

УДК 614.75; 66-978

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**ОЦЕНКА АЭРОЗОЛЕОБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПЕРМСКОГО КРАЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Рассматривается влияние различных аэрозольобразующих минеральных компонентов электродных покрытий на пирогенные процессы, реализующиеся при образовании сварочных аэрозолей в процессе сварки. В качестве примера рассматривается минеральное сырье Пермского края, пригодное для производства покрытий сварочных электродов.

Ключевые слова: сварочные аэрозоли, покрытые электроды, твердая составляющая сварочных аэрозолей, минералообразование.

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

Perm National Research Polytechnic University

**DISCUSSION OF FUMES-FORMING COMPONENTS
IN MINERAL RAW OF PERM REGION FOR MANUFACTURING
COATING WELDING ELECTRODE**

The role of different aerosol-forming mineral components welding electrodes covering in pyrogenic process are discussed in this article. Mineral raw of Perm region was described as example.

Keywords: welding fumes, coating, solid parts of welding fumes, mineral formation.

Известно, что сварочные аэрозоли (СА) состоят из двух составляющих: твердая составляющая сварочных аэрозолей (ТССА) – непосредственно твердые мелкодисперсные частицы и газовая составляющая сварочных аэрозолей (ГССА) – дисперсионная среда [1, 2].

Изучены механизмы образования СА. Так, первый предполагает последовательность испарение – конденсация – окисление, а второй – испарение – окисление – конденсация [3, 4]. Ранее установлены взаимосвязи технологических параметров сварки с характеристиками ТССА и ГССА [5–7].

Исследований, посвященных поведению неорганических компонентов сварочных материалов в ходе высокотемпературных ($T = 1000 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) и кратковременных ($t < 5 \text{ с}$) пирогенных процессов в условиях неравновесных конденсированных систем при сварке недостаточно для полного понимания механизма образования СА.

Целью настоящей работы является оценка роли аэрозолеобразующих минеральных компонентов электродных покрытий и их эволюция в образовании СА в ходе высокотемпературных и кратковременных пирогенных процессов при сварке.

Все аэрозолеобразующие компоненты используются в электродных покрытиях либо в форме самостоятельных минералов, либо в виде химических соединений с органическим веществом. Для многих компонентов сварочных материалов доминирующей формой локализации этих элементов является минеральная. Наибольшее применение в составе электродных покрытий нашли порядка 30 наименований видов сырья, к которому относятся руды и их концентраты, минералы, ферросплавы, органические компоненты и реагенты (табл. 1).

Таблица 1

Классификация минерального сырья Пермского края для компонентов покрытия сварочных электродов

Тип покрытия электрода (А, Б, Р, Ц)*	Компонент	Соответствующая разновидность пермского сырья
Р, Ц	Рутил TiO_2 – ВТУ ВНИИСТА, ГОСТ 22938–78; концентрат титановый, ильменитовый $\text{FeOTiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ – ГОСТ 4414–75	Ильменит (FeTiO_3), титаномагнетит ($[(\text{FeFe}_2)\text{Ti}_2]\text{O}_4$) – Юбрьшка Красновишерского р-на, Ординская группа; анатаз (TiO_2) – Вишерская группа месторождений (м/р); рутил (TiO_2) – Бисерская группа проявлений, Ординская группа м/р; перовскиты (CaTiO_3) – Сарановское м/р
К	Железная руда	Эксплуатируемые месторождения
А, Б, Р	Марганцовая руда MnO_2 – ГОСТ 4418–75	Псилломелановые руды ($\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – Очерский р-он; марганцовая руда (MnO_2 в среднем 24 %) – Парнокское м/р; железомарганцевая руда – Верхне-Чувальские м/р; карбонатные марганцевые (MnCO_3) – Бисерское м/р Горнозаводского района; пиролюзиты (MnO_2) – Вишерская группа м/р
Б, Ц	Мрамор кальцит CaCO_3 – ГОСТ 4416–94; известняк CaCO_3 – МРТУ 5.965-11014–66; мел CaCO_3 – ГОСТ 4415–75	Известняк CaCO_3 – м/р Камень Стрельный, Чаньвинское, Сысоевское м/р Горнозаводского р-на; м/р Белый Камень, м/р Большой Лог; арагониты (CaCO_3) – Сарановское м/р; кальцит (CaCO_3) – Мазуевское м/р, Шаквинская группа; сидерит (FeCO_3) – Сарановское м/р

Окончание табл. 1

Тип покрытия электрода (А, Б, Р, Ц)*	Компонент	Соответствующая разновидность пермского сырья
А, Б, Р	Плавленый шпат (флюорит) CaF ₂ – ГОСТ 4421–73	Флюорит CaF ₂ – Боевское м/р в Ильменских горах; ратовикит CaF ₂ – Вишерская группа м/р
А, Б	Кварцевый песок SiO ₂ – ГОСТ 4417–75	Пылевидный кварц SiO ₂ – Всевьятское м/р; кварцит SiO ₂ – м/р Вижайский Камень, Светлогорское м/р, Губдорское м/р; кремний SiO ₂ – м/р Камень Стрельный, Медные м/р
А, Б, Р	Полевой шпат (ортоклаз) KAlSi ₃ O ₈ – ГОСТ 4422–73	Ортоклаз KAlSi ₃ O ₈ – Троицкое, Губдорское м/р, Ординская группа м/р; анортиты CaAl ₂ Si ₂ O ₈ – Ординская группа м/р
Р	Слюда (мусковит) K ₂ OAl ₂ O ₃ ·6SiO ₂ ·H ₂ O – ГОСТ 14327–82	Слюда KLiMg ₂ (Si ₄ O ₁₀)F ₂ – Светлогорское м/р; мусковит KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂ – Ординская группа м/р, Сарановское м/р; флогопит KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂ – Вишерская группа м/р; биотит K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH,F) ₂ – Вишерская группа м/р
Р	Каолин Al ₂ H ₄ SiO ₅ – ГОСТ 6138–81	Каолинит Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ – Санаторское м/р, г. Александровск, Верхнекамское м/р
Б, Р	Магнезит MgCO ₃ ТУ ЦНИИТмаша	Магнезит MgCO ₃ – Мазуевское м/р, Шаквинская группа; форстерит Mg ₂ SiO ₄ – Вишерская группа м/р; тальк Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ – Сарановское м/р, Верхнекамское м/р
Б, Ц	Доломит (кальцит и магнезит) CaCO ₃ ·MgCO ₃ – ТУ ЦНИИТмаша	Доломит (CaMg(CO ₃) ₂) – Губахинское м/р; м/р Белый Камень, Ординская группа м/р
Р	Титанит	Сфен (титаниты) CaTi(SiO ₄)O – Вишерская группа м/р
Р	Хроматы K ₂ CrO ₄	Хромит FeCr ₂ O ₄ – Южное, Главное Сарановское м/р, Ординская группа м/р; пегматит Cr ₂ O ₃ – Сарановское м/р; волконскоит Cr ₂ O ₃ – Частинская группа м/р
Б, Ц	Глинозем металлургический Al ₂ O ₃ – ГОСТ 30558–98	Алуниты, бокситы, шамозит Al ₂ O ₃ – Койвинское м/р, Вишерская группа м/р; корунд Al ₂ O ₃ – Ординская группа м/р
Б	Хлористый калий, натрий KCl, NaCl	Сильвин KCl – Ординская группа м/р, Верхнекамское м/р; галит NaCl – Ординская группа м/р, Верхнекамское м/р
Б, Р	Карбонат кальция	Карбонат кальция – м/р Белый Камень, м/р Большой Лог; арагониты CaCO ₃ – Сарановское м/р; кальцит CaCO ₃ – Мазуевское м/р
Р	Роговая обманка	Оливины Mg ₂ (SiO ₄) – Вишерская группа м/р
Б	Ферромарганец	Производится на местных предприятиях
Б	Ферросилиций	
Р	Ферротитан	
Ц	Целлюлоза	

*А – кислое, Б – основное, Р – рутиловое, Ц – целлюлозное (соответственно по ISO A, B, R, C).

Многие из видов сырья являются универсальными и входят в состав покрытий различного типа, такие как плавленый шпат, а некоторые необходимы только для одного типа покрытий, например целлюлоза.

Слоистые водосодержащие силикаты и алюмосиликаты – основные породообразующие минералы глин. К их числу относятся:

- каолинит $\text{Al}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$;
- монтмориллонит $\text{Na}_{0,n}\{(\text{Al}_{2-0,n}\text{Mg}_{0,n})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}4\text{H}_2\text{O}$;
- хлориты $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3[(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 3(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{OH})_2$;
- гидрослюды $\text{K}_{1-x}\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_{2-x}(\text{H}_2\text{O}) \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$;
- мусковит $\text{KAl}_2\{\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\}(\text{OH}, \text{F})_2$.

Глинистый материал преимущественно находится в породах в виде тонкорассеянного вещества. Весь этот материал в процессе сварки переходит в шлак и попадает в металл в виде неметаллических включений, являясь поставщиком Al и значительной части Si. Содержание Fe_2O_3 в алюмосиликатных минералах данного типа обычно не превышает 2–3 мас. %, поэтому алюмосиликатный источник железа может преобладать над прочими его минеральными формами только в компонентах с очень низким валовым содержанием Fe_2O_3 , менее 0,5 мас. % [8]. Глины поставляют также и большую часть Na и K. Однако, забегая вперед, отметим, что основная часть натрия и калия улетучивается в процессе сварки и не принимает столь значительного участия в высокотемпературном минералообразовании, как в природных системах.

Наиболее распространенными карбонатами являются: кальцит CaCO_3 , доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, анкерит $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$, сидерит FeCO_3 . С карбонатами связана значительная часть Fe, Ca и Mg.

Оксиды не пользуются широким распространением при создании составов покрытий, исключение составляет кварц. Иногда в качестве компонентов используется гематит (Fe_2O_3), магнетит (FeFe_2O_4), а также различные гидроксиды железа. Имеются указания на наличие $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Основным минералом титана является рутил (TiO_2). Хлориды распространены только в солевых породах, где их содержание может достигать 1–2 %. Минеральными формами локализации хлора являются KCl и NaCl , реже CaCl и MgCl .

Кроме того, для всех типов компонентов характерны соединения металлов и неметаллов с органическим матриксом. Они носят название органоминеральных и на сегодняшний день представляют собой наиме-

нее изученную группу веществ. Под этим термином объединяют: соли Ca, Mg, Na, K и гуминовых кислот (гуматы), комплексные гуматы и элементоорганические соединения со связью C – Э (где Э – S, Si и др.) [9]. Главная минеральная форма нахождения Ca – кальцит (CaCO₃), вторыми по распространенности считаются гуматы. В восстановительной и нейтральной среде при $T \sim 150\text{--}350$ °С гуматы кальция разлагаются с образованием различных продуктов, одним из которых может быть CaCO₃. При температуре выше 750 °С конечным продуктом их разложения в любой газовой атмосфере является CaO, при $T < 700$ °С в качестве промежуточных продуктов могут возникать оксалаты кальция. Гуматы снижают термическую устойчивость органической массы и повышают его реакционную способность. Если в процессе сварки возникают газообразные органические продукты, то часть кальция из гуматных соединений способна переходить вместе с ними в газовую фазу.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос о формах локализации серы в компонентах электродных покрытий, ведь повышенное содержание серы может привести к созданию некачественного сварного соединения. В минералах сера находится преимущественно в виде сульфидов и органических соединений, содержание сульфатов и элементарной (самородной) серы обычно незначительно. Пирит (FeS₂) в большинстве месторождений содержится в виде распыленных тонкодисперсных (менее 100–40 мкм) включений. Сульфаты кальция (ангидрит CaSO₄, Mg, Fe и Na присутствуют в основных породах и связаны с зонами выветривания пластов.

Представленный анализ (см. табл. 1) дополнительно указывает на то, что в Пермском крае минеральные сырьевые ресурсы достаточно полно охватывают весь спектр материалов, необходимых для производства покрытых сварочных электродов различного типа, поэтому при изучении минералообразования, сопутствующего образованию сварочных аэрозолей, рассматривалось поведение именно этих компонентов (табл. 2).

Для того, чтобы представить поведение компонентов сварочных материалов в ходе высокотемпературных и кратковременных пирогенных процессов при сварке и, соответственно, прогнозировать итоговый минеральный состав ТССА, необходимо рассмотреть фазовые превращения минерального вещества.

Таблица 2

Основные типы переходов макрокомпонентов
при минералообразовании, сопутствующем образованию
сварочных аэрозолей в разных средах

Макро-компонент	Соединения, минералы	Соединения, образующиеся при термической обработке в среде	
		окислительной	восстановительной
Сера	Дисульфид FeS_2	SO_2 , SO_3 , сульфаты, пирротин	H_2S , S, сульфаты, сульфиды, сульфиты, пирротин
	Сульфаты	SO_2 , SO_3 , сульфаты	H_2S , S, сульфаты, сульфиты
	Сульфоорганические		
Кремний	Оксид (кварц)	β - SiO_2 , высокотемпературные модификации SiO_2	До 1300 °С те же соединения, что и в окислительной среде, выше – SiC, SiO, кремнийалюминиевые сплавы и др.
	Элементоорганические		
Алюминий	Алюмосиликаты	H_2O , $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + SiO_2$)	До 1500 °С – те же соединения, что и в окислительной среде
	Каолинит		
	Монтмориллонит	H_2O , SiO_2 , кордиерит, энстатит, муллит, шпинель	До 1500 °С – те же соединения, что и в окислительной среде
	Гидрослюды	H_2O , K_2O , стеклообразная масса, муллит, шпинель	
	Полевые шпаты	H_2O , K_2O (газ), Na_2O (газ), стеклообразная масса, муллит, шпинель, силикаты	До 1500 °С – те же соединения, что и в окислительной среде
	Давсонит $NaAlCO_3(OH)_2$	$NaAlO_2$, H_2O , CO_2	
	Комплексные гуматы	Al_2O_3 , H_2O , CO_2	Al_2O_3 , газообразные продукты
Железо	Сульфиды	SO_2 , SO_3 , Fe_2O_3	Fe, FeO
	Сульфаты		Fe, Fe_3O_4 , FeO
	Карбонаты (сидерит)	CO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO	CO_2 , FeO, Fe_3O_4 , Fe_2S
	Оксиды и гидроксиды	H_2O , оксиды железа	CO_2 , FeO, Fe_3O_4 , H_2O
	Комплексные гуматы	То же, CO_2	Fe, Fe_3O_4 , FeO, газообразные продукты
Кальций (магний)	Карбонаты $CaCO_3$, $MgCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$ и др.	CO_2 , CaO, MgO	Те же соединения, что и в окислительной среде
	Сульфаты (гипс)	H_2O , $CaSO_4$	H_2O , $CaSO_3$, CaS, CaO
	Гуматы	CO_2 , CaO, MgO, H_2O	MgO, газообразные продукты
	Алюмосиликаты	Все перечисленные для Al	Все перечисленные для Al

Окончание табл. 2

Макро-компонент	Соединения, минералы	Соединения, образующиеся при термической обработке в среде	
		окислительной	восстановительной
Натрий (калий)	Алюмосиликаты	Все перечисленные для Al	Все перечисленные для Al
	Хлориды (NaCl, KCl)	NaCl, KCl	NaCl, KCl
	Гуматы	CO ₂ , R ₂ O, H ₂ O	CO ₂ , R ₂ O, газообразные продукты
Титан	Рутил TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂ , низкие оксиды титана
	Элементоорганические или комплексные гуматы	TiO ₂ , CO ₂ , H ₂ O	Оксиды титана различной валентности, газообразные продукты

При этом необходимо учитывать, что сварочные процессы протекают в условиях быстрого изменения температур в значениях от температуры свариваемого металла до температуры окружающей среды и температуры испарения металла. В этом диапазоне температур физические и химические процессы могут быть разнообразными и нетипичными, поскольку время смены температур весьма мало, менее 5 с. Дуговые сварочные процессы протекают в реакторах открытого типа (рисунок) [10], где под воздействием высоких температур и инфракрасного излучения интенсивно испаряются компоненты покрытий и металлы, которые, окисляясь и конденсируясь за пределами сварочной дуги, образуют субмикронные аэродисперсные частицы; происходят термохимические превращения фторидов и кремнефторидов, восстановление углекислого газа либо неполное окисление органических связующих обмазок и пластификаторов с образованием HF и SiF₄, CO; окисляется азот ($N_2 + O_2 + hv = 2NO$); кислород воздуха превращается в озон ($O_2 + hv \leq O^* + O^*$; $O_2 + O^* < O_3$) [11].

В случае сварки покрытых консервантами, краской либо (и) загрязнениями технологического происхождения деталей, узлов, конструкций, материалов в газовую фазу могут выделяться хлористый водород (HCl), хлор (Cl₂), фосген (COCl₂), четыреххлористый углерод (CCl₄), трихлорэтилен (CCCl₂ = CHCCl), сернистый и серный ангидриды (SSO₂, SO₃), сероводород (H₂SS), фосфор (P₄), фосфорный ангидрид (P₂O₅), фоосфин (PHH₃) и другие токсичные соединения.

При использовании сварочных материалов, содержащих фтористый кальций или другие фторсодержащие компоненты, в составе ГССА присутствуют фтористый водород и тетрафтористый кремний.

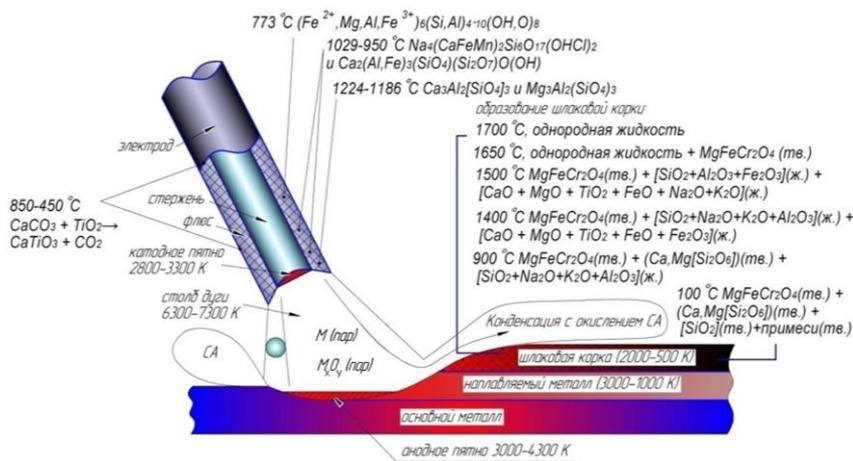
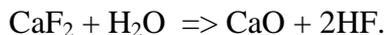


Рис. Принципиальная схема теплообмена в ходе образования сварочного аэрозоля

Фтористый водород появляется в газовой среде при температуре выше 2000 °С в результате взаимодействия фтористого кальция с водяным паром:



При наличии в составе шлакообразующей основы сварочных материалов диоксида титана в составе ГССА появляется газообразный тетрафтористый титан TiF_4 .

Наиболее сложный процесс фазовых превращений имеет место при образовании твердых частиц сварочного аэрозоля. Достаточно наглядно этот вопрос рассмотрен в монографии [12].

Было установлено [13], что ТССА образуется в результате испарения расплавленного металла на торце электрода: пары выделяются в нижней части столба дуги и выносятся газовыми потоками в окружающую атмосферу, где окисляются и конденсируются в твердые частицы [1]. Весь аэрозоль образуется в области, где высокотемпературные пары попадают в окружающую атмосферу. Торцевая часть электрода имеет наиболее высокую температуру, поэтому именно здесь создаются условия, наиболее благоприятные для испарения металла. Установлено, что роль элементов основного металла в образовании аэрозоля незначительна по сравнению с ролью покрытия на торце электрода и капель электродного металла [2], поэтому можно утверждать, что главным источником ТССА является испарение металла с торца электрода и с поверхности капель.

При сварке, как правило, расплавляются не чистые металлы, а сплавы сложного состава. В этих случаях образуется смесь паров компонентов сплава, причем элементы с более низкой теплотой испарения составляют относительно большую часть паров (имеют большее давление) [1].

Неоднородность фазового состава частиц СА связана с тем, что высокотемпературный пар имеет сложный состав и отдельные его составляющие конденсируются при различных температурах (табл. 3).

Таблица 3

Давление насыщенных паров и температура конденсации элементов [12]

Элемент	Давление насыщенных паров, Па	Температура конденсации, К
Mn	0,215	1040
Fe	$0,148 \cdot 10^{-5}$	1052
Na	$31,02 \cdot 10^5$	1196
K	$30,9 \cdot 10^5$	1053

Внешне наиболее прост механизм термического преобразования органоминеральных и элементоорганических соединений. В окислительной среде дуговой сварки в качестве первичных продуктов образуются простые оксиды соответствующих химических элементов. Так, сульфоорганические соединения разлагаются с образованием SO_2 и SO_3 ; комплексные гуматы железа – Fe_3O_4 , $FeFe_2O_4$, FeO , CO_2 , H_2O ; гуматы кальция – CaO , CO_2 , H_2O ; гуматы магния – MgO , CO_2 , H_2O [14].

Наиболее сложные и многоступенчатые преобразования претерпевают минералы силикатного и алюмосиликатного типа. В диапазоне температур 600–900 °С отмечается активная дегидратация и аморфизация каолинита, монтмориллонита, хлоритов, гидрослюд и т.п. Вследствие термодеструкции названных слоистых водосодержащих алюмосиликатов происходит переход всех слагающих их катионов в активированное состояние [15]. Это принципиально важный момент, поскольку именно из-за аморфизации упомянутых минералов все дальнейшие фазовые преобразования в ТССА (в том числе и плавление) реализуются за время, не превышающее нескольких секунд. Данный вопрос подробно рассмотрен в литературе по керамическому производству [16]. Среди активных компонентов выделяют: алюминатный

— в виде Al—O—Si и Al—O—Al – радикалов дегидратированных силикатов и некоторого количества аморфной либо ультратонкозернистой модификации γ -Al₂O₃; кремнистый – в виде кластеров Al—Si—O и O—Si—O; железистый – на начальной стадии обжига основной формой локализации железа, освободившегося из структур разложившихся силикатов, по видимому, является FeO.

Таким образом, при пирогенных процессах инертный силикатный материал преобразуется в тонкодисперсный агрегат в значительной степени аморфизованных соединений, обладающих высокой химической активностью и способных вступать во взаимодействие как друг с другом, так и с CaO, MgO, SO₃. Активированный материал – один из главных компонентов возникающих в дальнейшем расплавов.

В диапазоне температур 600–1000 °С происходит разложение всех карбонатов по схеме $MeCO_3 \rightarrow MeO + CO$. Кальцит и доломит декарбонатируются в широком температурном интервале (700–900 °С). Скорость этих реакций растет с повышением температуры, зависит также от условий массопереноса, размеров частиц и состава газовой фазы.

Доломит активно разлагается при температуре 750 °С по схеме $CaMg(CO_3)_2 \rightarrow Ca(CO_3) + MgO + CO^{2-}$ с образованием периклаза (MgO) и кальцита. Последний при более высоких температурах декарбонатируется, образуя порошокатую известь (CaO).

Наиболее низкую температуру разложения имеют соединения железа, который активно диссоциирует начиная с 600 °С:



– $FeCO_3 \rightarrow FeO + FeFe_2O_4 + CO_2\uparrow + CO\uparrow$ (умеренно восстановительная атмосфера),



В результате протекания этих реакций система обогащается тонкодисперсными оксидами Ca, Mg и Fe. Указанные соединения обладают высокой реакционной способностью вплоть до температуры 1200–1300 °С. При более высокой температуре их реакционная способность заметно снижается, вероятно, вследствие образования ими стабильных соединений (шпинелиды, алюминаты и ферриты кальция), участия в формировании расплавов и перекристаллизации чистых оксидов [17].

Дальнейшая эволюция фазового состава ТССА в значительной мере зависит от форм локализации железа. В восстановительных средах железо способно находиться в двухвалентном состоянии в форме вюстита (FeO), в окислительных средах – в форме магнетита (Fe^{2+} , $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$) и гематита (Fe_2O_3). Особняком стоит обширный класс ферритов Mg и Ca , где железо имеет валентность Fe^{3+} : $\text{MgFe}_2^{3+}\text{O}_4$, $n\text{CaO}\cdot m\text{Fe}_2\text{O}_3$. Однако образование этих ферритов лимитируется не только окислительно-восстановительным потенциалом газовой среды, но и химической активностью Ca и Mg , поэтому появление твердых растворов в пределах серии магнетит – магнезиоферрит (\pm ферриты кальция) возможно и в слабовосстановительной атмосфере.

Таким образом, при оценке роли аэрозолеобразующих минеральных компонентов электродных покрытий и их эволюции в образовании СА в ходе высокотемпературных и кратковременных пирогенных процессов при сварке установлено, что на первой стадии пирогенных процессов при сварке подавляющее количество макрокомпонентов минеральной части образует соединения высшей валентности. При температуре процессов выше $1500\text{ }^\circ\text{C}$ основным соединением железа является вюстит, при температуре ниже $1000\text{ }^\circ\text{C}$ – гематит, в интервале $1000\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$ соотношение двух- и трехвалентных форм железа примерно одинаково, при $T = 1000\text{...}1200\text{ }^\circ\text{C}$ в ТССА способен появиться магнетит. Содержание Si и Al определяет не только температуру плавления компонентов ТССА, но и общее направление минералообразования при пирометаморфизме неорганической составляющей покрытия электродов. Дефицит этих компонентов в первую очередь ответственен за появление свободной извести (CaO) и периклаза (MgO) в итоговом составе ТССА.

Установлено, что при сварке покрытыми электродами в ТССА переходит 1–3 % электрода. Более чем 90 % твердых частиц в сварочном дыме образуется путем испарения покрытия электрода и присадочного металла. Кроме того, частицы образуются и при конденсации паров металла. Около 1 % электрода конденсируется в наночастицы оксида металла, которые, объединяясь, образуют агломераты частиц. Химический состав образующейся ТССА на 80–90 % обусловлен составом сварочных материалов. В составе ТССА, в зависимости от сва-

рочных материалов и свариваемых металлов, возможно наличие оксидов металлов и их комплексных соединений различных классов.

Список литературы

1. Гришагин В.М. Сварочные аэрозоли: образование, исследование, локализация, применение: монография / Юргинский технолог. ин-т. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 213 с.
2. 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.
3. Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, С.С. Миличенко [и др.]; под ред. И.К. Походни. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
4. Исследование физико-химических характеристик твердой составляющей сварочных аэрозолей / Д.А. Кузнецов, А.Л. Симонович, С.В. Наумов, А.М. Игнатова // Аэрозоли Сибири: сб. тезисов докладов XIX Рабочей группы конф. / Ин-т оптики атмосферы СО 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-

сийские научные 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.

11. Шпирт М.Я., Рубан В.А., Иткин Ю.В. Рациональное использование отходов добычи и обогащения углей. – М.: Недра, 1990. – 224 с.

12. Шпирт М.Я., Клер В.Р. Перциков И.З. Неорганические компоненты твердых топлив. – М.: Химия, 1990. – 240 с.

13. Значение жидкокристаллического состояния биогенных структур в патогенезе вибрационной болезни / В.С. Айзенштадт, Н.П. Карханин, А.В. Есин, А.В. Капишников // Гигиена труда. – 1986. – № 6. – С. 41–44.

14. Измеров Н.Ф., Головкова И.П., Чеботарев А.Г. Современные проблемы медицины труда в горнодобывающей промышленности // Бюллетень научного совета. Медико-экологические проблемы работающих. – 2004. – № 1. – С. 41.

15. Кирьяков В.А., Павловская Н.А., Сухова А.В. Изучение окислительного метаболизма в профпатологии (обзор литературы) // Медицина труда и промышленная экология. – 2004. – № 4. – С. 22–26.

16. Полые микросферы из зол уноса электростанций / Л.Д. Данилин, В.С. Дрожжин, М.Д. Куваев [и др.] // Экология в энергетике – 2005: тр. II междунар. науч.-практ. конф. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 196–202.

17. Technical Monitoring of Microspheres from Fly Ashes of Electric Power Stations in the Russian Federation / V.S. Drozhzhin, I.V. Pikulin, M.D. Kuvaev [et al.] // 2005 World of Coal Ash Conference. Lexington/Kentucky, USA. 2005. – P. 114.

Получено 25.04.2014

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

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

Смолина Анна Сергеевна (Пермь, Россия) – студентка гр. ТСП-12 Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: a2n7n@yandex.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) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bluz-men@mail.ru

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

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