

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ И ПУТИ ЕЕ ПОПАДАНИЯ В ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ (Обзор)

И.П. ГУБЕНЯ, И.Р. ЯВДОЩИН

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича (Боженко), 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе представлен обзор современного состояния вопроса изучения механизмов образования сварочного аэрозоля (СА), дисперсности твердой составляющей сварочного аэрозоля и ее способности проникать в человеческий организм как важного токсикологического фактора. Установлено, что существует два основных механизма образования сварочного аэрозоля — за счет конденсации продуктов высокотемпературного испарения и за счет образования летучих оксидов на поверхности расплавленного металла. При этом основным источником испарения является капля расплавленного металла, но также в процессе испарения участвуют сварочная ванна и брызги. Известно, что проницаемость зависит главным образом от размера частиц и их агломератов — чем меньше их размер, тем проникающая способность выше. Кроме уже известных путей проникновения в организм частиц СА через дыхательные пути и органы пищеварения, наноразмерные частицы могут проникать непосредственно в мозг через нервные окончания в носовых пазухах, а также попадать в кровеносную и лимфатическую системы. В результате происходит их накопление в костном мозгу, лимфатических узлах, селезенке и сердце. Актуальным остается вопрос поиска путей снижения выделений при сварке покрытыми электродами, главным образом за счет улучшения состава их покрытия, а также возможности управления дисперсностью частиц сварочного аэрозоля. Библиогр. 25, рис. 1.

Ключевые слова: частица, сварочный аэрозоль, твердая составляющая, токсичность, проникающая способность, санитарно-гигиенические характеристики

Покрытые электроды для ручной дуговой сварки (РДС) длительное время остаются объектом исследований, которые изначально были направлены на улучшение сварочно-технологических характеристик, а следующим этапом было удешевление их производства. На сегодняшний день одним из приоритетных направлений исследований электродов являются их санитарно-гигиенические характеристики и поиск путей снижения негативного влияния процесса сварки на работников данной сферы.

Поскольку основным токсическим компонентом сварочного аэрозоля при сварке низколегированных малоуглеродистых сталей является марганец, он был и есть одним из главных объектов исследования [1]. Подтверждением этому есть опубликованный Международным институтом сварки (МИС) бюллетень, в котором актуализируется вопрос исследования сварочных аэрозолей и приведено несколько рекомендаций [2]:

- влияние марганцесодержащих соединений СА и пыли при сварке и родственных технологиях должно быть минимизировано, по меньшей мере, в пределах соответствующих национальных норм;
- стоит проводить дальнейшие исследования для углубления понимания абсорбции этих соединений (продуктов сварки); их поведения в человеческом организме; взаимосвязи доза-влияние и любых воз-

можных нейрологических и нейроповеденческих явлений».

С другой стороны, Американская конференция государственных промышленных специалистов по гигиене труда (ACGIH) в 2013 г. пересмотрела свои рекомендации по марганцу и предложила снизить предельно допустимые концентрации (ПДК) марганца: для твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА) с размером частиц менее 2,5 мкм до 0,02 мг/м³, а для ТССА с размером частиц более 2,5 мкм — до 0,1 мг/м³ [3]. В ближайшие несколько лет вышеуказанные нововведения могут приобрести статус нормативов, что заставит производителей сварочных материалов искать пути адаптации к новым условиям. Такой интерес обусловлен необходимостью решения вопросов, касающихся негативного влияния ТССА и его последствий на человеческий организм, поскольку во многих странах, а особенно в США, идут судовые процессы между сварщиками, получившими профессиональные заболевания, и производителями сварочных материалов. Вышеприведенные данные есть свидетельством того, что работы в направлении улучшения санитарно-гигиенических характеристик продолжаются на межгосударственном уровне.

В данной статье представлен анализ литературных источников, касающихся современных представлений о механизмах образования СА и путей попадания его частиц в человеческий организм.

Во время РДС происходит нагрев и плавление электрода и основного металла, а поскольку металлические материалы при нагреве являются потенциальным источником паров, то данные процессы высокотемпературного нагрева сопровождаются испарением части основного металла и материалов электрода (1...3 % при сварке покрытым электродом) [4].

После плавления расплавленный металл проходит этапы капли и ванны. Принято считать, что существует 3 источника образования сварочного аэрозоля [5]: расплавленные капли, находящиеся как на торце электрода, так и в момент перехода через дугу до сварочной ванны; сварочная ванна; брызги.

Главным источником высокотемпературного пара является капля, поскольку она характеризуется высокой удельной поверхностью (на порядок больше, чем удельная поверхность сварочной ванны) и более высоким уровнем перегрева [6, 7]. Значение температуры капель в момент отрыва от торца электрода достигает 2500 К. Кроме того, в зонах активных пятен температура расплава иногда превышает температуру кипения. После отрыва капли от кончика электрода ее вклад в образование СА снижается [8]. При попадании образовавшейся паро-газовой смеси (рисунок) за границы защитной атмосферы дуги в результате влияния кислорода окружающей среды происходит интенсивное окисление некоторых продуктов конденсации. При охлаждении полученных паров центрами конденсации могут быть как сами атомы элементов, так и мельчайшие брызги металла, которые выносятся из зоны дуги [1].

В работе Р. Хейлэ и Д. Хила [9] приведены два механизма образования аэрозоля. Первый состоит в испарении составляющих электродного и основного металлов, последующей конденсации и окислении. Второй — в образовании на поверхности расплавленного металла летучих оксидов в случае попадания кислорода в атмосферу дуги. Доля участия каждого из этих механизмов зависит от способа сварки, состава и окислительного потенциа-

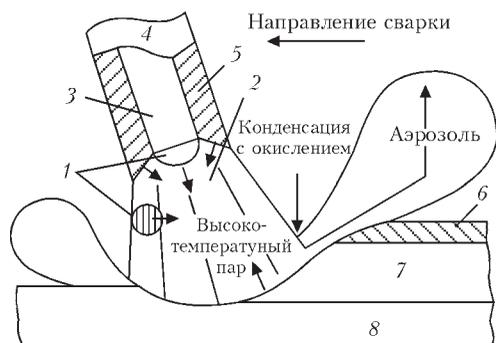
ла атмосферы дуги, при снижении которого роль второго механизма уменьшается.

В случае переноса металла короткими замыканиями и крупными каплями в конце периода короткого замыкания, а также в момент отрыва капли от торца электрода происходит разрушение и взрывное испарение образовавшейся перемычки (шейки) металла между электродом и основным металлом, в результате чего разбрызгивается расплавленный металл. Брызги достаточно малого размера, которые могут оставаться взвешенными в воздушном потоке, называются «микрокаплями». Технически эти микрокапли не являются аэрозолем, но все ТССА, взвешенные в воздушном потоке, принято считать СА.

Микрокапли также могут выступать источником аэрозоля, поскольку, попадая в окружающую атмосферу, они интенсивно испаряются и окисляются, что сопровождается активным выделением аэрозоля [10, 11]. Вклад вышеприведенного механизма уменьшается по мере уменьшения количества коротких замыканий и изменения характера перехода расплавленного металла через дугу.

По характеру образования СА относятся к аэрозольным конденсации, которые представляют собой дисперсную систему, где дисперсной фазой являются наноразмерные и микронные (0,001...10 мкм) частички твердого вещества — ТССА, а дисперсной средой — газ или смесь газов (газообразная составляющая сварочного аэрозоля (ГССА)). Одним из важных факторов, определяющих токсичность ТССА, является ее дисперсность. Все без исключения СА, образующиеся при каких либо процессах дуговой сварки, вредные для здоровья. Разница лишь в степени их вредности и опасности для сварщика, что, в свою очередь, зависит от состава ТССА и ГССА, а также от уровня действующих концентраций и времени такого влияния [12].

ТССА состоит из частиц сферической и несферической форм и их агломератов. Большинство частиц имеют неоднородную структуру — состоят из ядра и оболочки [10, 13]. Ядро состоит в основном из соединений железа и марганца, а оболочка содержит соединения кремния, калия и натрия. Объединение частиц ТССА (агломерирование и агрегатирование) есть результат действия электростатических и адсорбционных сил. Если взять во внимание механизм образования и размер частиц, можно предположить, что электростатические силы взаимодействия частиц СА в разных материалах приблизительно одинаковые. Сила адсорбционного взаимодействия зависит от количества щелочных элементов (калия, натрия и лития) в СА. С увеличением содержания этих элементов количество частиц в агломератах увеличивается и, соответственно, увеличивается размер самого агломерата. Наблюдаются частично спеченные агломераты, агломераты с «открытой» структурой, которые образуются за счет действия Ван-дер-ваальсовских



Механизм образования сварочного аэрозоля [1]: 1 — капля; 2 — дуга; 3 — электродный стержень; 4 — электрод; 5 — покрытие; 6 — шлак; 7 — металл шва; 8 — основной металл

сил, адсорбционных сил атмосферной влаги и электромагнитных сил; а также агломераты наноразмерных частиц в виде цепочек [14–16].

Размеры отдельных частиц и агломератов колеблются от нескольких нанометров до десятков микрометров [17–19]. Около 70...80 % частиц диаметром 0,1...2 мкм, попадающих в организм через органы дыхания, удаляются при выдыхании. Частицы большего диаметра удаляются отхаркиванием мокроты [20].

Частицы ТССА диаметром 2,5...10 мкм определяются как могущие попадать внутрь организма вместе с потоком вдыхаемого воздуха — они обычно попадают в бронхи. Частицы диаметром меньше 2,5 мкм могут не только попадать внутрь организма, но и достигать мельчайших углублений легких — альвеол, где происходит процесс газообмена с ближайшими кровеносными сосудами. Проникая в альвеолы, частицы могут растворяться и проникать в кровоток, а также физически проникать через стенки сосудов и переноситься в крови в твердой форме. Кроме того, они могут диффундировать в разные отделы респираторного тракта, транспортироваться через эпителиальные и эндотелиальные клетки в кровеносную и лимфатическую системы, в результате накапливаясь в костном мозге, лимфатических узлах, селезенке и сердце [21, 22]. Наноразмерная ТССА может проникать через кожу [22]. Особенную опасность наноразмерных частиц является их способность проникать в мозг через нервные окончания в носовых пазухах, преодолевая защитные функции живого организма [23–25]. Для сравнения — размер клеток составляет 1...10 мкм, вирусов — 20...450 нм, молекул белка — 5...50 нм [22].

Представленные данные литературных источников демонстрируют механизмы и источники образования СА, основные физические характеристики частиц СА и его опасность для здоровья человека. Установлено, что проникающая способность частиц и агломератов ТССА зависит от их размера — с уменьшением последнего проникающая способность в организм как через органы дыхания, так и через кожу, возрастает. Наиболее опасными являются частицы нанодиапазона.

Исходя из вышеприведенных данных важным является продолжение исследований свойств ТССА, поиск путей влияния на дисперсность частиц с целью увеличения их размеров, и, соответственно, снижения проникающей способности, а вместе с этим и снижение токсического влияния на живой организм; усовершенствование состава электродного покрытия для уменьшения выделений сварочного аэрозоля.

1. *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов* / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, С.С. Милоченко и др. // Под ред. И.К. Походни. — Киев. Наук. думка, 1990. — 224 с.

2. *IIW Statement on Manganese*. 2012 [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://app.aws.org/technical/iiw-manganese.pdf>.
3. *Clark D.* What the recent recommendation on manganese exposure means to you // *Welding J.* — 2014. — 93(8). — P. 36–40.
4. *Welding fume* / N. Jenkins, J. Moreton, P. Oakley, S. Stevens // *Sources, Characteristics, Control*, vol. 1-2. Cambridge. England, The Abington Hall. — 1981. — P. 269–329.
5. *A model for prediction of fume formation rate in gas metal arc welding (GMAW), globular and spray modes, DC electrode positive* / J.H. Dennis, P.J. Hewitt, C.A.J. Redding, A.D. Workman // *Ann. Occup. Hyg.* — 2001. — 45. — P. 105–113.
6. *Ерохин А.А.* Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. — М. Машиностроение, 1964. — 254 с.
7. *Ń e considerations about of the formation mechanisms of welding fume* / M. Kobayashi, S. Maki, Y. Hashimoto, T. Suga // *Weld. World.* — 1978. — 16, № 11/12. — P. 238–245.
8. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга. — М. Машиностроение, 1970. — 335 с.
9. *Heile R., Hill D.* Particulate fume generation in arc welding processes // *Welding J.* — 1975. — Vol. 7. — P. 201–210.
10. *Voitkevich V.* *Welding fumes: formation, properties and biological effects*. Cambridge, England: Abington publishing, 1995. — 75 p.
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. *An investigation of particulate weld fume generated from GMAW of plain carbon steel* / Z. Sterjovski, J. Drossier, de E. Thoisy et al. // *Australasian Welding J.* — 2006. — Vol. 51. — first quarter. — P. 21–40.
13. *Physicochemical characterization of different welding aerosols* / B. Berlinger, N. Benker, S. Weinbruch et al. // *Anal Bioanal Chemistry.* — 2010. — № 10. — P. 1773–1780.
14. *Zimmer A.E., Biswas P.* Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes // *Aerosol Science.* — 2001. — 32. — P. 993–1008.
15. *Zimmer A.E.* The influence of metallurgy on the formation of welding aerosols // *J. of Environmental Monitoring.* — 2002. — 4. — P. 628–632.
16. *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. — *Intern. Inst. of Welding; Doc VIII-2092-08.* — 2008. — 12 p.
17. *Characterization Procedure for the analysis of arc welding fume* / J.W. Sowards, J.C. Lippold, D.W. Dickinson, A.J. Ramires // *Welding J.* — 2008 — № 87(4). — P. 76–83.
18. *Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Part I* / J.W. Sowards, J.C. Lippold, D.W. Dickinson, A.J. Ramirez // *Ibid.* — 2008. — № 87(4). — P. 106–112.
19. *Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Part II* / J.W. Sowards, J.C. Lippold, D.W. Dickinson, A.J. Ramirez // *Ibid.* — 2010. — № 89(4). — P. 82–89.
20. *Jankovic J.* Searching for a relationship between manganese and welding and Parkinson's disease // *Neurology.* — 2005. — 64. — P. 2021–2028.
21. *Демецкая А.В., Кучерук Т.К., Мовчан В.А.* Частицы нанодиапазона: возможный вклад в развитие профессионально обусловленной патологии // *Украинский журнал по проблемам медицины труда.* — 2006. — № 1. — С. 62–67.
22. *Hoet P.H.M., Brüske-Hohlfeld I., Salata O.V.* Nanoparticles — known and unknown health risks // *J. of Nanobiotechnology.* — 2004. — № 2(12). — 15 p.
23. *Глушкова А.В., Радиллов А.С., Рембовский В.Р.* Нанотехнологии и нанотоксикология — взгляд на проблему // *Токсикологический вестник.* — 2007. — № 6. — С. 4–8.
24. *Raloff J.* Destination brain // *Science News.* — 2010. — Vol. 177. — № 11. — P. 16–20.
25. *Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain* / G. Oberdoster, Z. Zharp, V. Atudorei et al. // *Inhalation Toxicology.* — 2004. — № 16. — P. 437–445.

Поступила в редакцию 13.11.2015