

ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК: 621.791; 628.511.4; 537.2

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

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

О новых возможностях электростатического улавливания твердой составляющей сварочного аэрозоля

Рассмотрено электростатическое осаждение заряженных частиц твердой составляющей сварочного аэрозоля на сетчатом электроде, расположенном перпендикулярно потоку газовой смеси. Продемонстрировано формирование автофильтрующего слоя на сетчатом электроде и влияние направления наведенного электрического поля на аэродинамическое сопротивление слоя.

Введение. Защита сварщиков, рабочих смежных профессий и окружающей среды от воздействия твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА) – токсичных субмикронных ($d \leq 0.5 \mu\text{м}$) аеродисперсных частиц, является важной социально-экономической задачей сварочного производства. В последние 20 – 25 лет уже во многих странах, в том числе Украине, для улучшения условий труда в сборочно-сварочных цехах используют передвижные и переносные малогабаритные фильтровентиляционные установки, принцип действия которых основан на механической фильтрации или электростатическом улавливании предварительно заряженных частиц [1, 2]. Механическая фильтрация – достаточно эффективный ($\eta \geq 99\%$) метод очистки воздуха от ТССА. Недостатки фильтрации – высокое аэродинамическое сопротивление и быстрое забивание фильтрующего материала ТССА [1]. Электростатическое улавливание аеродисперсных частиц менее эффективный процесс: малогабаритные двузонные электрофильтры при незначительном аэродинамическом сопротивлении улавливают $\sim 99\%$ частиц размером $d \geq 1 \div 2 \mu\text{м}$ и $\eta \leq 80 = 14$ в случае субмикронных частиц [3-5].

Как показано [6], увеличение эффективности осаждения субмикронных частиц может быть достигнуто, если в двузонном электрофильтре осадительные электроды, расположенные параллельно потоку газовой смеси (ГВС), заменить на перфорированные осадительные электроды, установленные перпендикулярно потоку ГВС. Благодаря этому заряженные частицы сами приближаются к осадительным электродам, а не движутся параллельно и вероятность их электростатического улавливания увеличивается. Аналогичный вариант двузонного электрофильтра, в котором применяются сетчатые осадительные электроды, расположенные перпендикулярно потоку ГВС, предложен в [7].

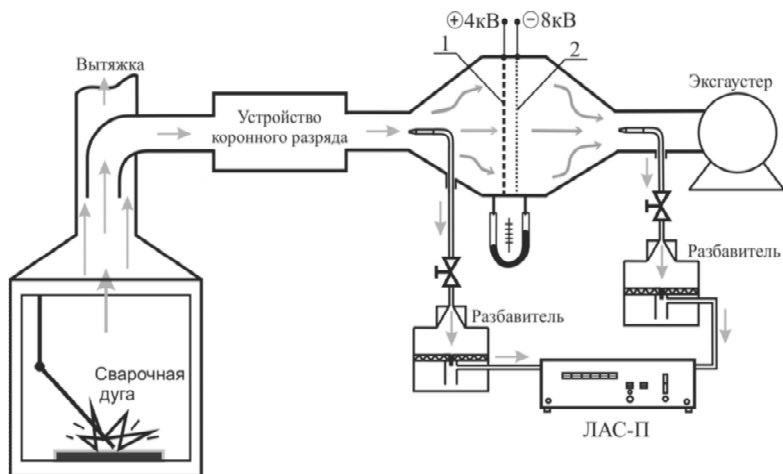


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - перфорированный электрод; 2 – сетчатый электрод

Увеличение эффективности улавливания ТССА $\eta \geq 96\%$ достигается в результате фильтрации субмикронных частиц через слой осадка, образующийся на сетчатом электроде.

Настоящая работа посвящена формированию автофильтрующего слоя ТССА на сетчатом электроде, расположенном перпендикулярно потоку ГВС, а также влиянию направления наведённого электрического поля на аэродинамическое сопротивление слоя.

Экспериментальная установка. На рис.1 показана принципиальная схема экспериментальной установки. Сварка электродами диаметром 3мм с рутиловым покрытием (АНО-4) проводилась в сварочной камере постоянным током обратной полярности ($I=140\text{A}$, $U=33\text{V}$). ГВС, содержащая частицы ТССА, с объемным расходом $18\text{ м}^3/\text{час}$ поступала из сварочной камеры сначала в устройство униполярной зарядки, где происходила зарядка частиц в поле положительного коронного разряда (ток коронного разряда $I_k=400\text{мкА}$, потенциал коронирующего электрода $U_k=+5.8\text{кВ}$), а затем в макет осадительной зоны электрофильтра. В макете перпендикулярно потоку ГВС размещались электроды площадью $S=0.03\text{м}^2$: перфорированный (ПЭ) с диаметром отверстий 5 мм, живым сечением 46.3% и сетчатый (СЭ) из нержавеющей стали с квадратными ячейками. Для исследования процесса формирования автофильтрующего слоя ТССА использовались сетчатые электроды с размером ячеек 50 и 140 мкм (диаметр проволок 36 и 90 мкм, живое сечение 34 и 37%, соответственно).

Коэффициент проскока (K) частиц через СЭ определяли с помощью лазерного аэрозольного спектрометра ЛАС-П [8], обеспечив измерение счетной концентрации частиц ТССА размером более 0.15 мкм на входе (N_0) и выходе

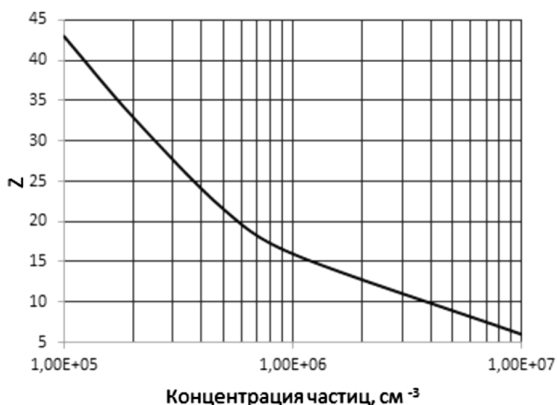


Рис. 2. Зависимость заряда (в элементарных зарядах) частицы ТССА диаметром 0.24 мкм от концентрации частиц в ГВС: $I_k = 400$ мкм, $U_k = +5.8$ кВ, $Q = 18$ м³/час.

(N) макета осадительной зоны электрофильтра – $K = N / N_0$. ИзокINETический отбор проб ГВС проводился заземленными пробоотборными трубками с расходом 1л/мин. Максимальная относительная погрешность при определении размера частиц и их счетной концентрации не превышает 5% и 10%, соответственно, при их концентрации в пробе $\leq 2 \cdot 10^3$ см⁻³. Типичные значения N_0 в пробах $\sim 2 \cdot 10^5$ см⁻³. Поэтому, использовались аэрозольные разбавители с коэффициентом разбавления 150 на входе и 50 на выходе макета осадительной зоны электрофильтра (рис.1). В разбавителях применялись аэрозольные фильтры, снаряженные тканью Петрянова (ФПП) с эффективностью улавливания не менее 99,97% для частиц диаметром 0.15-0.2мкм. Аэродинамическое сопротивление ($\Delta P_{CЭ}$) измеряли U-образным манометром, а удельную запыленность СЭ $G_{CЭ} = \Delta m / S$ (где, Δm – масса осадка ТССА) - путем взвешивания СЭ на электронных аналитических весах WPA-120С (точность 10^{-3} г).

Для предотвращения электростатического осаждения положительно заряженных частиц ТССА на ПЭ подавался положительный потенциал $U_{ПЭ} = +4$ кВ (коэффициент проскока частиц через ПЭ превышал 0.99). На СЭ подавался отрицательный потенциал $U_{CЭ} = -8$ кВ. Средняя напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве составляла $E = 5$ кВ/см, что соответствует типичному значению напряженности поля в зоне осаждения малогабаритных двузонных электрофильтров.

Конструкция устройства униполярной зарядки частиц ТССА, и методика определения зарядов частиц подробно рассмотрены в [9]. Аппроксимацией данных измерений зарядов частиц ТССА были получены следующие эмпирические уравнения:

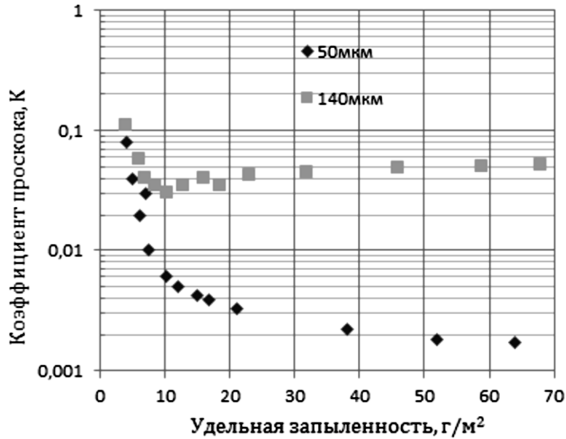


Рис. 3. Зависимость коэффициента проскока (K) от удельной запыленности СЭ ($G_{CЭ}$): $n_p = 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $E = 5 \text{ кВ/см}$, $U_k = +5,8 \text{ кВ}$, $I_k = 400 \text{ мкА}$, $Q = 18 \text{ м}^3/\text{час}$.

$$n_i = \frac{1.35 \cdot 10^7 I_k}{U_k - 1.245 U_k^{0.83}}$$

$$z = 0.6d \sqrt{\frac{n_i}{n_p}} \operatorname{th} \left(7.5 \cdot 10^{-4} d \sqrt{\frac{n_i n_p}{Q}} \right)$$

где: n_i – средняя концентрация ионов ($1/\text{см}^3$); I_k – ток коронного разряда (мкА); U_k – потенциал коронирующего электрода (кВ); z – число элементарных зарядов, приобретаемых частицей ТССА; d – диаметр частицы (мкм); n_p – счетная концентрация частиц в ГВС ($1/\text{см}^3$); Q – объемный расход ГВС ($\text{см}^3/\text{с}$).

На рис. 2 представлена зависимость величины заряда z (в элементарных зарядах), приобретаемого частицей $d = 0.24$ мкм (средний диаметр частиц ТССА [10]) в устройстве униполярной зарядки [9], от концентрации частиц в ГВС.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Судя по представленным на рис.3 данным, коэффициент проскока положительно заряженных частиц ТССА через СЭ существенно зависит от его удельной запыленности $G_{CЭ}$. За счет микровыступов, образующихся из первоначально осевших частиц, увеличивается общая поверхность осаждения и коэффициент проскока ТССА уменьшается. Первоначально электростатическое осаждение частиц происходит на проволоках СЭ внутри ячеек. При этом формируется рыхлая дендритообразная структура осадка так, что при $G_{CЭ} < 8 \text{ г/м}^2$ зависимость K от размера ячеек слабая, что обусловлено практически одинаковым живым сечением СЭ с квадратными ячейками.

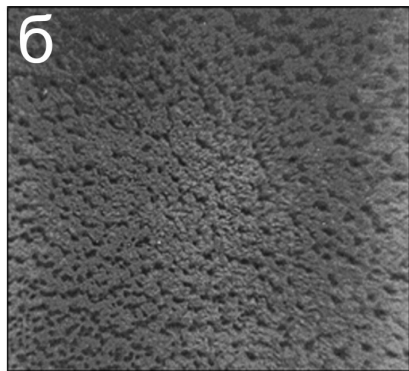
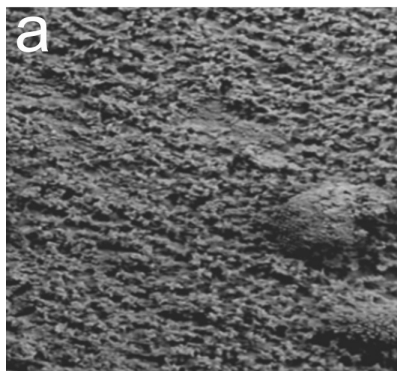


Рис. 4. Вид слоя ТССА, образующегося на СЭ с размером ячейки 50мкм (а) и 140мкм (б)

По мере заполнения ячеек $G_{CЭ} > 10 \text{ г/м}^2$ на фронтальной поверхности СЭ с размером ячеек 50 мкм формируется автофильтрующий слой ТССА с эффективностью улавливания более 99.5% (рис.3). На фотографии автофильтрующего слоя отчетливо видны неоднородности и ветвистые образования типа дендритов (рис.4а). На фронтальной поверхности СЭ с ячейкой 140 мкм автофильтрующий слой ТССА не образуется, и проскок частиц слабо зависит от $G_{CЭ}$. Аэродинамическая сила, действующая на частицы/дендриты в центре ячейки превосходит силу аутогезии, характеризующую взаимодействие частиц/дендритов между собой, как следствие, в слое осадка образуются прямые каналы диаметром в десятки микрон (рис. 4б)

Аэродинамическое сопротивление СЭ с ячейкой 50 мкм зависит от удельной запыленности и пористости автофильтрующего слоя осадка (рис. 5) При приближении к слою электростатическая ($F_E = ezE$) и аэродинамическая ($F_A \sim V_{ГВС}^2 d^2$) силы, действующие на частицу направлены к СЭ, поэтому по мере увеличения толщины слоя происходит его уплотнение, уменьшается пористость и наблюдается степенная аппроксимационная зависимость $\Delta P_{CЭ} \sim G_{CЭ}^4$. Аэродинамическое сопротивление СЭ с размером ячеек 140 мкм приблизительно в три раза меньше, слабо зависит от удельной запыленности - $\Delta P_{CЭ} \sim \sqrt{G_{CЭ}}$ и определяется числом и диаметром каналов, образующихся в слое ТССА.

После образования автофильтрующего слоя на СЭ с размером ячеек 50 мкм $\Delta P_{CЭ}$ можно регулировать путем изменения направления и напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве. Например, при изменении полярности потенциалов электродов на $U_{ПЭ} = -4 \text{ кВ}$, $U_{CЭ} = +8 \text{ кВ}$, сила F_E , действующая на положительно заряженные частицы, будет направлена противоположно скорости ГВС (тормозящее электрическое поле). В результате уменьшается скорость движения частиц в межэлектродном пространстве, глубина их внедрения в слой, в процессе инерционного осаждения частицы испытывают отталкивающее действие уже находящихся на слое частиц, как следствие, уменьшается число и площадь контактов частиц друг с другом в осадке.

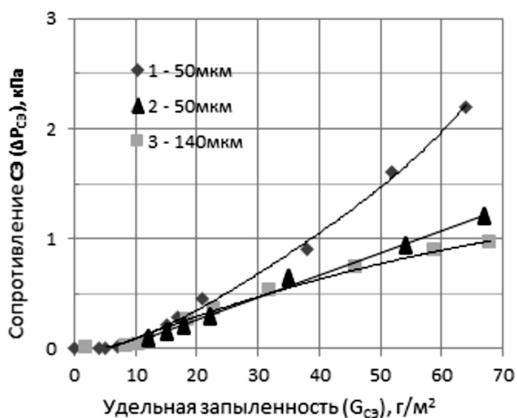


Рис. 5. Зависимость аэродинамического сопротивления СЭ (ΔP_{C3}) от удельной запыленности G_{C3} ($n_p = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $U_k = +5.8 \text{ кВ}$, $I_k = 400 \text{ мкА}$, $Q = 18 \text{ м}^3/\text{час}$):

1) $E = 5 \text{ кВ/см}$, 2) $E = -5 \text{ кВ/см}$, 3) $E = 5 \text{ кВ/см}$; кривые – аппроксимационные зависимости

При этом происходит увеличение пористости слоя и наблюдается линейная аппроксимационная зависимость - $\Delta P_{C3} \sim G_{C3}$ (рис.5). Следует также отметить, что рыхлый слой ТССА легко удаляется и обеспечивает регенерацию СЭ до начального аэродинамического сопротивления.

Вывод. Полученные результаты показывают, что малогабаритные двузонные электрофильтры с сетчатым осадительным электродом, расположенном перпендикулярно потоку ГВС, могут обеспечить высокую ($\eta \geq 99.5\%$) эффективность улавливания субмикронных частиц ТССА при сравнительно низком аэродинамическом сопротивлении ($\Delta P < 1 \div 1.5 \text{ кПа}$). На этой основе открывается возможность разработки нового поколения высокоэффективных малогабаритных двузонных электрофильтров очистки воздуха от сварочного аэрозоля, сочетающих элементы технологий механической фильтрации и электростатического улавливания.

Литература:

1. Эннан А.А. Физико–химические основы улавливания, нейтрализации и утилизации сварочных аэрозолей // Тр.1-ой Междунар.науч.-практ.конф. «Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве» (г. Одесса, 11-13 сентября 2002 г.). – Одесса: Астропринт, 2002. – С. 10–37.
2. Гримитлин М.И. Состояние и перспективы развития отечественного вентиляционного оборудования для сварочного производства // Тр.1-ой Междунар.науч.-практ.конф. «Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в

сварочном производстве» (г. Одесса, 11-13 сентября 2002 г.). – Одесса: Астропринт, 2002. – С. 64–79.

3. *Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* / Hinds W.C. – NY: John Wiley & Sons. 1999. – 504 p.

4. *A. Jaworek, A. Krupa, T. Czech* Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning. A brief review. *Journal of Electrostatics* 65 (2007) 133–155.

5. *A. Jaworek, A. Krupa, K. Adamiak* Dust particles removal in novel type two-stage electrostatic precipitator, *Electrostatics* 2003, Inst. Phys. Conf. Series No.178, 2003, pp. 343–348.

6. *Vincent J. H.* Particle dynamics in a grid-type electrostatic precipitator // *Chemical Engineering Science*. – 1977. – V. 32. – P. 1077-1082.

7. *Електрофільтр*: пат. 15741 Україна: МПК В03С 3/04. / Еннан А.А., Опря М.В., Кіро С.А. – № 200600378; заявл. 16.01.06; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7, 2006. – Зс.: кресл.

8. *Лазерный аэрозольный спектрометр (ЛАС-П)*. Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова. – 2010. - модель 9814.290.000.

9. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A.* Charge distribution of welding fume particles after charging by the corona ionizer // *Journal of Aerosol Science*. – 2016. – V. 94. – P. 9-21.

10. *Ennan A.A., Kiro S.A., Oprya M.V., 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.

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

Про нові можливості електростатичного уловлювання твердої складової зварювального аерозолію

АНОТАЦІЯ

Розглянуто електростатичне осадження заряджених частинок твердої складової зварювального аерозолію на сітчастому електроді, розташованому перпендикулярно потоку газоповітряної суміші. Продемонстровано формування автофільтруючого шару на сітчастому електроді і вплив напрямку наведеного електричного поля на аеродинамічний опір шару.

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

On new possibilities of the welding fume electrostatic trapping

SUMMARY

Charged welding fume particles electrostatic precipitation on the mesh electrode, which is located perpendicular to the gas-air mixture flow, is studied. The formation of the welding fume particles auto-filtering layer on the mesh electrode and the influence of the induced electric field direction on the layer pressure drop are demonstrated.