

УДК 614.75; 66-978

Д.А. Кузнецов, А.С. Смолина, Ю.В. Раков, М.Н. Игнатов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТАВА ТВЕРДОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ВИДУ
ЭЛЕКТРОДНОГО ПОКРЫТИЯ**

Медицинские исследования указывают, что сварочные аэрозоли являются одной из основных причин развития профессиональных заболеваний сварщика, таких как пневмокозиоз и т.д. С точки зрения промышленной безопасности контролируется только допустимая концентрация вредных веществ, входящих в состав сварочных аэрозолей. Однако эти данные не дают полного представления о влиянии этих веществ на организм, более важным показателем являются минеральные формы локализации элементов, особенно в твердой составляющей сварочных аэрозолей, а также их морфология, дисперсность и строение. Авторы представляют результаты исследования по морфологии, дисперсности и строению частиц твердой составляющей сварочного аэрозоля для электродов с различными покрытиями. Установлены характерные зависимости между составом и морфологией, а также между номенклатурой частиц и видом покрытия.

Ключевые слова: сварка, покрытые электроды, охрана труда, твердая составляющая сварочных аэрозолей, минералообразование.

D.A. Kuznecov, A.S. Smolina, U.V. Rakov, M.N. Ignatov

Perm National Research Polytechnic University

**PREDICTION OF THE PRINCIPLES SOLID CONSTITUENTS
OF WELDING FUMES BY TYPE ELECTRODE COATINGS**

Medical studies indicate that the welding aerosols are one of the leading causes of occupational diseases welder, such as pneumoconiosis, etc. From the point of view of industrial safety is monitored only permissible concentration of hazardous substances included in the welding fumes. However, these data do not provide a complete picture of the impact of these substances on the body, a more important indicator is the mineral form of localization elements especially in the solid component of welding fumes, as well as their morphology, structure and dispersion. The authors present the results of a study on the morphology, structure and dispersion of the particles of the solid component of the electrodes for welding aerosols with different coatings. The characteristic relationship between composition and morphology, as well as between the particles and the nomenclature of view coverage.

Keywords: welding, coated electrodes, labor protection, a solid component of welding fumes, mineral formation.

Сварочные работы сопряжены с множеством производственных факторов, негативно влияющих на здоровье персонала, наиболее существенным из которых является неизбежное образование сварочных аэрозолей и их выделение в воздух рабочей зоны [1]. Сварочные аэрозоли (СА) представляют собой смесь газа – газовая составляющая сварочных аэрозолей (ГССА) – и мельчайших твердых частиц – твердая составляющая сварочных аэрозолей (ТССА). Медицинские исследования [2] указывают, что СА являются одной из основных причин развития профессиональных заболеваний, таких как пневмокониоз сварщика, а также ряда других опасных поражений организма, сокращающих продолжительность жизни [3]. С точки зрения промышленной безопасности предельно допустимая концентрация вредных веществ, входящих в состав ТССА, в воздухе рабочей зоны сварочных работ нормирована для каждого элемента или его оксида [4].

ТССА состоят из химических соединений следующих компонентов: O, Na, Si, K, Ca, Fe, Mg, Ti, Ni, Cu, S, Cl, Mn. Источником образования ТССА служит свариваемый металл, металл электрода, а также компоненты электродного покрытия и технология сварки [5]. Разнообразие типов электродных покрытий и методов сварки обеспечивает разнообразие частиц ТССА, отличающихся между собой не только составом, но и морфологией, дисперсностью и структурой. Существующие литературные источники [6] описывают прямую зависимость только между составами сварочных материалов и составами аэрозолей в зависимости от технологии сварки. Однако ряд работ [7] указывает на то, что сам по себе химический состав сварочных аэрозолей не дает представления ни о технологическом поведении, ни о влиянии этих веществ на организм, более важным показателем являются минеральные формы локализации элементов в ТССА, а также их морфология, дисперсность и строение [2].

Целью работы является оценка современными методами исследований формы минеральной локализации элементов, морфологии, состава, структуры и дисперсности ТССА в зависимости от вида электродного покрытия при ручной дуговой сварке.

Объектами исследования являлись ТССА, образовавшиеся при ручной дуговой сварке электродами с покрытиями разного типа, а именно: основное (Kobe Steel LB 52U), рутиловое (ESAB ОК 53.70, ОК 46.00), целлюлозное (Kjellberg-Finsterwalde Prima Blue) и кислое (ильменитовое покрытие, соответствующее составу МР-3М, ТУ 1272-303-00187211–2002).

Сварка проводилась на пластинах из стали 20 толщиной 10 мм электродами диаметром 3 мм на сварочном токе 90 А с использованием сварочного выпрямителя ВД-306.

Для того чтобы грамотно реконструировать итоговый минеральный состав ТССА, необходимо представлять себе фазовые превращения минерального вещества электродного покрытия, реализующиеся в процессе сварки, который сопряжен с высокотемпературным и кратковременным нагревом ($T = 1000 \dots 1800 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 2 \dots 10 \text{ с}$) в малом объеме. Для этого в составе каждого рассматриваемого покрытия были выделены элементы и соединения, в которых они представлены, и для каждого из них указано соединение, в которое элемент переходит при образовании частиц ТССА (табл. 1).

Таблица 1

Возможные основные формы элементов в электродных покрытиях и первичные продукты при образовании ТССА

Элемент	Соединение в покрытии	Соединение в ТССА	Тип электродного покрытия
Fe	Ферросилиций Fe_2Si	FeO	Основное
	Ферромарганец FeMn	FeO	Основное
	Гематит Fe_2O_3	FeO	Кислое
	Сидерит FeCO_3	FeO , $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$	Основное
	Роговая обманка $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	FeO , $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$	Рутиловое
Ti	Рутиловый концентрат TiO_2	FeTiO_3 , TiO_2 , CaTiO_3	Рутиловое, целлюлозное
O	Кислород, карбонаты, гигроскопическая вода	Твердые оксиды, газы	Кислое, основное, рутиловое, целлюлозное
F	Плавиновый шпат CaF_2	HF (газ) $\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] \cdot [\text{F,OH}]$	Основное, рутиловое, кислое
C	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$	CO , CO_2	Целлюлозное
Na	Хлорид натрия NaCl	NaCl	Основное
	Полевой шпат $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	Na_2O , $\text{Na}(\text{Al,Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$	Основное, рутиловое
Mg	Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, MgO	Основное, целлюлозное
	Роговая обманка $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Рутиловое
Al	Полевой шпат $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	Al_2O_3 , $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	Основное, рутиловое
	Алюмосиликат $(\text{Ca, Na})[(\text{Al, Si})\text{AlSi}_2\text{O}_8]$	$\text{Na}(\text{Al,Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$	Основное, целлюлозное
	Мусковит $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	$(\text{Na,Ca,Mg})(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_2\text{O}_6$, Al_2O_3	Рутиловое
	Каолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Na,Ca,Mg})(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_2\text{O}_6$, Al_2O_3	Рутиловое

Окончание табл. 1

Элемент	Соединение в покрытии	Соединение в ТССА	Тип электродного покрытия
Si	Ферросилиций Fe_2Si	SiO_2	Основное
	Кварц SiO_2	$\beta-SiO_2$, высокотемпературные модификации	Основное, кислое
	Полевой шпат $Na[AlSi_3O_8]$	$Na(Al,Fe^{3+})Si_2O_6$	Основное, кислое
	Каолин $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	$\beta-SiO_2$, высокотемпературные модификации $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$	Рутиловое
K	Как примесь в алюмосиликате $(Ca, Na)[(Al, Si)AlSi_2O_8]$	KCl, K_2O	Основное, рутиловое
	Мусковит $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	KCl, K_2O	Рутиловое
	Полевой шпат $K[AlSi_3O_8]$	KCl, K_2O	Основное, рутиловое
Ca	Плавиновый шпат CaF_2	$CaSiO_3$	Основное, кислое
	Карбонат кальция $CaCO_3$	CaO	Основное
	Полевой шпат $Ca[Al_2Si_2O_8]$	CaO	Основное, рутиловое
	Доломит $CaMg(CO_3)_2$	$CaMgSi_2O_6$	Основное, рутиловое
Mn	Ферромарганец $FeMn$	MnO	Основное
	марганцевый концентрат $(Ca, Mn)CO_3$	$MnO, MnMgSi_2O_6$	Рутиловое
	Оксид марганца MnO	$MnMgSi_2O_6$	Кислое
Zn	$Zn_2[SiO_4]$	$SiO_2, CaZnSi_2O_6$	Рутиловое
Cl	Хлорид натрия $NaCl$	$NaCl, KCl$	Основное
S	Дисульфид FeS_2	SO_2, SO_3 (газ), Fe_6S_7	Основное, рутиловое

Часть элементов переходит в оксидные формы, как правило, это первичные продукты окисления, которые при повышении температуры вступают в реакции образования комплексных минеральных соединений. Часть этих минеральных соединений приобретает свойственное им кристаллическое строение, а часть преобразуется в частицы аморфного вещества, химическая активность которых выше.

Именно химическая активность образующихся соединений является важным показателем с точки зрения промышленной медицины. Аморфные частицы в большинстве своем относятся к алюминатным (Al–O–Si, Al–O–Al), силикатным (O–Si–O) и железосиликатным (Fe–O–Si) соединениям.

Поведение индивидуальных частиц ТССА может определяться не только установленными закономерностями (см. табл. 1), но и индивидуальными аэродинамическими, физико-химическими и другими внешними условиями. По сути, каждая отдельная частица может представлять собой индивидуальный случай, требующий отдельного описания.

Для таких «индивидуальных» исследований была разработана методика забора образцов ТССА [8]. Она заключалась в осаждении частиц ТССА на двухсторонний углеродный скотч, который был прикреплен на различные части маски сварщика, т.е. непосредственно в той части рабочей зоны, влияния загрязненности которой на человека максимально. В процессе проведения сварочных работ местной принудительной вентиляцией создавали направленный поток аэрозолей для обеспечения более равномерного осаждения частиц на углеродный скотч (рис. 1).

Для обеспечения достаточного количества ТССА для исследования было использовано по пять штук каждой разновидности электродов.

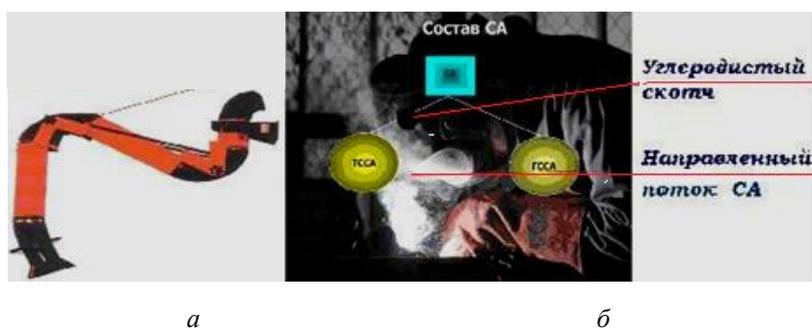


Рис. 1. Отбор ТССА: *а* – местная принудительная вентиляция; *б* – схема нанесения скотча для осаждения ТССА

После проведения сварочных работ скотч с осажденными частицами помещался в контейнер и немедленно транспортировался в лабораторию для проведения исследований (эти меры предосторожности позволяют нам считать, что воздействие на осажденные частицы окружающей среды было минимальным).

Исследование по выявлению характеристик ТССА включало в себя 4 основных этапа: 1) изучение морфологии и размера частиц растровой электронной микроскопией; 2) изучение поэлементного состава частиц с разной морфологией рентгеноспектральным микрозондовым анализом; 3) расчет реального состава частиц ТССА, позволяющий установить, из каких соединений состоят частицы, и определить их структуру; 4) завершающий этап – общая оценка фракционного состава ТССА анализом коллоидных растворов (исследуются искусственно созданные растворы, в которых коллоидные частицы представлены частицами ТССА).

Для исследования растровой (сканирующей) электронной микроскопией использовался микроскоп высокого разрешения S3400N фирмы Hitachi. Рентгеноспектральный состав выявлялся с помощью специализированной приставки, входящей в комплектацию микроскопа. Фракционный состав частиц ТССА оценивали фотонной корреляционной спектроскопией на анализаторе Zetasizer Nano фирмы Malvern. Для аналитического расчета реального состава частиц ТССА использовался программный продукт MathCAD 14.

Вне зависимости от типа покрытия электрода частицы ТССА можно разделить на группы по морфологии: микросферы (делятся на два вида – с волокнистой и с гладкой поверхностью), агломераты, кластеры, волокнообразные и цепочные скопления.

Логично было бы предположить, что сферические частицы являются основным типом, а остальные являются составными скоплениями, однако размер указывает, что сферические частицы зачастую превосходят по размеру агломераты, волокнообразные частицы, кластеры и цепочные скопления (рис. 2). Микросферы вне зависимости от характера поверхности имеют размер 10–100 мкм, агломераты 2–10 мкм, кластеры 1–2 мкм, цепочки – размером до 3 мкм. Сферические частицы размером менее 10 мкм входят в состав других частиц, образуя агломераты, кластеры и цепочные скопления. Волокнообразные скопления имеют протяженность до 80 мкм при толщине до 3 мкм.

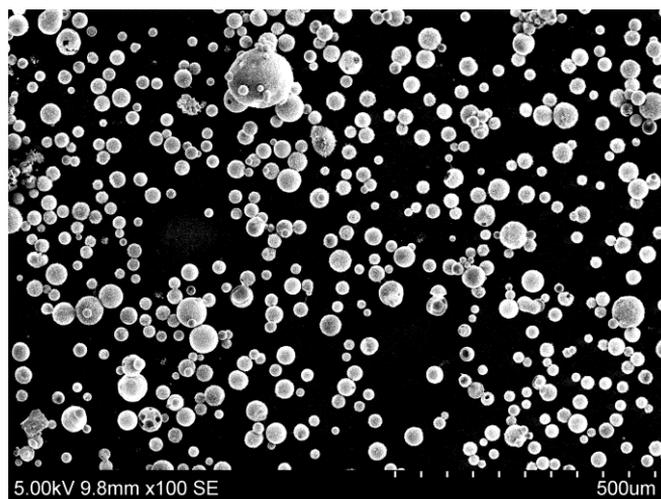


Рис. 2. Общий вид частиц ТССА

Для каждого электродного покрытия характерно образование ТССА, состоящих из нескольких видов разных частиц:

– ТССА, полученные при сварке электродом с основным покрытием марки LB-52U (рис. 3), состоят из агломератов, сферических частиц с волокнистой поверхностью, кластеров и цепочных скоплений;

– ТССА, полученные при сварке электродом с рутиловым покрытием ОК 46.00 (рис. 4), состоят из сферических с гладкой поверхностью, волокнообразных частиц и цепочных скоплений;

– ТССА, полученные при сварке электродом с целлюлозным покрытием Prima Blue (рис. 5), содержат агломераты и сферические частицы с гладкой и волокнистой поверхностью;

– ТССА, полученные при сварке электродом с кислым покрытием МР-3М (рис. 6), содержат сферические частицы с волокнистой и гладкой поверхностью, причем частиц с волокнистой поверхностью больше.

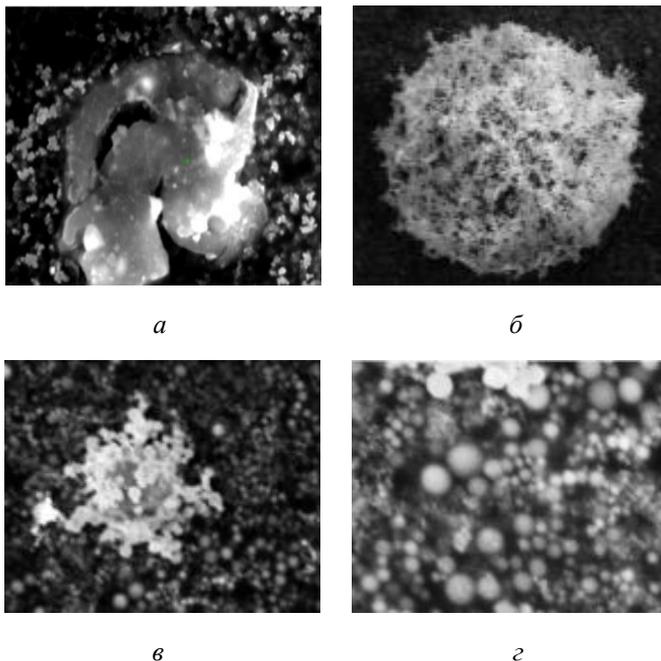


Рис. 3. Частицы ТССА, образованные при ручной дуговой сварке электродом с основным покрытием LB-52U:
а – агломерат; *б* – сферическая частица с волокнистой поверхностью; *в* – кластер; *г* – цепочное скопление

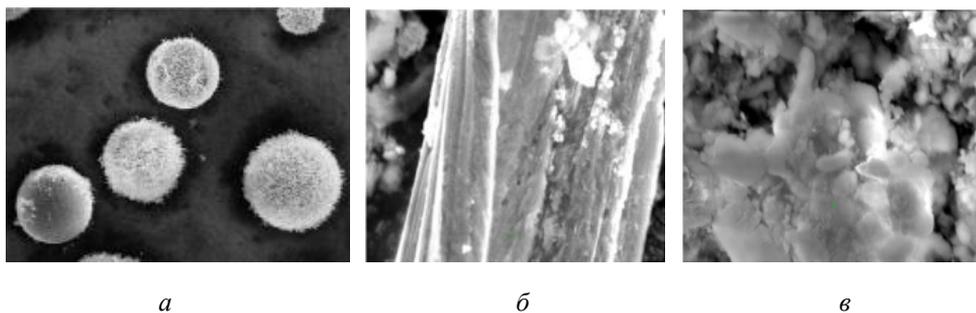


Рис. 4. Частицы ТССА, образованные при ручной дуговой сварке электродом с рутиловым покрытием ОК 46.00:
а – сферическая частица с гладкой поверхностью;
б – волокнообразная частица; *в* – цепочное скопление

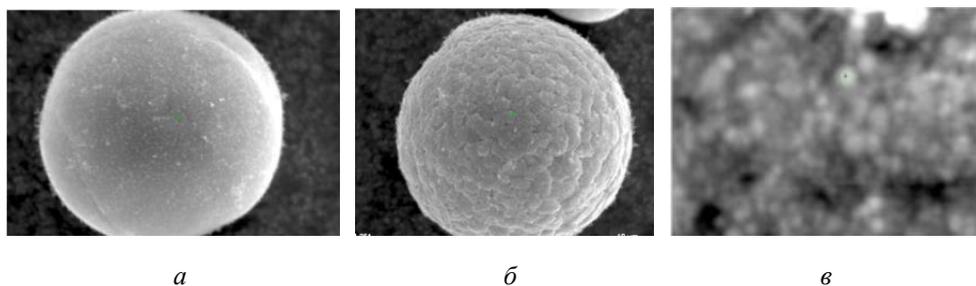


Рис. 5. Частицы ТССА, образованные при ручной дуговой сварке электродом с целлюлозным покрытием Prima Blue: *а* – сферическая частица с гладкой поверхностью; *б* – сферическая частица с волокнистой поверхностью; *в* – агломерат

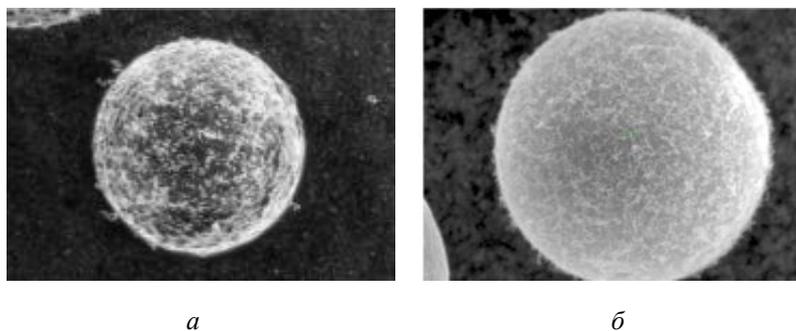


Рис. 6. Частицы ТССА, образованные при ручной дуговой сварке электродом с кислым покрытием МР-3М:
а – сферическая частица с гладкой поверхностью;
б – сферическая частица с волокнистой поверхностью

Согласно данным рентгеноспектрального анализа частицы одного морфологического типа имеют одинаковый состав вне зависимости от того, от какого типа покрытий они были образованы (табл. 2).

Таблица 2

Поэлементный состав ТССА в зависимости от морфологического типа частиц, %

Компонент	Агломерат	Кластер	Сферические частицы с волокнистой поверхностью	Сферические частицы с гладкой поверхностью	Волокнообразные частицы	Цепочные скопления
O	50–70	50–70	60–70	60–70	60–70	50–70
Na	10-18	1–3	2–4	–	–	1–3
Si	1–5	5–16	15–20	–	0–1	5–10
K	2–8	1–4	1–2	–	–	1–4
Ca	1–6	–	–	–	–	–
Fe	1–10	10–15	0–7	40–30	30–40	15–18
Mg	–	–	1–3	–	–	–
Ti	0–12	–	0–20	–	1–2	–
S	1–4	–	–	–	–	–
Cl	1–6	–	–	–	–	–
Mn	0–3	0–3	0–4	–	0–1	3–5
Al	1–4	5–13	–	–	0–1	5–8

Результаты анализа фракционного состава ТССА представлены на рис. 7.

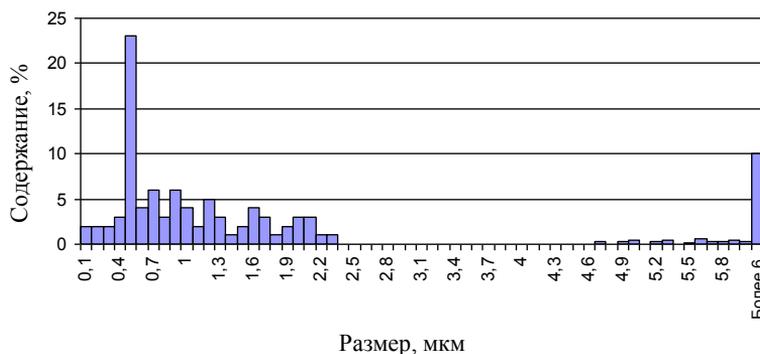


Рис. 7. Фракционный состав ТССА

Согласно полученным данным основную массу ТССА составляют частицы размером 0,1–1,5 мкм, причем частицы размером 0,5 мкм составляют приблизительно 86 мас. % анализированных частиц, около 4 мас. % составляют частицы размером до 6 мкм, остальные 10 мас. % приходятся на частицы размером свыше 6 мкм.

В среднем размер частицы ТССА составляет от 1–45 мкм, для сравнения отметим, что, например, размер эритроцита 7 мкм [9]. Основная масса частиц представлена сферическими частицами с разнообразной поверхностью.

Сферические частицы представляют собой глобулы формы, близкой к идеальной (см. рис. 2). Сферические частицы с волокнистой поверхностью на поверхности имеют мельчайший рисунок и ответвления (рис. 3, б, рис. 5, б, рис. 6, б), напоминающие волокнистую структуру, отличающуюся от структуры тела сферы. Как правило, ответвления и поверхность имеют силикатный состав, а сама сфера представлена оксидом железа с примесями других металлов (см. табл. 1). Сферические частицы с гладкой поверхностью (рис. 4, а, рис. 5, а, рис. 6, а) неодинаковы по составу. Так, некоторые из них имеют поверхность с выделяющимся рельефом, что указывает на то, что частица полнотелая и состоит из оксида железа практически полностью, а некоторые имеют гладкую поверхность, что указывает или на то, что частица представлена аморфным алюмосиликатным образованием и является пустотелой, или (в зависимости от состава) на то, что это та же частица оксида железа, только покрытая пленкой.

Агломераты (рис. 3, а, рис. 5, в) представляют собой скопление частиц неправильной формы, сами агломераты имеют рваный край, большое количество трещин и следы деформации, их состав очень нестабилен, но практически во всех зафиксировано значительное содержание металлов. В то же время наличие алюмосиликатных следов не позволяет рассматривать агломераты как полнокристаллические. Агломераты могут иметь смешанное происхождение, т.е. могут быть образованы в результате взаимодействия частиц, испарившихся и с основного металла, и со шлака. Вероятнее всего, именно в агломератах концентрируется основная часть элементов хлора и серы (см. табл. 1).

Кластеры (рис. 3, в) на первый взгляд имеют схожесть с агломератами, поскольку это также скопление, но принципиальное отличие

кластеров в том, что большая часть частиц, составляющих его, представлена глобулярными образованиями. Сами кластеры имеют более правильную геометрическую форму, отсутствуют следы механического деформирования частиц (трещин, складок). В большинстве случаев микросферы, составляющие кластер, имеют алюмосиликатный и силикатный состав и аморфное строение, что позволяет сделать предположение о возможности растворения в нем других элементов, так, например, в силикатных мотивах могут присутствовать ионы Na, K, Ca и Fe. Некоторые частицы кластера могут быть двухслойными и иметь ядро металлического состава (см. табл. 1), о чем свидетельствуют следы углерода и железа при рентгеноспектральном анализе. Мы предполагаем, что кластеры – это начальная стадия образования сферических частиц, что может быть подтверждено данными работы [10].

Цепочки (рис. 3, *г*, рис. 4, *в*) из мельчайших частиц ТССА не имеют четких размерных диапазонов или форм, это вытянутые скопления наиболее мелкодисперсных частиц, которые зачастую прилипают к сферическим частицам. Цепочки отличаются повышенным содержанием марганца и склонностью к стеклокристаллическому строению. Слипание частиц в цепочные образования, по всей видимости, обеспечивается силикатными прослойками между ними.

Волокнообразные частицы (рис. 4, *б*) состоят из продуктов окисления железа, но при этом имеют продолговатую форму и достаточно узкое сечение. Внешний вид частиц схож с внешним видом волокон, что позволяет предположить, что данные частицы образованы в результате индивидуальных аэродинамических условий, как уже указывалось ранее, и, по всей видимости, эти частицы являются частным случаем некоторых сферических частиц.

Результаты исследований по определению поэлементного состава указывают на то, что частицы ТССА состоят из сложных минеральных соединений на основе нескольких оксидов или из оксида железа (см. табл. 1). Ранее считалось, что все частицы состоят преимущественно из отдельных оксидов, однако данное исследование указывает на обратное, что ставит новые вопросы в оценке влияния сварочных аэрозолей на организм человека.

Таким образом, приведенные исследования по дисперсности, морфологии и составу ТССА при ручной дуговой сварке электродами

с различным покрытием показали, что для каждого электродного покрытия характерно образование ТССА, состоящих из нескольких видов разных частиц имеющих разное строение, состав и форму локализации элементов. Причем частицы одного морфологического типа имеют одинаковый состав вне зависимости от того, от какого типа покрытий они были образованы.

Для исследованных типов электродных покрытий установлено, что:

– в составе ТССА электродов с основным покрытием LB-52U присутствуют: агломераты, содержащие O, Na, Si, S, Cl, K, Ca и Fe, сферические частицы с волокнистой поверхностью, основными компонентами которой выступают Fe, O. Кластеры по химическому составу немного схожи с агломератами, они содержат O, Na, Al, Si, K;

– в составе ТССА электродов с рутиловым покрытием ОК 46.00 присутствуют: агломераты с кластерами, в состав которых входит O, Mg, Al, Si, F, S, Ca, Fe, Zn; сферические частицы, включающие в себя такие элементы, как O, Na, Mg, Al, Si, K, Fe, и волокнистые частицы, состоящие из таких химических элементов, как O, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe;

– в составе ТССА электродов с целлюлозным покрытием Prima Blue присутствуют: агломераты с химическим составом: O, Al, Si, Ca, Ti, Mn и Fe. Сферические частицы с гладкой поверхностью содержат O, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, а волокнистые частицы имеют в своем составе O, Al, Si, Ti, Mn и Fe;

– в составе ТССА электродов с кислым покрытием МР-3М присутствуют: сферические частицы с химическим составом O, Na, Si, K, Al, Ca, Ti, Mg, Mn и Fe;

– значительная часть всей массы ТССА состоит из частиц размером от 0,1 до 1,5 мкм, причем частицы размером 0,5 мкм составляют приблизительно 86 мас. % анализированных частиц, около 4 мас. % от составляют частицы размером до 6 мкм, остальные 10 мас. % приходятся на частицы размером свыше 6 мкм.

Частицы ТССА зависят не только от материала покрытия электрода, но и от индивидуальных условий окисления, направления воздушного потока и т.д., поэтому должны оцениваться прямыми методами для каждой из рабочих зон. Влияние ТССА на организм человека требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Артамонова В.Г. Актуальные проблемы диагностики и профилактики профессиональных заболеваний // Медицина труда и промышленная экология. – 1996. – № 5. – С. 4–6.
2. Гришагин В.М. Сварочные аэрозоли: образование, исследование, локализация, применение: монография / Юргинский технолог. ин-т. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 213 с.
3. Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Оценка морфологии, дисперсности, структуры и химического состава твердой составляющей сварочных аэрозолей посредством современных методов исследований // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 133–138.
4. Исследование физико-химических характеристик твердой составляющей сварочных аэрозолей / Д.А. Кузнецов, А.Л. Симонович, С.В. Наумов, А.М. Игнатова // Аэрозоли Сибири: сб. тез. докл. XIX Рабочей группы конф. Ин-т оптики атмосферы Сиб. отд-я РАН. – Томск, 2012. – С. 78.
5. Характеристика твердой составляющей сварочных аэрозолей различных видов электродных покрытий / Д.А. Кузнецов, А.М. Игнатова, С.В. Наумов, М.Н. Игнатов // Сварка и диагностика – 2012: сб. докл. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2012. – С. 110–114.
6. Flemings M. C. Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots // Scand. J Metallurgy. – 1976. – № 5. – P. 1–15.
7. Игнатова А.М. Современные методы определения фракционного состава сварочных порошковых материалов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 129–133.
8. Игнатова А.М. Механизм образования неметаллических включений в сталях // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 208–211.
9. Игнатова А.М. Петрографические исследования взаимосвязи структуры и свойств базальтового литья и сырья // Десятые всерос. науч. чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова. – Миасс, 2009. – С. 103–115.
10. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 411 с.

Получено 25.04.2014

Кузнецов Денис Александрович (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bluz-men@mail.ru

Смолина Анна Сергеевна (Пермь, Россия) – студентка гр. ТСП-12 Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: a2n7n@yandex.ru

Раков Юрий Владимирович (Пермь, Россия) – студент гр. ТСП-12 Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: rakov-yv@mail.ru

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com

Kuznecov Denis Alexandrovich (Perm, Russian Federation) – Master, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bluz-men@mail.ru

Smolina Anna Sergeevna (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: a2n7n@yandex.ru

Rakov Uriy Vladimirovich (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: rakov-yv@mail.ru

Ignatov Michael Nikolaevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com