

ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК: 621.791; 533.9

Вишняков В. И., Киро С. А., Опря М. В., Эннан А. А.

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

Влияние защитного газа на распределение частиц сварочного аэрозоля по размерам.

Рассмотрено влияние температуры и расхода защитного газа на дисперсный состав частиц сварочного аэрозоля, образующихся при дуговой сварке металлов в защитном газе. Показаны зависимости бимодального распределения частиц по размеру от температуры в диапазоне от 300 до 600К и расхода защитного газа (CO₂) в диапазоне от 6 до 12 л/мин. Увеличение температуры защитного газа приводит к перераспределению конденсированного вещества между модами распределения и укрупнению ингаляционных частиц сварочного аэрозоля

Введение. Дуговая сварка в защитном газе плавящимся электродом широко используется не только при механизированной, но и при автоматической и роботизированной сварке металлов и сплавов во многих отраслях промышленности. В процессе сварки высокотемпературные пары металлов образуются в результате испарения расплавленного металла на торце сварочной проволоки, с поверхности капель, которые переносятся в сварочную ванну, и поверхности самой сварочной ванны. Часть паров выносятся конвекцией из области дуги и быстро охлаждается в процессе смешения с защитным газом и окружающим воздухом и образует парогазовую смесь. Наночастицы металла образуются в результате конденсации паровой фазы, роста и коалесценции зародышей, они окисляются, отвердевают и формируют наноразмерные первичные частицы [1-3]. Впоследствии первичные частицы коагулируют и образуют токсичные ингаляционные частицы сварочного аэрозоля (СА) размером до микрометра, представляющие опасность для здоровья сварщиков и окружающей среды [4]. Размер частиц СА определяет их высокую проникающую способность в дыхательную систему - осаждаются преимущественно в альвеолярной области, где механизмы быстрой очистки не эффективны [5, 6]. Поэтому, исследования, позволяющие проследить взаимосвязь распределения ингаляционных частиц СА по размерам и параметров режима дуговой сварки в защитном газе, имеют большое прикладное значение и направлены на создание безопасных условий труда в сварочном производстве.

Предыдущие исследования дуговой сварки в защитном газе показали, что процесс сварки зависит от свойств защитного газа [7-9]; в частности, уста-

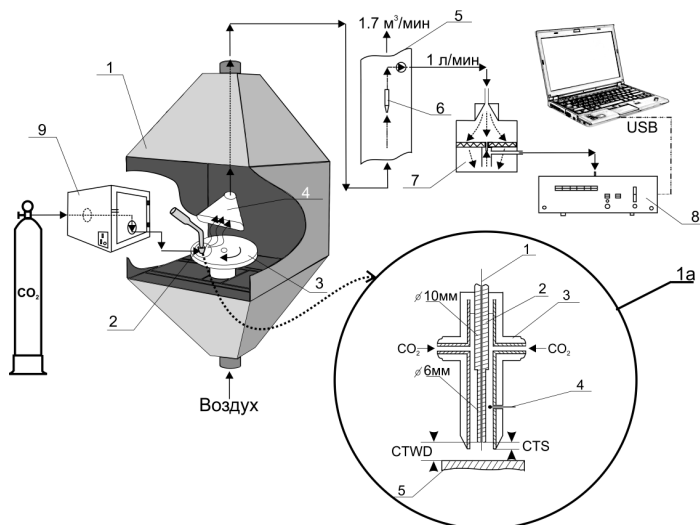


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – сварочная камера; 2 – сварочная горелка; 3 – вращающийся диск для наплавки металла; 4 – щелевой воздухозаборник; 5 – вертикально расположенная труба; 6 - наконечник пробоотборной трубки для изокинетического отбора проб; 7 – аэрозольный разбавитель; 8 - лазерный аэрозольный спектрометр; 9 – муфельная электропечь. Рис.1а. Схема сварочной горелки: 1 – электродная проволока; 2 – контактный наконечник; 3 – газовое сопло сварочной горелки (внутренний диаметр 15 мм) с теплоизоляцией; 4 – термопара; 5 - вращающийся диск для наплавки металла; CTWD – расстояние между контактным наконечником и диском (9 мм); CTS – зазор между контактным наконечником и срезом газового сопла (4 мм)

новлена зависимость распределения ингаляционных частиц СА по размерам от расхода защитного газа [10-11].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния температуры и расхода защитного газа (CO₂) на дисперсный состав ингаляционных частиц СА, образующихся при дуговой сварке в защитном газе.

Экспериментальная установка. На рис.1 показана принципиальная схема экспериментальной установки, которая использовалась при измерении распределения ингаляционных частиц по размерам. СА получали в сварочной камере в процессе наплавки металла на вращающийся (1об/мин) диск (диаметр 180мм, толщина 12мм) из низкоуглеродистой стали Ст3 полуавтоматом инверторного типа «Патон ПСИ-250Р DC MMA/MIG/MAG». Параметры режима наплавки электродной проволокой Св08Г2С диаметром 0.8мм рекомендованы ее производителем: постоянный ток обратной полярности (электродная проволока является положительным, а наплавляемый диск – отрицательным полюсами) в диапазоне от 85 до 100А и напряжение в диапазоне от 18.5 до 21.5 В. Среднее значение сварочного тока в опытах измерялись с помощью шунта, подключенного

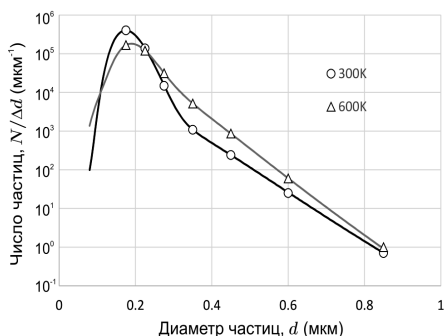


Рис. 2. Типичные распределения числа частиц N (нормированы на ширину каналов Δd_j) по размерам; кривые – аппроксимации по формуле (1).

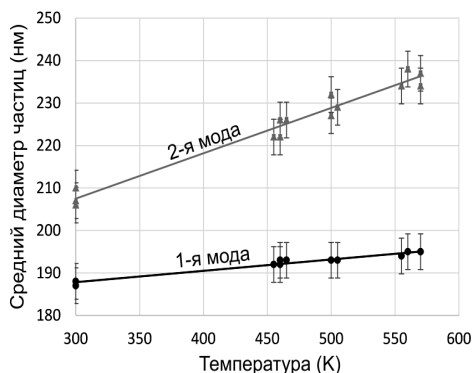


Рис. 3. Зависимости средних размеров мод ингаляционных частиц СА от температуры защитного газа.

к вольтметру. Скорость подачи электродной проволоки в процессе наплавки определялась измерением длины проволоки, выходящей из контактного наконечника за заданное время. Во всех опытах поддерживали постоянными расстояние между контактным наконечником и наплавляемым диском (9 мм) и угол (90°), измеренный между диском и осью проволоки. Расход защитного газа (CO_2) в процессе наплавки измеряли с помощью ротаметра в магистрали подачи газа, а температуру - с помощью термопары NMTXL-IM100-300 в газовом сопле сварочной горелки. Для нагрева защитного газа использовалась муфельная электropечь в газовой магистрали.

СА улавливали с помощью щелевого воздухозаборника, установленного в сварочной камере на расстоянии 20 см над дугой, с расходом удаляемого воздуха $1,7 \text{ м}^3/\text{мин}$ и направляли в вертикальную трубу для изокинетического отбора проб с расходом 1 л/мин [12]. Дисперсный состав СА 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 [13]. Максимальная относительная погрешность при определении размера частиц и их счетной концентрации не превышает 5% и 10%, соответственно, при их концентрации в пробе до $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Типичные значения счетной концентрации частиц СА в пробах $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Поэтому, использовался аэрозольный разбавитель с коэффициентом разбавления 150 для расхода потока пробы 1 л/мин (рис.1). В разбавителе применялись аэрозольные фильтры, снаряженные тканью Петрянова (ФПП) с эффективностью улавливания не менее 99,97% для частиц диаметром 0.15-0.2мкм.

СА, образующийся при электродуговой сварке плавлением, имеет трехмодальное распределение частиц по размерам [14], где первые две моды представляют собой агломераты первичных частиц разной морфологии размером

менее 1мкм, а третья мода – частицы дезинтеграции электродной проволоки размером более 1÷2мкм. Поэтому, данные измерений счетной концентрации частиц СА в первых семи каналах ЛАС-П обрабатывались в двух-модальном приближении.

Наилучшим приближением для измерений счетной концентрации частиц СА в диапазоне от 0.15 до 1 мкм является линейная комбинация двух логарифмических распределений:

$$f(d, x, d_{m1}, \sigma_1, d_{m2}, \sigma_2) = x \cdot f_1(d, d_{m1}, \sigma_1) + (1 - x) \cdot f_2(d, d_{m2}, \sigma_2), \quad (1)$$

$$f_i(d, d_{mi}, \sigma_i) = \frac{1}{d \sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp \frac{-(\ln d - \ln d_{mi})^2}{2 \ln^2 \sigma_i},$$

где d_m – медиана распределения; \bar{d} – средний размер частиц; σ – стандартное отклонение (дисперсия).

Для каждого j канала LAS-P записывается уравнение:

$$N_j = N_T \cdot \Delta d_j \cdot f(d_{cj}, x, d_{m1}, \sigma_1, d_{m2}, \sigma_2), \quad (2)$$

где N_j - число частиц, измеренных в j канале; N_T - неизвестное полное число частиц в объеме пробы, которое включает частицы с диаметром $d < 0.15$ мкм; Δd_j - ширина канала; d_{cj} - среднее значение размера канала j .

Решение системы уравнений (2) для первых семи каналов ЛАС-П позволяет определить параметры распределения частиц СА по размерам (1) и вычислить средний диаметр $\bar{d} = d_m \exp(\ln^2 \sigma / 2)$ и счетную концентрацию частиц каждой моды $n_1 = x n_T$, $n_2 = (1 - x) n_T$, где n_T – общая счетная концентрация уловленных частиц. Типичные распределения измеренного в первых семи каналах числа частиц по размерам представлены на рис.2 с аппроксимацией уравнением (1).

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Зависимости среднего размера первых двух мод частиц СА от температуры защитного газа представлены на рис.3. На рис.4 и рис.5 представлены аналогичные зависимости счетной концентрации и массовой скорости образования мод СА (без учета вклада частиц дезинтеграции), соответственно. Использовались следующие параметры режима сварки: ток $I = 95 \pm 5$ А; напряжение $U = 20 \pm 2$ В; скорость проволоки $v = 7 \pm 0.5$ см/с; объемный расход защитного газа (CO_2) $Q = 10 \pm 0.5$ л/мин.

Повышение температуры защитного газа приводит укрупнению обеих мод ингаляционных частиц СА. При этом счетная концентрация частиц второй моды практически не изменяется, в то время, как концентрация частиц первой моды заметно уменьшается с ростом температуры. Высокотемпературные пары электродного металла начинают смешиваются с защитным газом уже внутри сопла сварочной горелки (средняя температура парогазовой смеси у среза сопла составляет $T = 2500$ К [15]). Это означает, что формирование первичных частиц СА происходит в смеси пар – защитный газ, до подмешивания окружающего

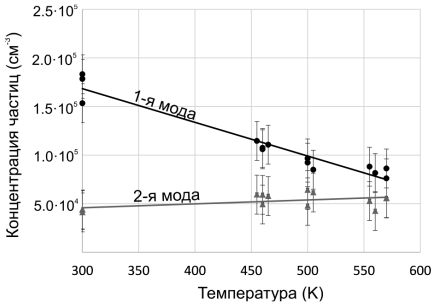


Рис. 4. Зависимости счетной концентрации мод ингаляционных частиц СА от температуры защитного газа.

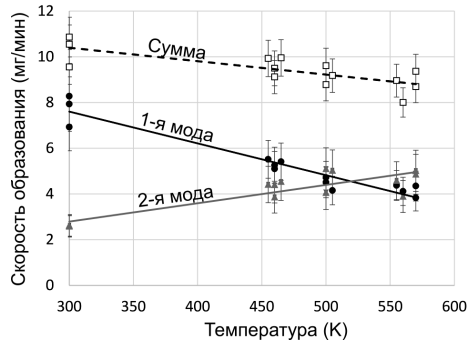


Рис. 5. Зависимости массовой скорости образования мод ингаляционных частиц СА от температуры защитного газа.

воздуха. Увеличение температуры защитного газа приводит к уменьшению скорости охлаждения парогазовой смеси [16]. Поэтому, средний размер первичных частиц, образующихся в процессе конденсационного роста и коалесценции зародышей будет увеличиваться, а их счетная концентрация уменьшаться. Эта тенденция сохранится и для ингаляционных частиц СА, образующихся в результате коагуляции первичных частиц.

В тоже время массовая скорость образования ингаляционных частиц СА слабо зависит от температуры защитного газа. При увеличении температуры защитного газа происходит только перераспределение конденсированного вещества между модами: массовая скорость образования частиц первой моды уменьшается, а второй – увеличивается.

Зависимости среднего размера первых двух мод частиц СА от расхода защитного газа представлен на рис.6. Аналогичные зависимости счетной концентрации мод частиц СА представлены на рис.7. Использовались следующие параметры режима сварки: ток $I = 90 \pm 5 \text{ A}$; напряжение $U = 20 \pm 2 \text{ V}$; скорость проволоки $v = 8 \pm 0.5 \text{ см/с}$; температура защитного газа (CO_2) $T = 300 \text{ K}$. Как следует из представленных результатов, влияние расхода защитного газа находится в пределах погрешности измерений. Эти результаты отличаются от представленных в [10], где расход защитного газа (смесь 75% Ar и 25% CO_2) сильно влияет на размеры и счетную концентрацию частиц СА. Однако, следует отметить, что в опытах [10] расход защитного газа изменялся в диапазоне от 20 до 30 л/мин, тогда как в рассматриваемом случае - от 6 до 12 л/мин. В тоже время по данным [11] массовая концентрация ингаляционных частиц СА практически не зависит от расхода защитного газа в диапазоне от 10 до 25 л/мин, а при $Q > 25 \text{ л/мин}$ возрастает с увеличением расхода. Можно предположить, что при больших расходах защитного газа происходит изменение механизма смешения паров сварочных материалов, защитного газа и окружающего воздуха.

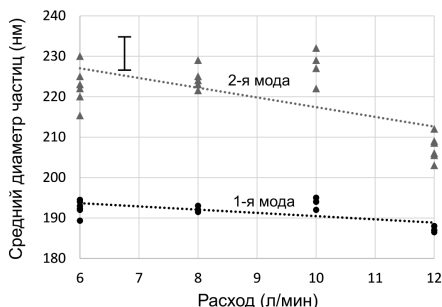


Рис. 6. Зависимости средних размеров мод ингаляционных частиц СА от расхода защитного газа

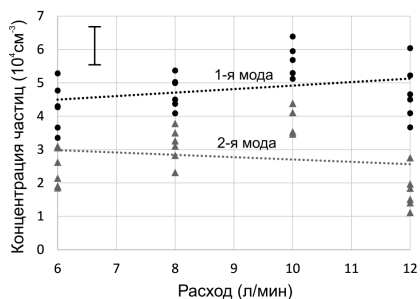


Рис. 7. Зависимости счетной концентрации мод ингаляционных частиц СА от расхода защитного газа

Заключение. Расход защитного газа в диапазоне от 6 до 12 л/мин не влияет на дисперсный состав частиц СА, в отличие от температуры защитного газа в диапазоне от 300 до 600К. Увеличение температуры защитного газа приводит к укрупнению и уменьшению счетной концентрации ингаляционных частиц СА, которые образуются в процессе коагуляции первичных частиц.

Массовая скорость образования ингаляционных частиц СА слабо зависит от температуры защитного газа. Однако, изменение температуры сопровождается интенсивным перераспределением конденсированного вещества между модами: массовая скорость образования частиц первой моды уменьшается, а второй – увеличивается.

Литература:

1. Вишняков В. И., Киро С. А., Эннан А. А. Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. 1. Конденсация ненасыщенных паров. // Физика аэродисперсных систем. – 2011. – Вып. 48. – С.91-105.
2. Вишняков В. И., Киро С. А., Эннан А. А. Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. 3. Рост и коалесценция зародышей. // Физика аэродисперсных систем. – 2013. – Вып. 50. – С.97-107.
3. Вишняков В. И., Киро С. А., Эннан А. А. Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. 4. Многокомпонентная конденсация. // Физика аэродисперсных систем. – 2013. – Вып. 50. – С.108-118.
4. Вишняков В. И., Киро С. А., Опря М. В., Эннан А. А. Образование твердой составляющей сварочного аэрозоля. Часть V. Формирование конечных агрегатов. // Физика аэродисперсных систем. – 2014. – Вып. 51. – С. 87-98.
5. Antonini J. M. Health effect of welding. // Critical Reviews of Toxicology. – 2003. – V. 33(1). – P. 61-103.
6. Clap D. E., Owner R. J. An investigation of potential health hazard of arc welding fume growth with time. // Welding Journal. – 1977. – V. 56. – P. 380s-385s.

7. *Murphy A. B., Tanaka M., Tashiro S., Sato T. and Lowke J. J.* Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – V. 42. – P. 194006(1-22).
8. *Rao Z. H., Liao S. M. and Tsai H. L.* Effects of shielding gas composition on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – V. 107. – P. 044902(1-11).
9. *Kolarik L., Kovanda K., Kolarikova M., Vondrous P. and Kopriva J.* Influence of shielding gas on GMA welding of Al alloys. // *Modern Machinery Science Journal*. – 2013. – V. 4. – P. 452-455.
10. *Topham N., Wang J., Kalivoda M., Huang J., Yu K.-M., Hsu Y.-M., Wu Ch.-Y., Oh S., Cho K. and Paulson K.* Control of Cr6+ emission from gas metal arc welding using a silica precursor as a shielding gas additive. // *The Annals of Occupational Hygiene*. – 2012. – V. 56(2). – P. 233-241.
11. *Ojima J.* Performance of a fume-exhaust gun system in CO₂ arc welding. // *Journal of Occupation Health*. – 2006. – V. 48. – P. 207-209.
12. *Oprya M., Kiro S., Worobiec A., Horemans B., Darchuk L., Novakovic V., Ennan A., and Van Grieken R.* Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles. // *Journal of Aerosol Science*. – 2012. – V. 45. – P. 50-57.
13. Лазерный аэрозольный спектрометр (ЛАС-П). Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова. – 2010. – Модель 9814.290.000.
14. *Ennan A. A., Kiro S. A., Oprya M. V. and Vishnyakov V. I.* Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding. // *Journal of Aerosol Science*. – 2013. – V. 64. – P. 103-110.
15. *Dreher M., Fussel U. and Schnick M.* (2009). Simulation of shielding gas flow inside the torch and in the process region of GMA welding. // *Mathematical Modelling of Weld Phenomena* (Technical University of Dresden). – 2009. – V. 9. – P. 127-138.
16. *Vishnyakov V. I., Kiro S. A. and Ennan A. A.* Multicomponent condensation in the plasma of welding fumes. // *Journal of Aerosol Science*. – 2014. – V. 74. – P. 1-10.

Вишняков В. І., Кіро С. А., Опря М. В., Еннан А. А.

Вплив захисного газу на розподілення частинок зварювального аерозолю за розмірами

АНОТАЦІЯ

Розглянуто вплив температури і витрати захисного газу на дисперсний склад частинок зварювального аерозолю, що утворюються при дуговому зварюванні металів в захисному газі. Показані залежності бімодального розподілення частинок за розмірами від температури в діапазоні від 300 до 600K і витрати захисного газу (CO₂) в діапазоні від 6 до 12 л/хв. Збільшення температури захисного газу призводить до перерозподілу конденсованої речовини між модами розподілення і укрупненню інгаляційних частинок зварювального аерозолю.

Vishnyakov V. I., Kiro S. A., Oprya M. V., Ennan A. A.

Influence of the shielding gas on the welding fume particle size distribution

SUMMARY

The disperse composition of welding fume from gas metal arc welding with various shielding gas temperatures and flow rates is studied. The dependencies of bimodal particle size distribution on the shielding gas temperature in the range from 300 to 600 K and flow rate in the range from 6 to 12 Lpm are demonstrated. It is shown that the shielding gas temperature rise leads to redistribution of condensed material between modes and to total integration of inhalable particles.