ , что при температуре 3000К обеспечивает концентрацию атомов железа  $n_A = 2.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и невозмущенную концентрацию носителей заряда  $n_0 = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

В процессе остывания парогазовой смеси происходит увеличение перенасыщения паров:  $S_j = P_j / P_{j,sat}$ , где  $P_j = g_j P$  – парциальное давление компонента,  $P_{j,sat}$  – давление насыщенного пара, которое определяется формулой Антуана  $P_{sat} = A \exp(-B/T)$ ,  $A$  и  $B$  – индивидуальные для каждого вещества константы. При температуре  $\sim 2780$ К перенасыщение железав рассматриваемой системе достигает значения при котором начинается нуклеация [9-11]. Концентрация образованных зародышей описывается выражением

$$n_n = \frac{n_{a0}}{N_{an} + N_{an}^{-3/2} \exp\left(\frac{\Delta G(r_n)}{kT}\right)}, \quad (10)$$

где  $n_{a0}$  – концентрация атомов железа до начала нуклеации,  $N_{an} = 4\pi r_n^3 \rho / 3m_a$  – количество атомов в одном зародыше,  $r_n$  – радиус зародыша,  $\rho$  – плотность,  $m_a$  – атомная масса железа,  $\Delta G(r_n)$  – изменение свободной энергии Гиббса при образовании зародыша радиусом  $r_n$  [10].

При заданных условиях концентрация зародышей составляет  $n_n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что гораздо больше равновесной концентрации электронов и ионов, которая в зоне нуклеации составляет  $n_0 = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При этом концентрация атомов железа в газовой фазе падает до значения  $n_A = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  за счет того, что часть атомов перешла в жидкую фазу зародышей. В таких условиях частота столкновений электронов с зародышами гораздо выше частоты столк-

новений с ионами. Поэтому электроны захватываются зародышами, сначала нейтрализуя их, а затем отрицательно заряжая часть из них, формируя таким образом ионно-пылевую плазму.

**Поверхностная ионизация.** Образование в системе большого числа зародышей приводит к появлению дополнительного канала ионизации/рекомбинации за счет взаимодействия атомов и ионов с поверхностью зародышей. Степень поверхностной ионизации атомов описывается уравнением Саха-Ленгмюра [12]

$$\alpha_s = \frac{n_{is}}{n_{as}} = \frac{\sum_i}{\sum_a} \exp \frac{W_p - I}{kT}, \quad (11)$$

где  $n_{is}$ , и  $n_{as}$  – концентрации ионов и атомов железа у поверхности зародыша,  $W_n$  – работа выхода электрона из зародыша, которая отличается от работы выхода для материала частицы (железо)  $W$  за счет кривизны поверхности [13],  $W_n = W + 0.39e^2 / r_n$ .

Изменение концентрации носителей заряда за счет поверхностной ионизации атомов описывается уравнением

$$Q_s^{ion} = n_a n_n v_{Ta} \sigma_{an} \beta_s, \quad (12)$$

где  $n_n$  – концентрация зародышей;  $v_{Ta}$  – тепловая скорость атомов;  $\sigma_{an} = \pi r_n^2$  – сечение столкновений атомов с зародышами;  $\beta_s = \alpha_s / (1 + \alpha_s)$  – коэффициент поверхностной ионизации атомов при пренебрежении энергией десорбции ионов [14].

Изменение концентрации носителей заряда за счет поверхностной рекомбинации ионов описывается уравнением

$$Q_s^{rec} = n_i n_n v_{Ti} \sigma_{in} \gamma_s, \quad (13)$$

где  $v_{Ti} \cong v_{Ta}$  – тепловая скорость ионов;  $\sigma_{in} = \pi r_n^2 \left( 1 - \frac{e^2 Z_n}{r_n kT} \right)$  – сечение столкновений ионов с зародышем [15];  $eZ_n$  – заряд зародыша;  $\gamma_s = 1 / (1 + \alpha_s)$  – коэффициент поверхностной рекомбинации ионов при пренебрежении энергией десорбции атомов.

Необходимо также учесть эмиссию электронов с поверхности зародыша за счет термоэлектронной эмиссии и внешнего фотоэффекта. Термоэлектронная эмиссия описывается уравнением Ричардсона-Дэшмана:

$$j_e^T = \frac{4\pi m_e (kT)^2}{(2\pi\hbar)^3} \exp\left(-\frac{W_n}{kT}\right) = \frac{1}{4} v_e v_{Te} \exp\left(-\frac{W_n}{kT}\right).$$

Тогда интенсивность образования электронов за счет термоэмиссии

$$Q_{em}^T = \pi r_n^2 n_n v_e v_{Te} \exp\left(-\frac{W_n}{kT}\right), \quad (14)$$

и интенсивность образования электронов за счет внешнего фотоэффекта

$$Q_{em}^{ph} = \pi r_n^2 n_n j_{ph} Y_n, \quad (15)$$

где  $Y_n \sim 0.1$  – квантовый выход.

Поглощение электронов зародышами за счет столкновений

$$Q_e^{ads} = n_e n_n \sigma_{en} v_{Te}, \quad (16)$$

где сечение столкновений

$$\sigma_{en} = \pi r_n^2 \left( 1 + \frac{e^2 Z_n}{r_n kT} \right).$$

Учитывая объемные (1, 3, 4) и поверхностные (12-15) процессы можно составить балансовые уравнения отдельно для электронов и ионов:

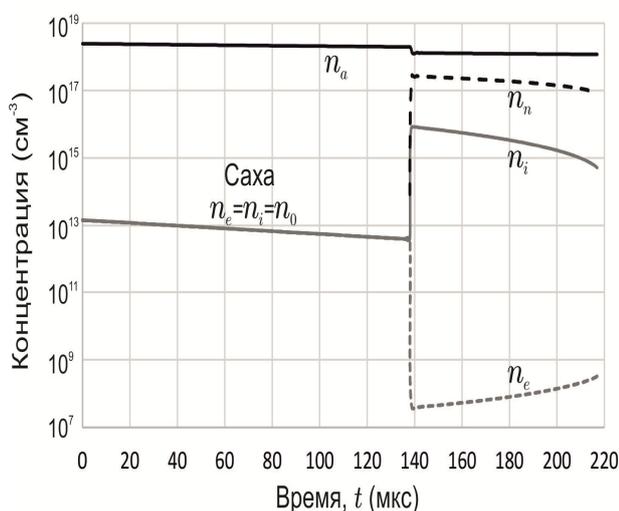
$$Q_{UV} + Q_V^{ion} + Q_{em}^T + Q_{em}^{ph} = Q_V^{rec} + Q_e^{ads}, \quad (16)$$

$$Q_{UV} + Q_V^{ion} + Q_s^{ion} = Q_V^{rec} + Q_s^{rec}. \quad (17)$$

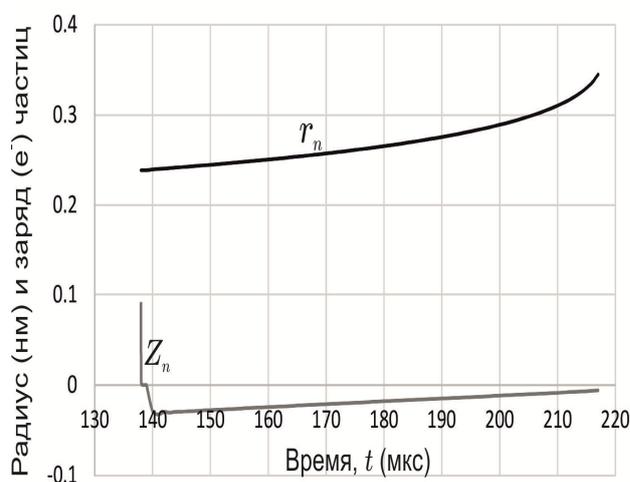
Решение уравнений (16) и (17) дает значения концентраций электронов  $n_e = 4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  и ионов  $n_i = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , которая значительно превосходит концентрацию электронов. При этом основным механизмом ионизации является поверхностная ионизация, интенсивность которой составляет  $Q_s^{ion} = 7 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , в то время как интенсивность объемной термической ионизации снижается до значения  $Q_V^{ion} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

На рис.1 представлено изменение во времени концентрации атомов железа, электронов, ионов и зародышей от начала смешивания паров с защитным газом при температуре 3000К до завершения процесса нуклеации при температуре 2680К.

До начала нуклеации ( $t = 0 - 138 \text{ мкс}$ ) ионизационное равновесие в плазме описывается уравнением Саха (5). С появлением первых зародышей открываются новые каналы ионизации и рекомбинации, что приводит к резкому увеличению концентрации ионов. Однако равновесная концентрация зародышей (10) оказывается ещё выше. Так как ионы являются центрами конденсации, число образованных зародышей не может превышать числа ионов. Поэтому установление равновесного числа зародышей представляет собой некий процесс, растянутый во времени, который включает в себя дополнительную ионизацию



**Рис. 1.** Эволюция концентраций атомов, зародышей и носителей заряда



**Рис. 2.** Эволюция среднего радиуса и заряда зародыша в зоне нуклеации

атомов плазми и образования дополнительных ионов до тех пор, пока не установится равновесие. Весь этот процесс занимает промежуток времени  $\sim 1$  мкс.

На рис.2. представлена эволюция среднего радиуса зародыша и его среднего заряда в зоне нуклеации. После нейтрализации положительно заряженных зародышей на первой микросекунде нуклеации, они приобретают отрицательный заряд за счет столкновений с электронами, который со временем уменьшается. Значение зарядового числа  $|Z_n| < 1$  следует понимать как вероятность того, что зародыш содержит 1 лишний электрон.

Таким образом, при сварке в защитном газе в процессе нуклеации происходит изменение механизма ионизации плазмы сварочного аэрозоля. Окончание нуклеации происходит с исчезновением барьера активации роста. После этого начинается рост жидких зародышей за счет конденсации паров и коагуляции [16].

**Заключение.** В процессе конденсации паров железа, образованных в результате испарения сварочных и свариваемых материалов при электродуговой сварке в защитном газе, формируется большое число зародышей, концентрация которых значительно превосходит равновесную концентрацию носителей заряда плазмы. Это приводит к захвату свободных электронов плазмы зародышами и формированию ионно-пылевой плазмы, где основным механизмом ионизации атомов газовой фазы является поверхностная ионизация.

Следует отметить, что такая смена механизма ионизации возможна только при отсутствии присадки щелочных металлов, так как их наличие приводит к увеличению концентрации ионов и уменьшению концентрации зародышей, что было продемонстрировано экспериментально [17].

#### Литература:

1. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. – М.: Мир, 1976. – 496 с.
2. Vishnyakov V. I., Dragan G. S. Thermoemission (dust-electron) plasmas: Theory of neutralizing charges // Phys. Rev. E. – 2006. – Vol.74. – P.036404.
3. Vishnyakov V. I. Attraction of likely charged nano-sized grains in dust-electron plasmas. // Phys. Plasmas. – 2016. – Vol.23. – P.013708.
4. Smirnov B. M. Kinetics of electrons in gases and condensed system. // Physics-Uspokhi – 2002. – Vol.45. – P.1251-1286.
5. Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Ennan, A. A. Formation of primary particles in welding fume // Journal of Aerosol Science. – 2013. – Vol. 58. – P. 9-16.
6. Вишняков В. И., Киро С. А., Кабаненко Р. В. Методика зондовой диагностики плазмы сварочного аэрозоля. // Физика аеродисперсных систем. - 2018. – №55. – С.114-122.
7. Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Oprya M. V., Ennan A. A. Effects of shielding gas temperature on the welding fume particle formation: Theoretical model. // J. Aerosol Sci. – 2018. – Vol.124. – P.112-121.

8. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Oprya M. V., Chursina, O. D., Ennan A. A.* Numerical and experimental study of the fume chemical composition in gas metal arc welding. // *Aerosol Science and Engineering* – 2018. – Vol.2. – P.109-117.
9. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Ennan A. A.* Heterogeneous ion-induced nucleation in thermal dusty plasmas // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – Vol.44. – P.215201.
10. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Ennan A. A.* Formation of primary particles in welding fume. // *Journal of Aerosol Science.* – 2013. – Vol.58. – P.9-16.
11. *Вишняков В. И., Киро С. А., Эннан А. А.* Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. 1. Конденсация ненасыщенных паров. // *Физика аеродисперсных систем.* – 2011. – № 48. – С.91-105.
12. *Зандберг Э. Я., Ионоу Н. И.* Поверхностная ионизация. – М.: Наука, 1969. – 432 с.
13. *Смирнов Б. М.* Процессы в плазме и газах с учетом кластеров // *УФН.* – 1997. – Т.167, №11. – С.1169-1200.
14. *Vishnyakov V. I., Dragan G. S.* Ionization balance in the contact plasma-solid state. // *Ukrainian Journal of Physics.* – 2004. – Vol.49. – P.229-235.
15. *Олеванов М. А., Манкелевич Ю. А., Рахимова Т. В.* Скорость коагуляции пылевых частиц в низкотемпературной плазме. // *ЖТФ.* – 2003. – Т.3. – С. 51-60.
16. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Ennan A. A.* Bimodal size distribution of primary particles in the plasma of welding fume: Coalescence of nuclei. // *Journal of Aerosol Science.* – 2014. – Vol.67. – P.13-20.
17. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Oprya M. V., Shvets 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. – Vol. 113. – P. 178-188.

***Вишняков В. И., Козицкий С. В., Эннан А. А.-А.***

## **Іонізаційна рівновага в зоні нуклеації плазми зварювального аерозолю**

### **АНОТАЦІЯ**

*Вивчені механізми іонізації плазми, яка була сформована в зварювальному аерозолі при зварки в захисному газі. Потік парів металів, який спливає із зони дуги, змішується з захисним газом та формує парогазову суміш. Іонізація атомів парогазової суміші відбувається електронним ударом та описується відомим рівнянням Саха. Дуга є потужним джерелом ультрафіолетового випромінювання, яке викликає додаткову іонізацію атомів парогазової суміші. Проте показано, що у діапазоні температур, який відповідає області начального змішування, іонізацією атомів ультрафіолетовим випромінюванням можна знехтувати по зрівнянню з термічної іонізацією.*

*В процесі змішування відбувається охолодження парів, при цьому росте їх перенасичення, в тому числі основного компоненту – заліза. При зменшенні температури парогазової суміші до деякого значення, відбувається інтенсивна гетерогенна іоніндукована конденсація парів заліза. При цьому концентрація сформованих зародків надається значно вище концентрації іонів плазми. Це призводить до того, що частота зіткнень електронів з зародками більш ніж з іонами, що обумовлює захоплення елект-*

ронів зародками. Зниження концентрації вільних електронів викликає зменшення інтенсивності іонізації атомів електронним ударом. Основним механізмом іонізації атомів плазми стає поверхнева іонізація на зародках.

Таким чином формується іонно-пилорова плазма, основними компонентами якої є іони та заряджені краплі зародків, які розчинені в буферному газі. Іонізаційна рівновага в такій плазмі визначається взаємодією іонів та атомів з поверхнею частинок, в даному випадку – зародками. Приведені розраховані залежності від часу значення концентрацій атомів заліза, електронів, іонів та зародків в процесі охолодження парогазової суміші. До початку конденсації іонізаційна рівновага в плазмі описується рівнянням Саха. З початком конденсації змінюється механізм іонізації, в результаті, іонізаційна рівновага визначається міжфазною взаємодією.

Слід зазначити, що така зміна механізму іонізації можлива тільки при відсутності присадки лужних металів, так як їх наявність призводить до збільшення концентрації іонів і зменшення концентрації зародків.

**Ключові слова:** зварювальний аерозоль, плазма, іонізаційна рівновага, поверхнева іонізація.

**Vishnyakov V. I., Kozytskyi S. V., Ennan A. A.-A.**

## **Ionization balance in the nucleation zone of welding fume plasmas**

### *SUMMARY*

*The ionization mechanisms of the plasma, which is formed in welding fumes from the gas metal arc welding, are studied. Effused from arc the metal vapors mix with shielding gas and form a vapor-gas mixture. The ionization of vapor-gas mixture atoms' occurs via electron impact and is described by well-known Saha equation. The arc is the strong source of the ultra-violet radiation, which provides the additional atom ionization. However, it is demonstrated, that in temperature interval, which corresponds to initial mixing area, the ultra-violet atom ionization in comparison with thermal ionization can be neglected.*

*The vapors cools in the mixing process, and provide supersaturation increase, including the supersaturation of iron as a predominant component. When vapor-gas mixture cools down to some temperature value, the intense heterogeneous ion-induced nucleation is started. The nucleus number density is much more than ion number density, and the collision frequency of electrons with nuclei is much more, than with ions. It causes the capture of electrons by nuclei. The decrease of free electron number density causes decrease of the ionization rate via electron impact. The surface atom ionization becomes the base ionization mechanism.*

*Thus the dust-ion plasma, which has the ions and charged nuclei as the base components in the buffer gas, is formed. The ionization balance in such a plasma is determined by the atom and ion interaction with surface of the particles, the nuclei in the system under consideration. The calculated dependencies on time of the condensable atom, electron, ion and nucleus number densities are demonstrated for the vapor-gas mixture cooling. The ionization balance is determined by Saha equation before nucleation. When nucleation started, the ionization mechanism is changed and ionization balance becomes determined by interphase interaction.*

*It should be taken into account that such a change of the ionization mechanism can occur only if the alkali metal additional agents are absent in the plasma, because their presence leads to ion number density increase and nucleus number density decrease.*

**Keywords:** welding fumes, plasma, ionization balance, surface ionization.