

СВАРОЧНЫЙ АЭРОЗОЛЬ — ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕТОДЫ АНАЛИЗА (Обзор)

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **И. Р. ЯВДОШИН**, канд. техн. наук, **И. П. ГУБЕНЯ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены свойства сварочного аэрозоля (его дисперсность, морфология частиц) и методы, применяемые для анализа физических свойств и элементного состава ТССА. Приведены факторы, влияющие на выделение сварочного аэрозоля.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочный аэрозоль, морфология частиц, электродное покрытие, методы анализа

В процессе дуговой сварки происходит взаимодействие расплавленного металла со шлаком и газами, при этом образуется сварочный аэрозоль (СА), состоящий из твердых частиц (ТССА) и газовой фазы (ГССА). В результате воздействия сварочного аэрозоля на организм возможны профессиональные заболевания сварщиков и рабочих смежных профессий. В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Институте медицины труда НАМН Украины на протяжении многих лет проводятся исследования процессов образования ТССА и ГССА и их влияние на здоровье сварщиков. На основе этих исследований созданы низкотоксичные сварочные материалы, получившие широкое распространение в промышленности и строительстве. Результаты исследований опубликованы в работах [1–16].

Для исследований ТССА все шире начали применять физические методы. Разработан стандарт ISO-15011 на методы исследования сварочных аэрозолей, многие из которых недоступны отечественным ученым и инженерам-сварщикам.

В то же время на рынке стран СНГ появились сварочные электроды, импортируемые из стран Юго-Восточной Азии, использование которых вызывает отравления сварщиков марганцем. Предупреждение профессиональных заболеваний сварщиков остается одним из приоритетных направлений исследований в области сварки и родственных технологий. В настоящей статье сделан обзор исследований, посвященных СА.

Факторы, влияющие на образование ТССА. Источником СА является высокотемпературный пар, который образуется при испарении металла капли на торце электрода и сварочной ванны. Капля имеет большую удельную поверхность и нагревается до более высоких температур. Доля пара, образующегося при испарении металла сварочной ванны, составляет 10...15 % ТССА [8, 17].

В работе [17] рассматриваются также процессы образования аэрозоля — испарение с последующей конденсацией (с/без окисления), химически интенсифицированное испарение, разбрызгивание. Интенсивность испарения зависит от температуры металла, шлака и сварочной ванны, а также свойств испаряющихся материалов. Результаты исследований теплосодержания и температуры металла при дуговой сварке приведены в работе [1].

В работах [6, 8, 18] рассмотрены следующие факторы, влияющие на выделение ТССА: состав электродного покрытия и флюсового сердечника; режим сварки (ток и напряжение); род тока и полярность; состав основного и электродного металла; толщина электродного покрытия; диаметр электрода.

Установлено, что температура вблизи поверхности капель, образующихся при использовании электродов промышленных марок, находится в пределах 2150...2500 К и зависит от силы тока и состава покрытия. Наибольшая температура зарегистрирована у электродов с руднокислым покрытием, более низкая — у электродов с основным и рутиловым покрытиями [1].

Количество ТССА, выделяющееся при сварке электродами с разными типами покрытий, приведено на рис. 1. Повышение основности шлаковой фазы способствует интенсивному испарению калия, натрия, магния и кальция, причем начало этого процесса смещается в область более низких температур [6].

Тип связующего и его содержание в электродном покрытии в значительной мере определяют скорость образования аэрозоля (СОА). Максимум СОА наблюдается при использовании калиевого связующего и минимум — литиевого. Натриевое связующее занимает промежуточное место. Замена К–Na-связующего литиевым дает возможность уменьшить СОА на 50 % без снижения технологических характеристик электродов. Использование литиевого связующего в электродах для сварки нержавеющей стали приводит

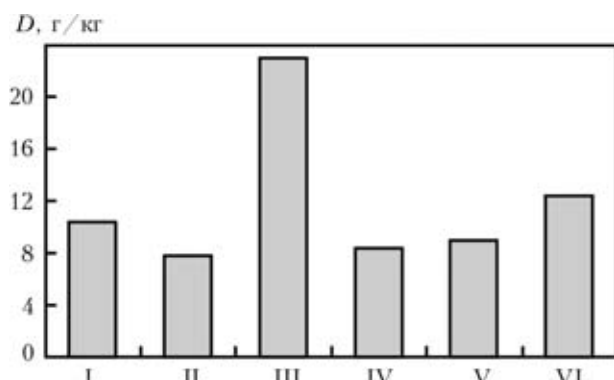


Рис. 1. Количество ТССА, выделяющееся при сварке электродами с ильменитовым (I), рутил-карбонатным (II), целлюлозным (III), рутиловым (IV), кислым с большим содержанием железного порошка (V) и основным (VI) покрытиями [6]

к уменьшению валовых выделений СА, а также к существенному снижению содержания шестивалентного хрома в ТССА [19].

Увеличение силы сварочного тока приводит к повышению температуры капли и интенсификации процесса испарения. Рост толщины покрытия приводит к некоторому снижению температуры капель электродного металла и улучшению шлаковой защиты капли. Увеличение диаметра электрода приводит к возрастанию выделений ТССА [8].

Влияние рода и полярности тока приведены на рис. 2. Наибольшая интенсивность образования аэрозоля наблюдается при сварке на обратной полярности, что обусловлено более высокой температурой капель.

Скорость сварки покрытыми электродами практически не влияет на образование аэрозоля.

Строение частиц ТССА и дисперсность. Размеры отдельных частиц ТССА колеблются от нескольких нанометров до десятков микрометров [11–13, 15, 17, 20]: первичные частицы (< 100 нм), частицы аккумуляционного диапазо-

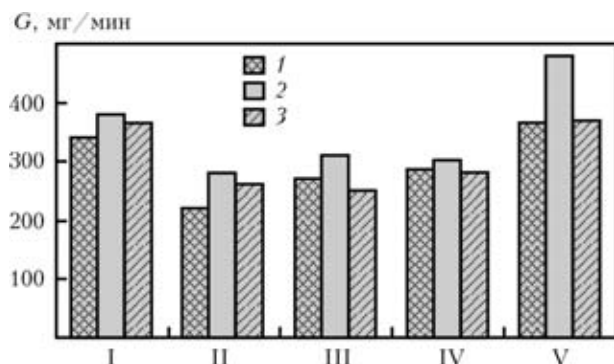


Рис. 2. Зависимость интенсивности выделения ТССА от рода и полярности тока при сварке электродами диаметром 4 мм с ильменитовым (I), рутил-карбонатным (II), рутиловым (III), кислым с большим содержанием железного порошка (IV) и основным (V) покрытиями [6]: 1 — переменный ток; 2 — постоянный ток, обратная полярность; 3 — то же, прямая полярность

на (100 нм...1 мкм) и крупные частицы (> 1 мкм). В работе [14] отмечается, что большинство первичных частиц имеет размер 5...40 нм. Более крупные частицы скапливаются в кластеры, а мелкие склонны к образованию цепочек.

ТССА состоит из частиц и агломератов сферической и несферической форм, большинство частиц имеет неоднородную структуру (состоит из ядра и оболочки) [6, 8, 13, 21]. Наблюдаются частично спеченные агломераты и агломераты с «открытой» структурой (образуются за счет вандерваальсовых сил, адсорбционных сил атмосферной влаги и электромагнитных сил), а также линейно агломерированные наноразмерные частицы [10, 14, 21].

Ядро частиц с неоднородной структурой обогащено соединениями железа и марганца, а оболочка содержит соединения кремния, калия и натрия. Такая неоднородность строения частиц ТССА связана с избирательностью процесса испарения и конденсации. Высокотемпературный пар имеет сложный состав и отдельные составляющие конденсируются при различной температуре. Сначала происходит конденсация элементов с более низким давлением пара (марганца, железа), а затем элементов с более высоким давлением пара (натрий, калий и др.).

На рис. 3 представлены частицы СА, полученные с помощью трансмиссионного (ТЕМ) и сканирующего электронного микроскопа (SEM).

Частицы различного размера по-разному влияют на организм сварщика. Частицы диаметром менее 20 мкм могут оставаться взвешенными в воздухе [11], частицы размером более нескольких микрометров осаждаются на стенках воздушных путей человеческого организма и выводятся наружу вместе со слюной. Около 30 % частиц размером 0,1...1 мкм осаждаются в легких. Частицы размером менее 0,1 мкм (100 нм) также вдыхаются и осаждаются в легких. 100 % частиц диаметром менее 1 мкм проникают в организм дыхательными путями [17]. Возможно проникновение наноразмерных частиц через кожу [23]. Так, они могут попадать в мозг через нервы в носовых пазухах [24, 25].

На рис. 4 представлены частотные характеристики распределения размеров частиц при сварке электродами с целлюлозным (Е6010) и основным (Е7018) покрытиями [12]. В работе [25] указывается, что токсичность наночастиц определяется не только их размерами, но и формой. Наночастицы дендритной и веретенообразной формы имеют более высокую цитотоксичность, чем частицы сферической формы.

Методы анализа ТССА. Международный стандарт ISO 15011-1 [26] устанавливает определенные требования к конструкции аэрозольной камеры, типам фильтров, насосу, хронометру и

весам. В таблице представлены данные о методах исследования размеров частиц. Приведенные данные свидетельствуют о разнообразии методов и оборудования, используемых для анализа размеров частиц, массового и размерного распределения ТССА.

Из-за большого диапазона размеров частиц сложно измерить размер каждой частицы и их распределение. Недостатки анализа ТССА методом электронной микроскопии — специфичность приготовления образцов (осаждение на подложку) и сложность получения массового и количественного распределения частиц СА.

При использовании метода аэродинамической сепарации существенным недостатком является разрушение кластеров при прохождении их через отдельные уровни импактора.

Недостатком анализа ТССА методом лазерной гранулометрии является предшествующее анализу или во время анализа диспергирование ультразвуковыми колебаниями в дисперсионной среде (жидкости).

Кроме того, поскольку частицы СА в основном это агломераты сложной и неоднородной формы и поверхности, сложно калибровать измерительное оборудование для СА со стандартными настройками для сферических частиц [11].

Ключевым фактором, определяющим вредное влияние составляющих СА на здоровье сварщика, наряду с дисперсностью частиц, является их химический состав. Аналитические методы для определения элементного состава ТССА, рекомендованные международным стандартом ISO 15011-1 [26] следующие: для определения алюминия, бария, бериллия, кадмия, кобальта, хрома, меди, железа, марганца, молибдена, никеля, свинца, ванадия, цинка и др. — индукционно связанная плазма — электронная оже-спектроскопия (ICP — AES); индукционно связанная плазма — масс-спектрометрия (ICP — MS); атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS); атомно-флуоресцентная спектроскопия (AFS); рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (XRF).

Методы определения размера частиц

Метод	Диапазон размеров, мкм	Оборудование
Электронная микроскопия	0,002...50	SEM, ТЕМ, электронный зонд (EPMA)
Оптическая микроскопия	1...400	Оптический микроскоп
Лазерная гранулометрия	0,01...3000	Анализаторы (разные виды)
Аэродинамическая сепарация	0,05...20	Импакторы (разные виды)

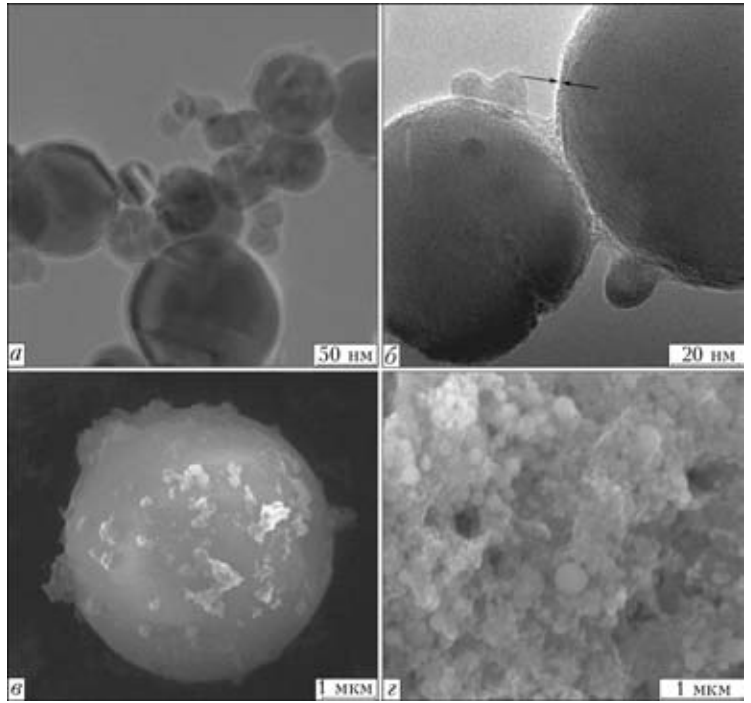


Рис. 3. Изображения ТССА, полученные с помощью трансмиссионного (а, б) [17, 22] и сканирующего (в, г) микроскопов: а, б — частицы неоднородной структуры (ядро более темное, а оболочка светлая); в — крупная сферическая частица, безопасная для органов дыхания, на поверхности которой находятся наноразмерные частицы; г — конгломерат наноразмерных частиц

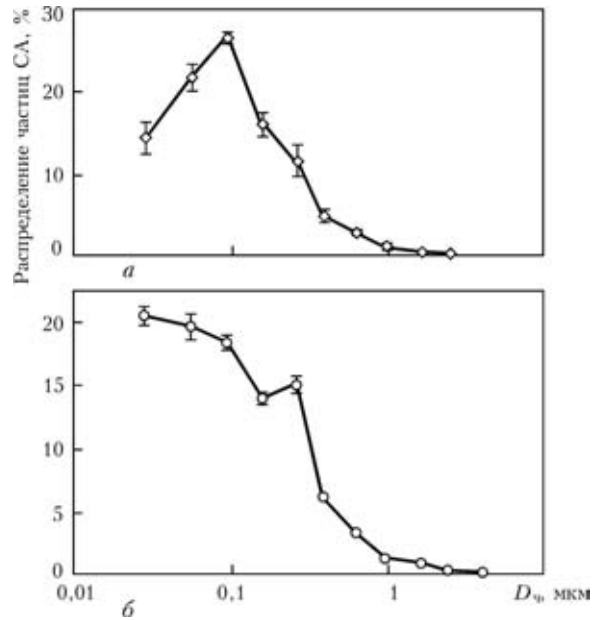


Рис. 4. Количественное распределение частиц СА по размерам для электродов с целлюлозным (а) и основным (б) покрытиями



Для определения шестивалентного хрома — ионная хроматография, спектрометрия. Важно, чтобы используемый фильтр был применим для улавливания шестивалентного хрома. Много фильтрующих материалов (например, смешанные целлюлозно-эфирные мембранные фильтры) реагируют с шестивалентным хромом, в результате чего его валентность снижается до трех и полученные результаты низкого качества. Успешное и широкое применение нашли фильтры из кварцевого волокна, стекловолокна и поливинилхлоридные.

Для определения фтора — ионная хроматография; ионно-селективный электрод (ISE).

1. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
2. Явдошин И. Р., Булат А. В., Швачко В. И. Влияние технологических и металлургических факторов на гигиенические показатели электродов с рутиловым и ильменитовым покрытиями // Тр. Всесоюз. конф. по сварочным материалам, Орел, окт., 1979 г. — Киев, 1982. — С. 45–53.
3. Источники поступления марганца и железа в сварочный аэрозоль / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. В. Булат, В. И. Швачко // Автомат. сварка. — 1981. — № 3. — С. 37–39.
4. Войткевич В. Г., Безрук Л. И., Есауленко Г. Б. Электронно-микроскопическое исследование твердой составляющей сварочных аэрозолей // Там же. — 1984. — № 6. — С. 33–35.
5. Походня И. К., Булат А. В., Явдошин И. Р. Особенности испарения натрия, калия, магния и кальция из сварочных шлаков, содержащих двуокись титана // Там же. — 1986. — № 3. — С. 27–29.
6. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 222 с.
7. Волокова Н. Н., Войткевич В. Г. Нейротоксичность и физико-химические свойства аэрозолей конденсации сложного состава // Динамические процессы в сложно-организованных системах. — М.: Изд. Ин-та физ.-техн. проблем РАН, 1991. — С. 123–129.
8. Voitkevich V. Welding fumes: formation, properties and biological effects. — Cambridge: Abington publ., 1995. — 110 p.
9. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 2004. — 442 с.
10. Zimmer A. E. The influence of metallurgy on the formation of welding aerosols // J. Environ. Monitoring. — 2002. — № 4. — P. 628–632.
11. Jenkins N. T., Pierce W. M. G., Eagar T. W. Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes // Welding J. — 2005. — № 84. — P. 156–163.
12. Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Pt I / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2008. — № 4. — P. 106–112.
13. Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Pt II / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2010. — № 4. — P. 82–89.
14. Physicochemical characterization of different welding aerosols / B. Berlinger, N. Benker, S. Weinbruch et al. // Anal Bioanal Chemistry. — 2010. — № 10. — P. 1773–1789.
15. Jenkins N. T., Eagar T. W. Chemical analysis of welding fume particle // Welding J. — 2005. — № 6. — P. 87–93.
16. Characterization of welding fume generated by high-Mn consumables / M. J. Gonser, J. C. Lippold, D. W. Dickinson et al. // Ibid. — 2010. — № 2. — P. 25–33.
17. Sterjovski Z., Norrish J., Monaghan B. J. The effect of voltage and metal-transfer mode on particulate-fume size during the GMAW of plain-carbon steel. — [2008]. — 12 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-2092–08).
18. Quimby B. J., Ulrich G. D. Fume formation rates in gas metal arc welding // Welding J. — 1999. — № 4. — P. 142–149.
19. Pat. 89304783 application European 7, B 23 K 335/365, B 22 C 1/18, C 04 B 12/04, C 01 B 33/32. Silicate binders / T. Griffiths. — 0 342 346; fil. 11.05.89. — Publ. 15.11.89.
20. Characterization procedure for the analysis of arc welding fume / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Welding J. — 2008. — № 4. — P. 76–83.
21. An investigation of particulate weld fume generated from GMAW of plain carbon steel / Z. Sterjovski, J. Drossier, E. de Thoisy et al. // Australasian Welding J. — 2006. — 51. — P. 21–40.
22. Examining elemental surface enrichment in ultrafine aerosol particles using analytical scanning transmission electron microscopy / A. D. Maynard, Y. Ito, I. Arslan et al. // Aerosol Sci. and Technology. — 2004. — № 38. — P. 365–381.
23. Hoet P. H. M., Brueske-Hohfeld I., Salata O. V. Nanoparticles — known and unknown health risks // J. of Nanobiotechnology. — 2004. — № 2.
24. Raloff J. Destination brain // Sci. News. — 2010. — № 11.
25. Глушкова А. В., Радилов А. С., Рембовский В. Р. Нанотехнологии и нанотоксикология — взгляд на проблему // Токсиколог. вестн. — 2007. — № 6. — С. 4–8.
26. International Standard ISO 15011-1. Health and safety in welding and allied processes — Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt 1: Determination of emission rate and sampling for analysis of particulate. — First ed. — 01.04.2002.

Properties of welding fumes, such as dispersion degree, morphology of particles, methods used to analyse physical properties and element composition of particulate matter of the welding fumes, are considered. Factors affecting evolution of the welding fumes are presented.

Поступила в редакцию 09.03.2011