

T.L. Rakitskaya ^a, A.C. Truba ^{a,b}, A.A. Ennan ^b

**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ**

^a Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, г. Одесса
^b Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса

Методами рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии изучен фазовый состав свежеприготовленного (СП-УОНИ) и модифицированного водой при 60°C (М-УОНИ) образцов твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА), полученного при сварке стали отечественным электродом марки УОНИ 13/55. Установлено, что оба образца являются полифазовыми и характеризуются высокой степенью кристалличности. В составе СП-УОНИ идентифицированы 10 индивидуальных фаз, а именно магнетит (Fe_3O_4), манганохромит ($(Mn,Fe)(Cr,V)_2O_4$), гетит (Fe_2O_3), β - $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, оксид марганца (Mn_3O_4), фторид кальция (CaF_2), карбонаты калия и натрия, хромат калия (K_2CrO_4), силикат магния ($MgSiO_3$) и др. После модификации ТССА исчезают отражения для водорастворимых фаз, а интенсивность отражений некоторых индивидуальных фаз заметно возрастает. С учетом характеристик отражения (311) фазы магнетита в случае СП-УОНИ ($2\theta=35,465^\circ$; $d=2,529 \text{ \AA}$) и М-УОНИ ($2\theta=35,418^\circ$; $d=2,532 \text{ \AA}$) для них были приблизительно рассчитаны величины параметра элементарной ячейки кубической шпинели: 8,3877 \AA и 8,3976 \AA , соответственно. С применением известного уравнения Шерера оценили размер наночастиц магнетита: 68,0 нм – СП-УОНИ и 31,5 нм – М-УОНИ. ИК-спектры обоих образцов являются довольно сложными, что обусловлено их фазовой неоднородностью и структурными особенностями отдельных фаз. В ИК-спектрах обоих образцов четко проявляются полосы валентных и деформационных колебаний связей M–O и M–OH, характерных для оксидов металлов и шпинелей. Результаты рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии свидетельствуют об изменении структуры отдельных фаз образцов при гидротермальной обработке. Образцы СП-УОНИ и М-УОНИ проявляют защитные свойства относительно озона при $C_{O_3}^h = 1,0 \text{ мг}/\text{м}^3$, однако отличаются временем защитного действия. Для СП-УОНИ предельно-допустимая концентрация озона достигается через 600 мин, тогда как для образца М-УОНИ время защитного действия в 10 раз меньше. Активность образцов СП-УОНИ и М-УОНИ в реакции разложения озона зависит от многих факторов, среди которых фазовый состав и соотношение фаз, способных проявлять катализические свойства в реакции разложения озона; размеры элементарной ячейки; размер наночастиц магнетита.

Ключевые слова: твердая составляющая сварочного аэрозоля, фазовый состав, разложение озона.

Введение

Основным вредным фактором сварочного и родственных производств является сварочный аэрозоль (СА). Твердая составляющая СА (ТССА) – аэродисперсные частицы, образующиеся в результате окисления и конденсации за пределами сварочной дуги паров компонентов покрытия электродов и флюсов, а также металлов; газообразная составляющая СА (ГССА) – токсичная часть дисперсной среды, образующаяся вследствие термохимических превращений

фторидов и кремнефторидов, восстановления диоксида углерода либо неполного окисления органических связывающих обмазок и пластификаторов с выделением CO, HF и SiF₄; окисления азота (N₂+O₂+hv↔2NO); конверсии кислорода в озон (O₂+hv↔O[·]+O[·]; O₂+O[·]↔O₃) [1–4]. Среди перечисленных газов озон является чрезвычайно опасным соединением – предельно-допустимая концентрация для рабочей зоны составляет 0,1 мг/м³. С учетом объемов и технологий сварочного и родственных производств, а

также применяемых при этом материалов, актуальными задачами являются не только снижение токсического воздействия ТCCA и ГССА на окружающую среду и работающий персонал, но и утилизация твердых отходов для получения продукции промышленного и бытового назначения.

Впервые показана возможность применения ТCCA в качестве сорбентов кислых газов и нефтепродуктов, наполнителей полимерных композиционных материалов и высокотемпературных ($700\text{--}900^{\circ}\text{C}$) катализаторов окислительной конденсации метана [4].

Нами детально изучен фазовый состав ТCCA, образующихся при сварке стали отечественными электродами марок АНО-4 и ЦЛ-11 и впервые обнаружены их катализические свойства в реакции разложения озона [5]. Очевидно, что катализические свойства ТCCA в химических реакциях любого типа будут определяться его химическим и фазовым составом. Эти свойства ТCCA зависят от природы свариваемых металлов и электродов, материалов покрытия электродов и режима сварки [6–8]. Судя из литературных источников, фазовый состав ТCCA, получаемого при сварке металла отечественным электродом УОНИ 13/55 мало изучен, а вопросы утилизации таких материалов не рассматривались.

Цель работы – установить фазовый состав твердой составляющей сварочного аэрозоля, получаемого при сварке стали электродом УОНИ 13/55, а также катализические свойства ТCCA в реакции низкотемпературного разложения озона.

Экспериментальная часть

Для исследований были взяты образцы фракций (J1мкм) твердой составляющей сварочного аэрозоля, образующейся при сварке металлов электродами УОНИ 13/55 (ISO 2560 E434B20) диаметром 3 мм с фтор-кальциевым покрытием (параметры режима сварки: постоянный ток, обратная полярность, $U=33$ В, $I=140\text{--}150$ А, скорость перемещения электрода $V=4,5$ мм/с).

Химический состав электрода УОНИ 13/55. Состав проволоки Св-08Х19Н10Б (мас.%): Fe – 98,8; C – 0,10; Mn – 0,35–0,60; Si – 0,03; Cr – 0,15; Ni – 0,30; состав фтор-кальциевого покрытия (мас.%): ферромарганец – 5,0; мрамор – 54,0; плавиковый шпат – 15,0; кварц – 9,0; ферросилиций – 5,0; ферротитан – 12,0.

В работе исследуются свежеприготовленные (СП-ТCCA-УОНИ) и модифицированные (М-ТCCA-УОНИ) образцы твердой составляющей сварочного аэрозоля. Модификация ТCCA-УОНИ осуществляли следующим образом. Пробу ТCCA массой 1 г заливали 20 мл

дистиллированной воды; при $T=60^{\circ}\text{C}$ и постоянном перемешивании пробу выдерживали в течение 2 ч, после чего фильтровали; твердый осадок сушили при $T=110^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы.

Рентгенофазовый анализ образцов выполнен на порошковом дифрактометре Siemens D500 в медном излучении CuK_{α} ($\lambda=1,54178$ Å), с графитовым монохроматором на вторичном пучке. Образцы после растирания в ступке помещали в стеклянную кювету с рабочим объемом $2,0\times1,0\times0,1$ см³ для регистрации дифрактограммы. Дифрактограммы измерены в интервале углов $3^{\circ}<2\theta<110^{\circ}$ с шагом $0,03^{\circ}$ и временем накопления 60 с в каждой точке.

ИК спектры образцов регистрировали с помощью спектрофотометра Perkin Elmer Spectrum BX FT-IR System (разрешение 4 cm^{-1} , функция аподизации Нортон-Бира – сильная). Спектры полученных образцов снимали в прессованных таблетках с КBr.

Образцы свежеприготовленных и модифицированных ТCCA были тестированы в реакции разложения озона. Образец массой 0,5 г помещали в термостатированный при 20°C реактор вертикального типа. Озоно-воздушную смесь с концентрацией озона $1,0\text{ mg/m}^3$ получали в озонаторе ИГ-1Ш действием тихого электрического разряда на кислород воздуха. Относительная влажность и линейная скорость ОВС составляли 65% и 3,2 см/с, соответственно. Объемный расход ОВС составлял 1 л/мин при относительной ошибке измерения $\pm 5\%$. Начальную ($C_{O_3}^h$) и конечную ($C_{O_3}^k$) концентрации озона в области от 0,05 до 1 mg/m^3 осуществляли с помощью прибора «652 ЭХ04» с пределом обнаружения $0,025\text{ mg/m}^3$.

Критерием активности образцов ТCCA в реакции разложения озона служил временной параметр $t_{\text{ПДК}}$ – время достижения предельно-допустимой концентрации озона ($\text{ПДК}_{O_3}=0,1\text{ mg/m}^3$).

Результаты и их обсуждение

Рентгенофазовый анализ. Дифрактограммы свежеприготовленного (рис. 1,а) и модифицированного (рис. 1,б) образцов ТCCA-УОНИ указывают на то, что оба образца характеризуются высокой степенью кристалличности.

Применение современного дифрактометра и программного обеспечения к нему позволило получить качественные дифрактограммы и более детально их проанализировать. Результаты анализа обобщены в табл. 1, в которой представлены данные о фазовом составе и рентгеноспектральных характеристиках: угол отражения 2θ , межплоскостное расстояние d , Å – экспериментальное и справочное, I_N – нормированная интенсивность.

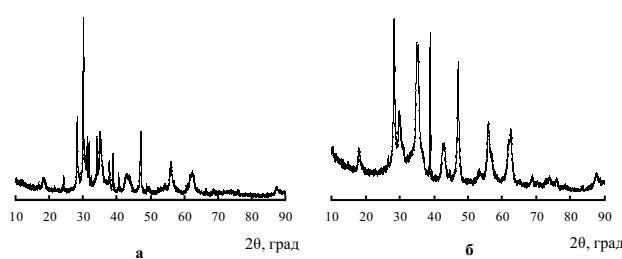


Рис. 1. Дифрактограммы свежеприготовленного (а) и модифицированного (б) образцов ТCCA-УОНИ

Исходя из химического состава проволоки электрода и его покрытия, а также условий синтеза ТCCA, при установлении фазового состава учитывали возможность образования различных шпинелей, интерметаллидов, оксидов и фторидов металлов, силикатных форм, карбонатов и т.д. Установлено, что в состав СП-ТCCA-УОНИ входят 10 индивидуально идентифицированных кристаллических фаз – магнетит Fe_3O_4 [ICPDS 19-0629], манганохромит $(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4$ [ICPDS 31-0630], гетит Fe_2O_3 [9], $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$ [9], оксид марганца Mn_3O_4 [ICPDS 13-0162], фторид кальция CaF_2 [ICPDS 35-0816], карбонаты калия и натрия [9], хромат калия (K_2CrO_4) [9], силикат магния MgSiO_3 [ICPDS 11-0273]. Среди прочих возможных шпинелей, с учетом элементного состава ТCCA [2], предпочтение отдали фазе манганохромита $(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4$, в которой ванадий присутствует в виде примеси. Для этой фазы на дифрактограмме обнаруживается четыре индивидуальных отражения и одно отражение в смеси фаз $(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4 + \beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O} + \text{MgSiO}_3$. Наиболее интенсивные отражения наблюдаются для смеси фаз, в состав которых входят в том числе и водорастворимые карбонат и хромат калия и фторид натрия (табл. 1). Самое интенсивное отражение ($2\theta=30,073^\circ$; $d=2,969 \text{ \AA}$; $I_N=1000$) принадлежит смеси фаз $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{K}_2\text{CrO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$. В этой связи характерное для магнетита (Fe_3O_4) отражение (311) при $2\theta=35,465^\circ$ имеет меньшую интенсивность ($I_N=177$).

Дифрактограмма модифицированного образца ТCCA-УОНИ (рис. 1, б) свидетельствует о том, что в области $2\theta = 31,768 - 40,628^\circ$ исчезли отражения, принадлежащие водорастворимым карбонатам калия и натрия, а также изменилось соотношение интенсивностей, как для индивидуальных, так и смеси фаз.

С учетом характеристик отражения (311) фазы магнетита для СП-ТCCA-УОНИ ($2\theta=35,465^\circ$; $d=2,529 \text{ \AA}$) и М-ТCCA-УОНИ ($2\theta=35,418^\circ$; $d=2,532 \text{ \AA}$) оценили параметр элементарной ячейки кубической шпинели $a=8,3877 \text{ \AA}$ (СП-ТCCA-УОНИ) и $a=8,3976 \text{ \AA}$ (М-ТCCA-УОНИ). Полученные данные находятся в соот-

Таблица 1
Результаты рентгенофазового анализа образцов
ТCCA-УОНИ

Фаза	Индивидуальные фазы		
	2θ , град	I_N	$d, \text{\AA}$
		эксп.	справ.
$(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4$			
	18,055	54	4,909
	29,740	131	3,001
	56,066	160	1,639
	61,823	95	1,499
	35,465	177	2,529
Fe_3O_4 (магнетит)	42,880	89	2,107
	62,104	111	1,486
	24,103	44	3,689
Fe_2O_3 (гематит)	35,844	87	2,503
	62,134	106	1,493
$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$ (агакансит)	39,243	31	2,293
	43,055	92	2,099
	28,749	66	3,103
Mn_3O_4	42,664	88	2,117
	62,689	103	1,481
CaF_2	28,282	357	3,153
	47,023	317	1,931
	68,663	31	1,366
	87,361	55	1,115
K_2CO_3	31,768	208	2,815
	37,831	141	2,376
$\text{Na}_2\text{CO}_3\text{·H}_2\text{O}$	40,628	95	2,220
K_2CrO_4	29,176	40	3,058
	53,028	23	1,726
	57,110	39	1,612
MgSiO_3	30,844	109	2,897
	54,978	27	1,669
	68,914	16	1,361
Смеси фаз			
Fe_3O_4 ;			
Mn_3O_4 ;	30,073	1000	2,969
K_2CrO_4 ;			2,98
Na_2CO_3			2,96
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;	31,224	239	2,862
Mn_3O_4			2,87
K_2CO_3 ;	34,090	255	2,628
$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$			2,61
$(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4$;			2,64
$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$;	35,050	279	2,558
MgSiO_3			2,551
$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$;			2,29
Mn_3O_4 ;	38,836	184	2,317
K_2CrO_4 ;			2,36
NaF			2,32
$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{·H}_2\text{O}$;			2,32
CaF_2 ;	55,760	130	1,647
MgSiO_3			1,642

вествии с литературными [10]. С помощью уравнения Шерера оценили размер наночастиц магнетита: 68,0 нм – СП-ТCCA-УОНИ и 31,5 нм –

М-ТCCA-УОНИ. Эти значения близки к полученным (39–52 нм) для природного магнетита, диспергированного плазменным способом [11].

ИК-спектроскопия. Полифазовый состав ТCCA можно подтвердить не только методом рентгенофазового анализа, но и методом ИК-спектроскопии. Фрагменты ИК-спектров в области 1800–400 см⁻¹ для образцов СП-ТCCA-УОНИ (а) и М-ТCCA-УОНИ (б) представлены на рис. 2. В табл. 2 идентифицированы полосы поглощения в интервале частот 4000–400 см⁻¹. Оба ИК-спектра являются довольно сложными, что обусловлено фазовой неоднородностью образцов и структурными особенностями отдельных фаз.

Максимум поглощения при 3435 см⁻¹ для СП-ТCCA-УОНИ, отнесенный к валентным колебаниям ОН-группы в ассоциированных молекулах воды, претерпевает заметное высокочастотное смещение до 3467 см⁻¹ (М-ТCCA-УОНИ). Об изменении энергетического состояния ОН-групп свидетельствуют также изменения в области деформационных колебаний молекул воды: сложная полоса с максимумом при 1631 см⁻¹ и плечом при 1646 см⁻¹ (СП-ТCCA-УОНИ) становится симметричной с максимумом при 1633 см⁻¹ (М-ТCCA-УОНИ).

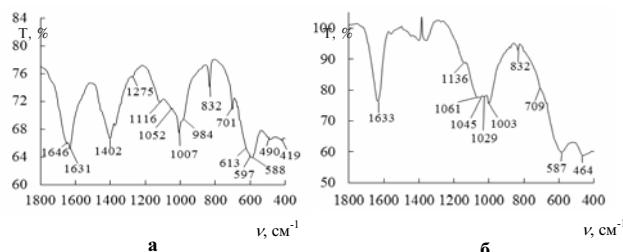


Рис. 2. ИК-спектры свежеприготовленного (а) и модифицированного (б) образцов ТCCA-УОНИ

Обращает внимание участок ИК-спектра в области 1500–1300 см⁻¹, где могут проявляться

полосы поглощения не только ОН-групп, но и адсорбированных молекул O₂ и CO₂ [10], кальцита [12], а также карбонато-карбоксилатных групп, образование которых регистрировали в спектрах оксидов хрома, катализирующего окисление CO кислородом при высокой температуре [13]. В спектре СП-УОНИ наблюдается четкая комбинированная полоса с максимумом поглощения при 1402 см⁻¹ и плечами при 1448 и 1371 см⁻¹, которая практически полностью исчезает в спектре образца М-ТCCA-УОНИ, что находится в согласии с данными РФА (рис 1,б) – после обработки ТCCA горячей водой на дифрактограмме отсутствуют отражения водорастворимых фаз K₂CO₃ и Na₂CO₃.

При идентификации ИК-спектров в области характеристических частот колебаний связей M—O и M—ОН руководствовались литературными данными как для оксидов металлов [12,13], так и шпинелей [14], близких по составу к тем, которые определены в ТCCA на основании РФА (табл. 1). В спектре СП-ТCCA-УОНИ (рис. 2,а) деформационные колебания связей Fe—O—H в шпинельной структуре проявляются в виде разрешенных полос слабой интенсивности при 1275 и 1116 см⁻¹ и плеча при 1052 см⁻¹. Валентные колебания связи Cr—O проявляются в составе комбинированной полосы с максимумом при 1007 см⁻¹ и плечом при 984 см⁻¹, а также в виде разрешенной острой полосы при 832 см⁻¹. В области 800–400 см⁻¹ наблюдается несколько полос поглощения, отнесенных к валентным колебаниям связей Fe—O в шпинелях – 588 и 490 см⁻¹, а также в отдельных оксидах железа(III) – 701, 613, 597 и 419 см⁻¹.

В спектре образца М-ТCCA-УОНИ в области 1250–800 см⁻¹ произошли существенные изменения. Комбинированная полоса уширяется и на ее высокочастотной компоненте можно идентифицировать частоты 1136, 1061, 1045 и 1029 см⁻¹, отнесенные к колебаниям Fe—O—H в

Таблица 2

Волновые числа максимумов поглощения в ИК-спектрах ТCCA-УОНИ

ν, см ⁻¹		Отнесенные полосы
СП-ТCCA-УОНИ	М-ТCCA-УОНИ	
3435	3461	Валентные симметричные колебания ОН-группы в ассоциированных молекулах воды
1646 пл; 1631	1633	Деформационные колебания воды
1402; 1371 пл.; 1448 пл.	1400 о.сл.	Валентные колебания карбонато-карбоксилатных групп (COO ⁻)
1275; 1116; 1052	1136; 1061; 1045; 1029	Валентные колебания Fe—OH в шпинелях
1007; 984 пл.; 832	1003; 832	Валентные колебания Cr—O в координатно-ненасыщенном (высокочастотные) и координатно-насыщенном хроме (низкочастотные)
701; 613 пл; 597; 419	709 пл; 667 пл	Область колебаний связей Fe—O в оксидах
588; 490	587; 464	Валентные колебания Fe—O в шпинелях

шпинели. На низкочастотной компоненте этой полосы обнаруживается частота 1003 см^{-1} , отнесенная к колебаниям связи Cr—O. При этом интенсивность полосы при 832 см^{-1} заметно понизилась. В области $800\text{--}400 \text{ см}^{-1}$ остаются две полосы с центрами при 587 см^{-1} и 464 см^{-1} , отнесенные к колебаниям связи Fe—O в тетраэдрических и октаэдрических позициях катионов железа в шпинели.

Тестирование образцов ТССА-УОНИ в реакции разложения озона. Образцы СП-ТССА-УОНИ и М-ТССА-УОНИ тестированы в реакции разложения озона при $C_{O_3}^h = 1,0 \text{ мг}/\text{м}^3$ (рис. 3). Оба образца активны в реакции, однако отличаются временем защитного действия относительно озона. Так, для СП-ТССА-УОНИ предельно-допустимая концентрация озона достигается через 600 мин. После модифицирования образец сократил время защитного действия в 10 раз. После достижения ПДК концентрация озона на выходе из реактора в обоих случаях нарастает, но в присутствии М-ТССА-УОНИ быстрее.

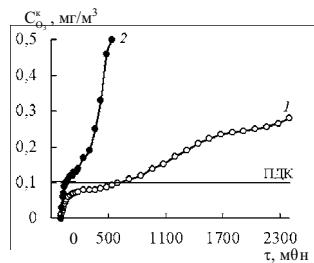


Рис. 3. Изменение $C_{O_3}^k$ во времени при разложении озона исходным (1) и модифицированным (2) образцами ТССА-УОНИ ($C_{O_3}^h = 1,0 \text{ мг}/\text{м}^3$; $m_{\text{об}} = 0,5 \text{ г}$)

Анализ фазового состава образцов СП-ТССА-УОНИ и М-ТССА-УОНИ указывает на наличие соединений, которые могут проявлять катализические свойства в редокс-реакциях. Так магнетит и металлзамещенные магнетиты широко используется в качестве катализаторов реакций органического синтеза, реакций окисления опасных органических соединений в воде [14]; оксиды железа, используются в качестве катализаторов разложения озона [15]. Совершенно очевидно, что активность образцов СП-ТССА-УОНИ и М-ТССА-УОНИ в реакции разложения озона зависит от многих факторов, среди которых фазовый состав и соотношение фаз, способных проявлять катализические свойства в реакции разложения озона, а также размер наночастиц магнетита. С учетом данных об интегральной интенсивности отражений мы оценили содержание катализически активных фаз (КАФ) (магнетит, манганохромит, оксиды железа(III)): 54% в СП-ТССА-УОНИ и 78% в М-ТССА-УОНИ. Хотя после удаления водора-

створимых фаз содержание КАФ повышается, однако для образца М-ТССА-УОНИ время защитного действия понижается. Известно, что в редокс-реакциях катализическая активность наночастиц Fe_3O_4 существенно зависит от их размера [14], поэтому не исключено, что уменьшение размера наночастиц магнетита в образце М-ТССА-УОНИ почти в два раза приводит к потере катализической активности, а следовательно уменьшению времени защитного действия образца. Нельзя не учитывать и тот факт, что потеря активности образца М-ТССА-УОНИ в реакции разложения озона может быть вызвана некоторыми структурными изменениями отдельных фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ракитская Т.Л., Эннан А.А., Волкова В.Я. Низкотемпературная катализическая очистка воздуха от монооксида углерода. — Одесса: Экология, 2005. — 191 с.
2. Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles / Orgya M., Kiro S., Worobiec A., Horemans B., Darchuk L., Novakovic V., Ennan A., Grieken R. // J. Aerosol Sci. — 2012. — Vol.45. — P.50-57.
3. Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding / A.A. Ennan, S.A. Kiro, M.V. Orgya, V.I. Vishnyakov // J. Aerosol Sci. — 2013. — Vol.64. — P.103-110.
4. Эннан А.А. Физико-химические основы улавливания, нейтрализации и утилизации сварочных аэрозолей / Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве. — Одесса: Астропринт, 2002. — С.10-37.
5. Composition and Catalytic Activity of Nanostructured Materials Based on Solid Component of Welding Aerosol / Rakitskaya T.L., Truba A.S., Ennan A.A., Kiro S.A., Volkova V.Y. Phase // Solid State Phenomena. — 2015. — Vol.230. — P.279-284.
6. Явдошин И.Р., Походня И.К. Образование сварочно-го аэрозоля при дуговой сварке плавлением и его гигиеническая оценка / Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве. — Одесса: Астропринт, 2002. — С.38-56.
7. Войткевич В.Г., Безрук Л.И., Есауленко Г.Б. Электронномикроскопическое исследование твердой составляющей сварочных аэрозолей // Автомат. сварка. — 1984. — № 6. — С.33-35.
8. Experimental improvements in analysis of aerosol samples by X-ray powder diffraction / V.-P. Tanninen, H.-K. Hyvarinen, A. Grekula, P.-L. Kalliomaki // J. Aerosol Sci. — 1985. — Vol.16. — № 5. — P.373-378.
9. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Ред. Я.С. Уманского. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961. — 863 с.
10. Структурные особенности Zn-Mn-феррита, синтезированного методом распылительного пиролиза / М.И. Ивановская, А.И. Толстик, Д.А. Котиков, В.В. Паньков // Журн. физ. химии. — 2009. — Т.83. — № 12. — С.2283-2288.

11. Characterization and surface reactivity of natural and synthetic magnetites / Salazar-Camacho C., Villalobos M., Luz Rivas-Sanchez M., Arenas-Alatorre J., Alcaraz-Cienfuegos J., Gutierrez-Ruiz M.E. // Chem. Geology. – 2013. – Vol.347. – P.233-245.

12. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. – М.: Мир, 1991. – 536 с.

13. Давыдов А.А. ИК-спектроскопия в химии поверхности окислов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 245 с.

14. Synthesis of nanosized biogenic magnetite and comparison of its catalytic activity in ozonation / Jung H., Kim J.-W., Choi H., Lee J.-H., Hur H.-G. // Applied Catalysis B: Environmental. – 2008. – Vol.83. – P.208-213.

15. Oyama T.S. Chemical and catalytic properties of ozone // Catal. Rev. Sci. Eng. – 2000. – Vol.42. – P.279-322.

Keywords: solid component; welding aerosol; phase composition; ozone decomposition; catalytic activity.

REFERENCES

1. Rakitskaya T.L., Ennan A.A., Volkova V.Y., Nizkotemperaturnaya kataliticheskaya ochistka vozdukhya ot monoksida ugleroda [Low-temperature catalytic air purification from carbon monoxide]. Ekologiya, Odessa, 2005. 191 p. (in Russian).
2. Oprya M., Kiro S., Worobiec A., Horemans B., Darchuk L., Novakovic V., Ennan A., Grieken R. Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles. *Journal of Aerosol Science*, 2012, vol. 45, pp. 50-57.
3. 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, vol. 64, pp.103-110.
4. Ennan A.A., Fiziko-khimicheskie osnovy ulaylivaniya, neutralizatsii i utilizatsii svarochnykh aerozolei [Physicochemical bases of trapping, neutralization and utilization of welding aerosols]. In: Zaschita okruzhayuschej sredy, zdorov'e, bezopastnost' v svarochnom proizvodstve [Protection of environment, health, and safety in welding]. Astroprint Publishers, Odessa, 2002, pp. 10-37. (in Russian).
5. Rakitskaya T.L., Truba A.S., Ennan A.A., Kiro S.A., Volkova V.Y. Phase composition and catalytic activity of nanostructured materials based on solid component of welding aerosol. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 230, pp. 279-284.
6. Yavdoshchin I.R., Pohodnya I.K., Obrazovanie svarochnogo aerozola pri dugovoi svarke plavleniem i ego gigienneskaya otsenka [Formation of welding aerosol in arc welding and its sanitary estimator]. In: Zaschita okruzhayuschej sredy, zdorov'e, bezopastnost' v svarochnom proizvodstve [Protection of environment, health, and safety in welding]. Astroprint Publishers, Odessa, 2002, pp. 38-56. (in Russian).
7. Voitkevich V.G., Bezruk L.I., Esaulenko G.B. Elektronno-mikroskopicheskoe issledovanie tverdoi sostavl'yayushchei svarochnykh aerozolei [Electron microscopic investigation of the solid component of welding aerosol]. *Avtomatische Svarka*, 1984, no. 6, pp. 33-35. (in Russian).
8. Tanninen V.-P., Hyvarinen H.-K., Grekula A., Kalliomaki P.-L. Experimental improvements in analysis of aerosol samples by X-ray powder diffraction. *Journal of Aerosol Science*, 1985, vol. 16, no. 5, pp. 373-378.
9. Mirkin L.I., Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov [Reference book on X-ray structural analysis of polycrystals]. Gos. Izd. Fiz.-Mat. Literary Publishers, Moscow, 1961. 863 p. (in Russian).
10. Ivanovskaya M.I., Tolstik A.I., Kotikov D.A., Pan'kov V.V. Strukturnye osobennosti Zn-Mn-ferrita, sintezirovannogo metodom raspylelit'nogo piroliza [Structural features of Zn-Fe ferrite synthesized by spray-type pyrolysis]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 2009, vol. 83, no. 12, pp. 2283-2288. (in Russian).
11. Salazar-Camacho C., Villalobos M., Luz Rivas-Sanchez M., Arenas-Alatorre J., Alcaraz-Cienfuegos J., Gutierrez-Ruiz M.E. Characterization and surface reactivity of natural and synthetic magnetites. *Chemical Geology*, 2013, vol. 347, pp. 233-245.
12. Nakamoto K., IK-spektiry i spektry KR neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedinenii [IR and Raman spectra of inorganic and coordination compounds]. Mir, Moscow, 1991. 536 p. (in Russian).
13. Davydov A.A., IK-spektroskopiya v khimii poverkhnosti okislov [IR spectroscopy in surface chemistry of oxides]. Nauka, Novosibirsk, 1984. 245 p. (in Russian).
14. Jung H., Kim J.-W., Choi H., Lee J.-H., Hur H.-G. Synthesis of nanosized biogenic magnetite and comparison of its catalytic activity in ozonation. *Applied Catalysis, B: Environmental*, 2008, vol. 83, pp. 208-213.
15. Oyama T.S. Chemical and catalytic properties of ozone. *Catalysis Reviews – Science and Engineering*, 2000, vol. 42, pp. 279-322.