



СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНЫХ КОНДЕНСАТОВ NaCl–Fe

С.Е. Литвин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены наноструктурные конденсаты NaCl–Fe, полученные электронно-лучевым испарением (методом EB PVD) из двух источников и физическим осаждением смешанного парового потока на водоохлаждаемую медную подложку. Микроструктуру конденсатов NaCl–Fe изучали сканирующей электронной микроскопией на приборе VEGA 3, а наноструктуру — просвечивающей электронной микроскопией на приборе H-800. Отделенные от подложки конденсаты исследовали на воздухе методом термогравиметрического анализа (ТГА) в диапазоне 20...650 °С на анализаторе TGA 7. Представлены результаты исследований микроструктуры и сорбционных свойств конденсатов NaCl и NaCl–Fe (28 мас. % Fe) при насыщении их влагой. Проанализированы данные ТГА с обработкой по моделям Коутса–Редферна и Фримена–Кэрролла и расчетом энергии активации и порядка реакции разложения при нагреве. Показано, что при извлечении конденсатов из вакуумной камеры наночастицы железа в пористой матрице NaCl активно адсорбируют из воздуха не только влагу, но и кислород. При нагреве в дальнейших исследованиях десорбция влаги и кислорода приводила к монотонно ниспадающим ТГА-зависимостям. Библиогр. 17, табл. 1, ил. 5.

Ключевые слова: метод EB PVD; термогравиметрический анализ; энергия активации; порядок реакции; конденсаты; наночастицы; сорбция; вода; кислород

В последнее время очень активно развивается направление по использованию металлических наночастиц в медицине. Одним из перспективных методов получения наночастиц металлов является метод EB PVD — электронно-лучевое испарение из нескольких источников и осаждение смешанного парового потока на подложку в вакууме [1, 2]. В качестве матрицы обычно используют растворимые в воде соли, например, хлориды щелочных металлов, где главным требованием выступает их стабильное поведение в вакууме при нагреве. Для формирования в матрице отдельных наночастиц, концентрация металла не должна превышать 20...35 об. % [3]. Для снижения поверхностной диффузии и предотвращения коагуляции металлических частиц осаждение осуществляют на холодную подложку [2, 4].

Полученные методом EB PVD конденсаты NaCl–Me тщательно изучены в ряде работ [4–7] и опытные партии наночастиц предложены для дальнейших медицинских исследований: для адресной доставки лекарств [8], для лечения сильных кровопотерь [9], для противомикробного применения [10]. В настоящее время продолжаются дальнейшие исследования физико-химических свойств растворимых конденсатов с наночастицами метал-

лов. Очень интересным представляется углубленное изучение их сорбционных свойств. Так, например, без полного объяснения остались необычные потери массы конденсатов NaCl–Me при первичном нагреве на воздухе до температур выше 100 °С [2, 4, 5]. В некоторых случаях с ростом температуры масса монотонно падает [2], в некоторых имеет один минимум [4, 5], а для NaCl–Ag имеет и минимум и максимум, и дальнейшее падение [7]. В то же время при нагреве конденсата чистой соли масса остается практически неизменной [6].

В данной работе предпринята попытка исследовать сорбционные свойства конденсатов NaCl–Fe при первичном нагреве на воздухе.

Материалы и методика эксперимента. Как модель для исследований выбраны конденсаты NaCl и NaCl–28 мас. % Fe (в дальнейшем NaCl–Fe). Образцы (конденсаты) получены классическим способом электронно-лучевого испарения из двух источников и конденсацией совместного парового потока в вакууме на неподвижную медную водоохлаждаемую (25...40 °С) подложку [1]. При этом одним электронным лучом испарялся прессованный штабик кухонной соли, а другим — слиток железа. Камеру вскрывали на следующие сутки после выдержки полученного конденсата в вакууме. Отделенные от подложки образцы представля-

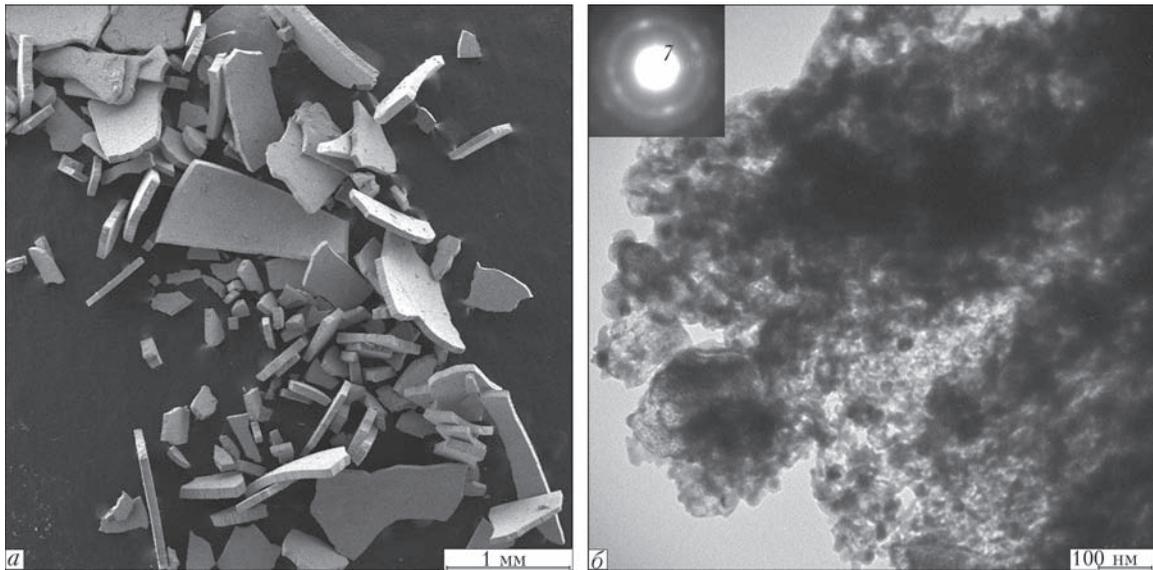


Рис. 1. Макроструктура (а) и наноструктура (б) конденсатов NaCl–28 мас. % Fe. На вставке приведена электронограмма

ли собой хрупкие пластины кристаллической соли толщиной 50...100 мкм. Для уменьшения влияния атмосферной среды эксперименты проводили на полученных конденсатах с минимальным пребыванием их на воздухе.

Микроструктуру конденсатов NaCl–Fe изучали сканирующей электронной микроскопией на приборе VEGA 3 фирмы «Tescan» (Чехия), а наноструктуру — просвечивающей электронной микроскопией на приборе H-800 фирмы «НИТАСНИ» (Япония) при ускоряющем напряжении 100 кВ. Средний интегральный состав полученных конденсатов определяли с помощью рентгеновского флуоресцентного спектрометра X'Unique II фирмы «Филипс» (Голландия).

Кинетику разложения конденсатов изучали динамическим методом в атмосферной среде с помощью термогравиметрического анализатора TGA 7 фирмы «Перкин Элмер» (США) с постоянной скоростью нагрева (или охлаждения) 10 °С/мин в диапазоне от 20 до 650 °С с фиксацией температуры в крайних точках диапазона в течении 5 мин. Интегральное изменение массы образца и скорость этого изменения определяли в зависимости от температуры методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) соответственно. Данные снимали непрерывно с усреднением каждые 6 с. Лодочку для загрузки образца изготовили из платины. Температуру фиксировали с помощью хромель-алюмелевой термопары, предварительно прокаленной по ферромагнитному переходу по двум точкам Кюри. Калибровку весов проводили по стандарту 100 мг. Управление прибором осуществляли с помощью компьютера и специализированного программного обеспечения с возможностью записи и обработки данных.

Полученные результаты. Внешний вид конденсатов NaCl–Fe, извлеченных из вакуумной камеры, показан на рис. 1, а, а тонкая наноструктура представлена на рис. 1, б. Более подробно микроструктуры конденсатов NaCl и NaCl–Fe изучены в работах [4, 5, 6].

На рис. 2 представлены результаты ТГА в атмосферной среде исходных свежеполученных конденсатов NaCl и NaCl–Fe. При первичном нагреве до 650 °С масса конденсата NaCl уменьшалась на 0,26 % с перегибом при 310 °С, а масса конденсата NaCl–Fe изменялась немонотонно с большим минимумом в 2,11 % при 407 °С и дальнейшим ростом до 650 °С. Последующее охлаждение до комнатной температуры привело к небольшому росту массы обоих образцов, а повторный нагрев конденсатов до 650 °С — к незначительному падению ее. Повторный цикл нагрева/охлаждения использовали для подтверждения необратимости процесса изменения массы при первичном нагреве.

Чтобы определить как влияет влага на кинетику разложения исходного конденсата, перед исследованием образцы насыщали влагой. Для этого были выбраны исходный конденсат и исходный конденсат после 2-х циклов нагрева/охлаждения до 650 °С на воздухе (после отжига). Насыщение осуществляли с помощью чашки Петри наполовину заполненной дистиллированной водой. Прикрытую (негерметичную) чашку Петри выдерживали сутки при комнатной температуре, а затем перед исследованием кинетики образец помещали на поплавок, плавающий в чашке Петри, накрывали крышкой и выдерживали 10 мин. Такой образец получил пометку «с влагой». Затем записывали термограммы при двух подряд циклах нагрева/охлаждения от 20 до 650 °С.

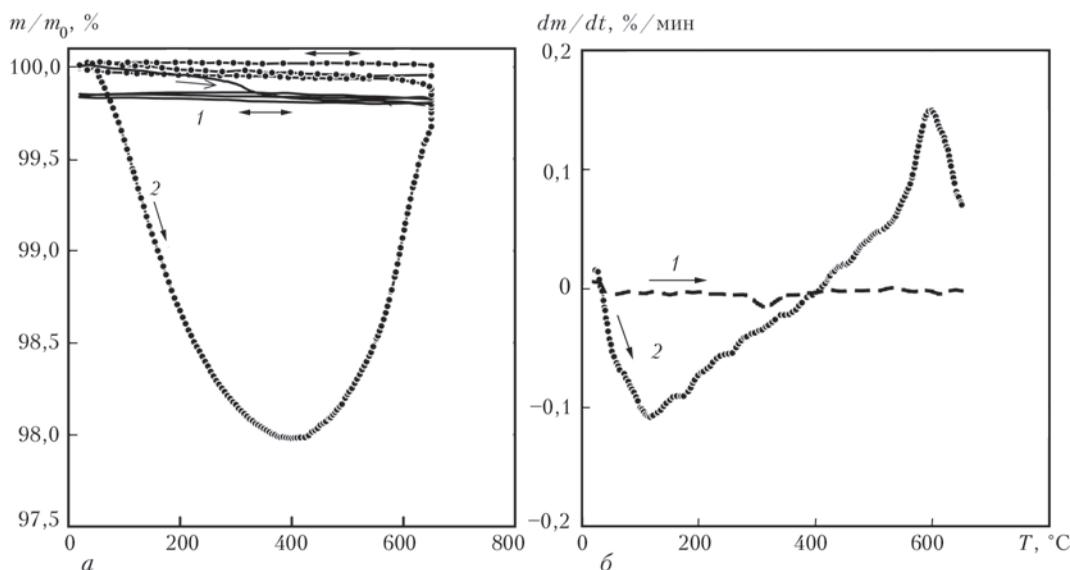


Рис. 2. ТГА исходных конденсатов NaCl (1) и NaCl–28 мас. % Fe (2) при двух циклах нагрева/охлаждения в атмосферной среде (а); соответствующие ДТГ-кривые при первичном нагреве (б)

На рис. 3 представлены результаты ТГА образцов NaCl (а, б) и NaCl–Fe (в, г) в исходном состоянии (кривые 1) и «с влагой», как исходных (кривые 2), так и после отжига (кривые 3). Поскольку при повторных циклах нагрева/охлаждения термограммы слабо меняются и похожи на термограммы при повторных циклах (см. рис. 2), то для упрощения рисунка не приводятся.

При нагреве до 100 °С значительные потери массы конденсата NaCl (как в исходном состоянии, так и после отжига) «с влагой» (рис. 3, а, кривые 2, 3) и конденсата NaCl–Fe после отжига «с влагой» (рис. 3, в, кривая 3) свидетельствуют об исключительной потере массы только за счет удаления воды из этих образцов. Поведение же ТГА-кривых (рис. 3, в) конденсата NaCl–Fe как исходного (кривая 1), так и исходного «с влагой» (кривая 2), при нагреве выше 100 °С указывает на присутствие еще, как минимум, одной причины потери массы.

Обсуждение результатов. При совместном осаждении на подложку NaCl и Fe образуется более пористая структура, чем при автономном осаждении хлорида натрия. Это происходит, прежде всего, за счет затенения основного парового потока соли частицами железа [11]. С понижением температуры подложки снижается скорость диффузии и замедляется рост частиц из парового потока (как соли, так и железа), структура становится более рыхлой, чем на горячей подложке, т.е. пористость возрастает. Если при этом соотношение частиц металл–матрица будет 1:10, то в рыхлой пористой матрице соли получим мелкие металлические частицы с открытой поверхностью в пористой структуре соли, т.е. большую концентрацию мел-

ких металлических частиц с большой суммарной поверхностью. При открытии вакуумной камеры после эксперимента и во время отделения от подложки образец конденсата из атмосферы будет поглощать ее составляющие. На поверхности пор и металлических частиц (при доступе к ним через поры), будет адсорбироваться вода и компоненты атмосферы (азот, кислород). При достаточно малых размерах частицы железа могут вступать в химическую реакцию с кислородом с выделением тепла. На практике в некоторых случаях (при достаточно высокой пористости, большом содержании и малом размере его частиц) наблюдается резкое разогревание отделенных пластин конденсата от подложки и даже возгорание листа бумаги, на который собирают образцы (температура возгорания бумаги 230 °С). Поэтому, чтобы сохранить метастабильное состояние конденсата при отделении от подложки, образцы выдерживают 12 ч в вакуумной камере и осторожно отделяют. Во время ТГА при нагреве конденсата на воздухе происходит десорбция этих компонентов (испарение) из образца. Но уменьшение массы образца NaCl–Fe при нагреве до 407 °С не объясняется только потерей влаги (в том числе и межкристаллитной). Масса образца NaCl убывает в 8 раз меньше, чем NaCl–Fe (рис. 2, а).

Дальнейшее увеличение массы образца NaCl–Fe при нагреве выше 407 °С на воздухе можно объяснить окислением железа. Это увеличение будет расти с содержанием железа в исходном конденсате [5]. При повторном нагреве подобный минимум не будет повторяться из-за того, что процессы испарения влаги и окисления прошли полностью. Даже если в дальнейшем образец насытить вла-

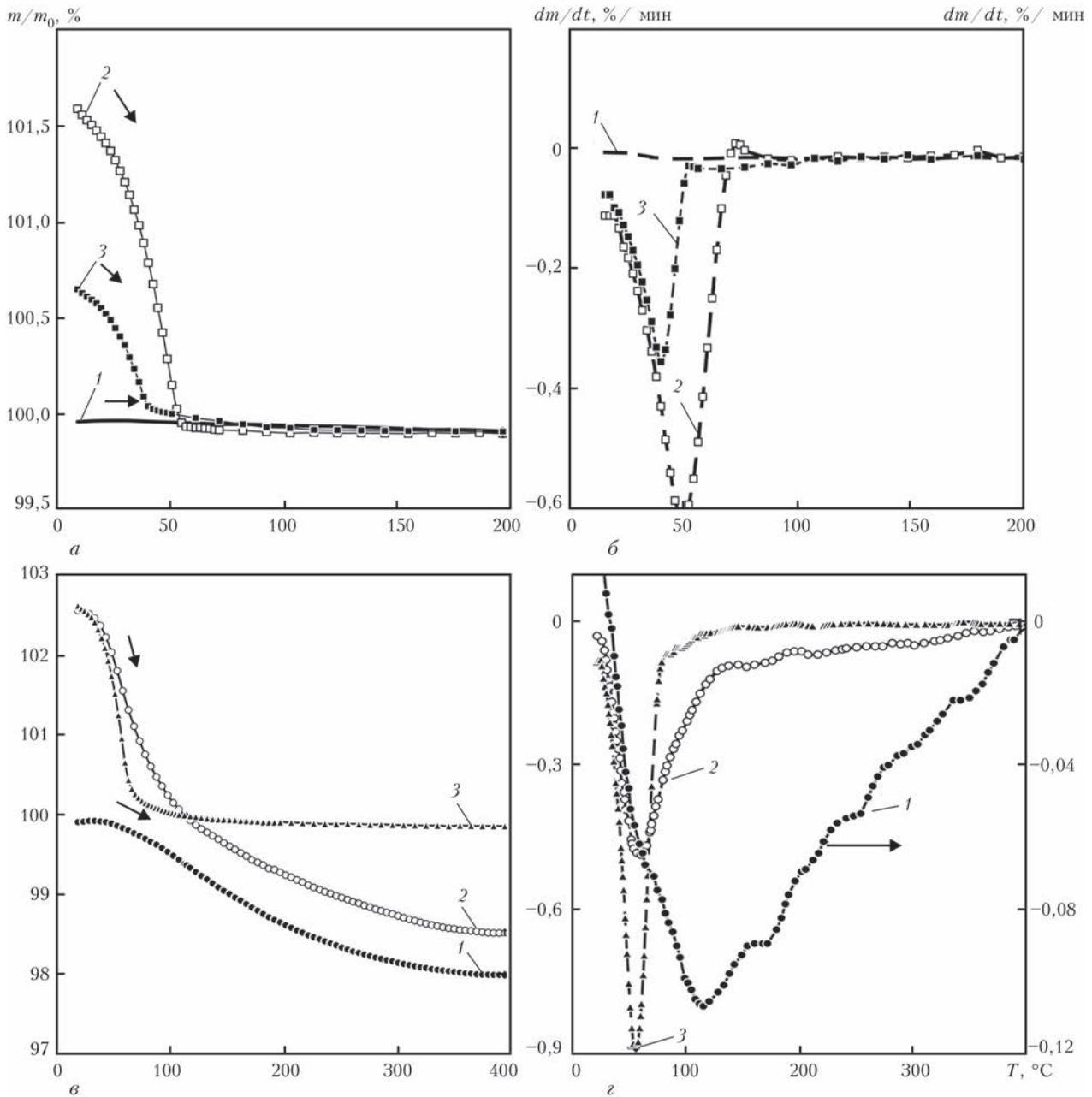


Рис. 3. ТГА (а, в) при первичном нагреве в атмосферной среде конденсата NaCl (а, б) и NaCl-Fe (в, з): 1 — исходный; 2 — исходный «с влагой»; 3 — исходный после отжига «с влагой»; б, з — соответствующие ДТГ-кривые

гой, то при нагреве испарение воды приведет к падению массы, но роста не будет.

Динамическая термогравиметрия позволяет оценить эффективную энергию E активационных процессов разложения. Сравнение полученных данных с литературными данными позволяет понять термодинамику происходящих процессов. Существуют многочисленные методы расчетов энергии активации по результатам динамической термогравиметрии [12]. В последнее время разработаны программы, позволяющие автоматически получать порядок реакции, энергию активации, прогнозы поведения материалов при нагреве, например, AKTS-Thermokinetics software (Швейцария) [13] стоимостью 10 тыс. евро. За неимением

подобной и из-за большого сомнения в корректности ее работы обработку данных ТГА и ДТГ проводили вручную двумя методами.

Первый метод в монографии Уэндланда [12] — метод Коутса–Редферна [14] рассмотрен наиболее подробно. Исходя из кинетического уравнения

$$-\frac{dm}{dt} = km^n \quad (1)$$

и уравнения Аррениуса

$$k = Ae^{-E/RT}, \quad (2)$$

где m — масса образца, вступившая в реакцию за время t ; k — удельная константа скорости реакции; n — порядок реакции; A — предэкспонен-

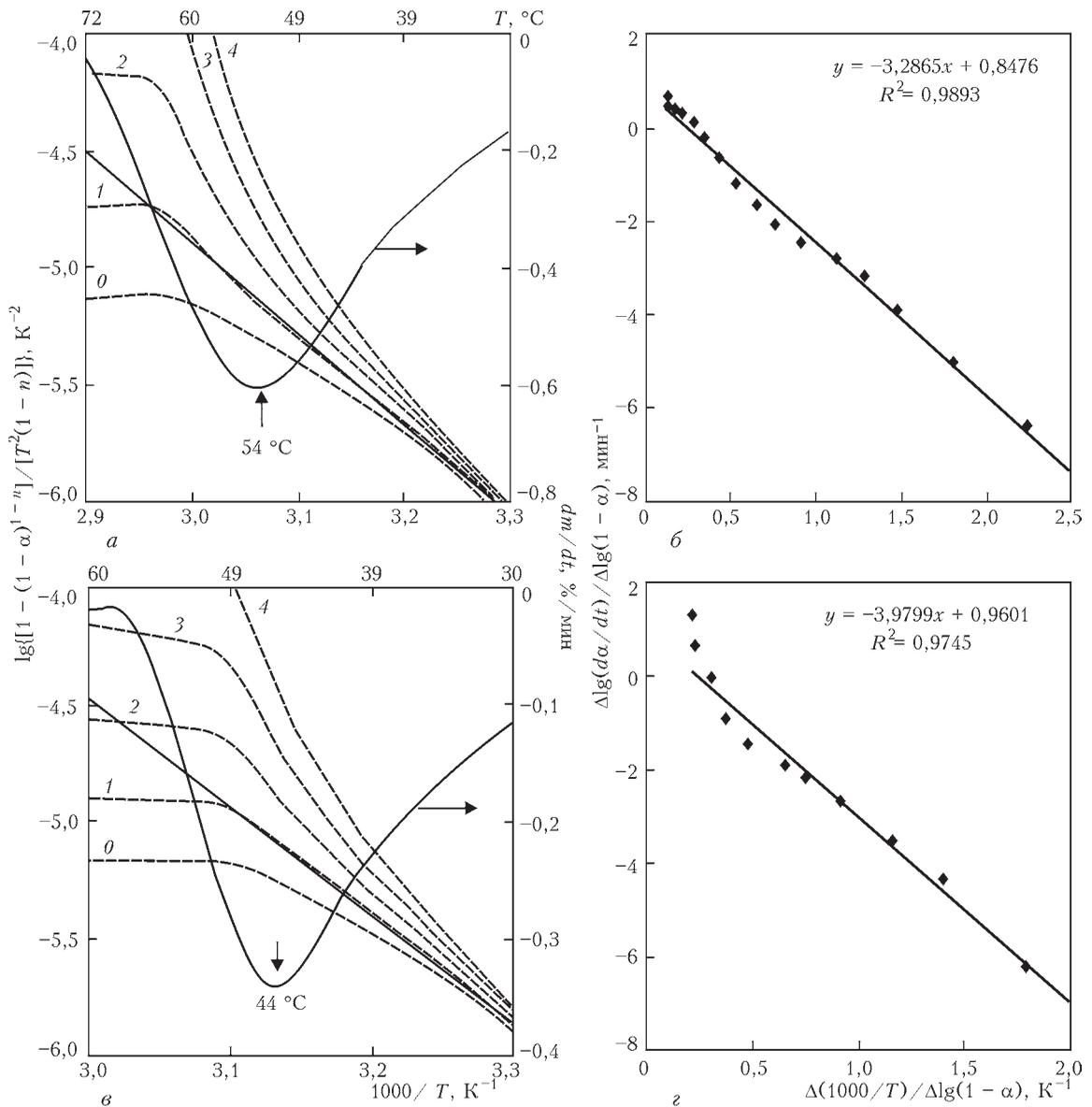


Рис. 4. Обработка данных ТГА конденсатов NaCl по методу Коутса–Редферна (а, в) и Фримена–Кэрролла (б, г): а, б — исходный «с влагой»; в, г — исходный после отжига «с влагой»; 0–4 — порядок реакции *n*; б, г — функции линейризации данных со степенью достоверности R^2 . Для наглядности на а, в приведены ДТГ-кривые процессов разложения

циальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура в градусах Кельвина для реакций, порядок которых неизвестен, при постоянной скорости нагрева

где α — массовая доля образца, разложившаяся за время t ; q — скорость нагрева [8].

Если максимальная потеря массы образца m_0 , а за время t потеряно массы образца m_t , то

$$q = \frac{dT}{dt} = \text{const} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{m_t}{m_0} \quad (5)$$

было получено следующее выражение:

$$\begin{aligned} \lg \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \\ = \lg \frac{AR}{qE} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) - \frac{E}{2,303R} \left[\frac{1}{T} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

При порядке реакции $n = 1$ с исправлениями Озавы [15] выражение (4) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \lg \left[-\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \\ = \lg \frac{AR}{qE} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) - \frac{E}{2,303R} \left[\frac{1}{T} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

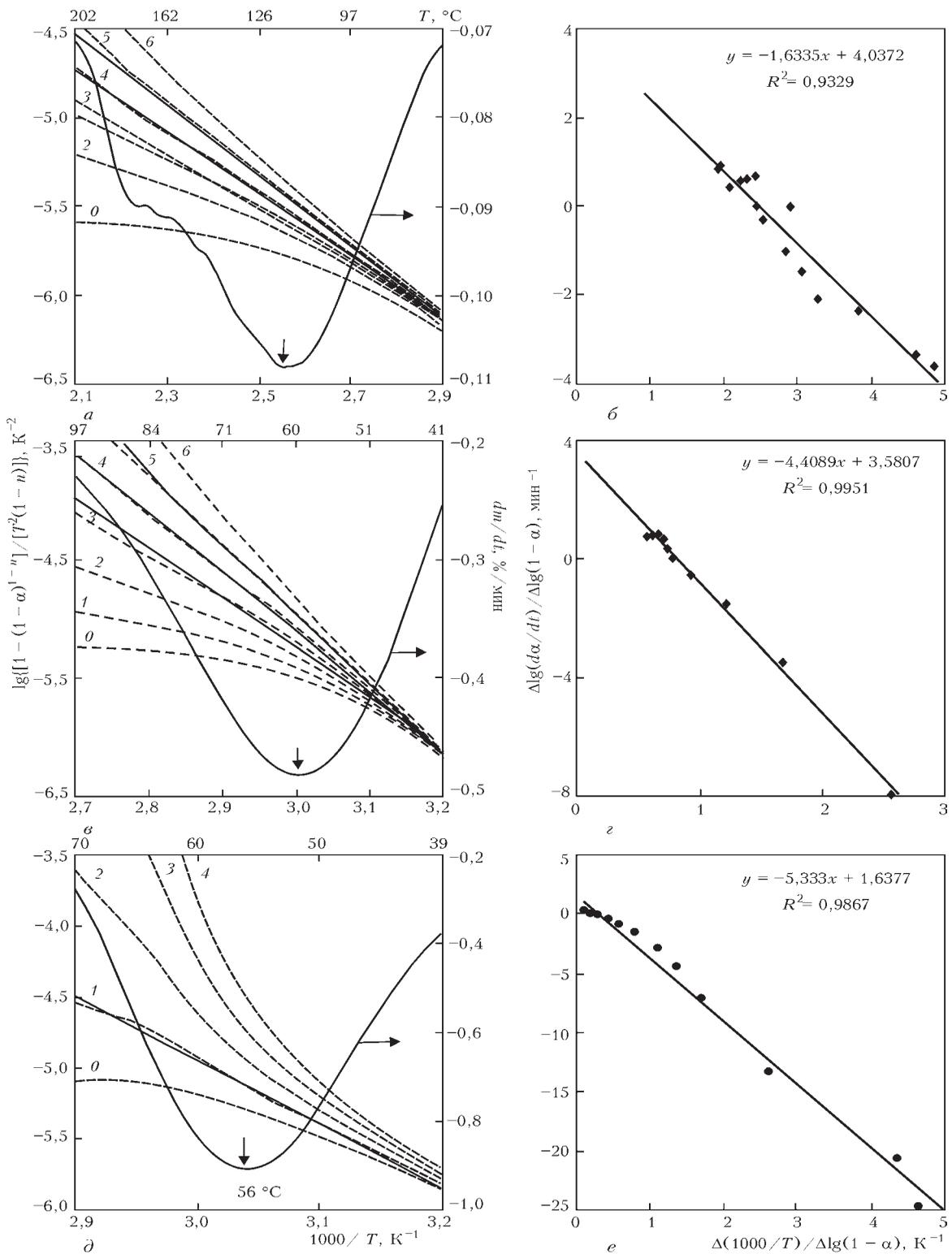


Рис. 5. Обработка данных ТГА конденсатов NaCl-28 мас. % Fe по методу Коутса-Редферна (а, в, д) и Фримена-Кэрролла (б, з, е): а, б — исходный; в, з — исходный «с влагой»; д, е — исходный после отжига «с влагой»; 0-6 — порядок реакции n ; б, з, е — функции линеаризации данных со степенью достоверности R^2 . Для наглядности на а, в, д — приведены ДТГ-кривые процессов разложения

Если построить зависимость $\lg[1 - (1 - \alpha)^{1-n}/(T^2(1 - n))]$ от $1/T$ (или $\lg[-\ln(1 - \alpha)/T^2]$ при $n = 1$ от $1/T$) при правильном выборе значения n получим прямую линию с наклоном, определяемой величи-

ной $-E/(2,303R)$. Отсюда можно получить энергию активации процесса E .

Второй метод позволяет определять не только энергию активации E , но и порядок реакции n . Причем кинетические параметры могут быть по-



Энергия активации E и порядок реакции n конденсатов NaCl и NaCl-Fe исходных, исходных «с влагой» и исходных после отжига «с влагой»

Исходные конденсаты	Отжиг (650 °С, 10 мин)	H ₂ O (пар, 10 мин)	$T_{\text{мин}}$, °С, (ДТГ)	$\Delta m/m_{\text{0max}}$, %	$n_{\text{кр}}$	$E_{\text{кр}}$, кДж/моль	$n_{\text{фк}}$	$E_{\text{фк}}$, кДж/моль
NaCl	-	-	310	-0,26	-	-	-	-
	-	+	54	-1,89	1	-75	0,80	-63
	+	+	44	-0,87	1	-89	0,96	-76
NaCl + 28 % Fe	-	-	117	-2,39	4	-33	4,0	-31
	-	+	59	-3,02	4	-95	3,6	-84
	+	+	56	-2,58	1	-86	1,6	-102

Примечание. Расчеты приведены для моделей Коутса-Редферна ($E_{\text{кр}}$) (6) [14] и Фримена-Кэрролла ($E_{\text{фк}}$) (7) [16].

лучены в любой момент времени реакции. В методе Фримена-Кэрролла [16] эти параметры определяются из уравнения

$$\frac{\Delta \lg(d\alpha / dt)}{\Delta \lg(1 - \alpha)} = n - \frac{E}{2,303R} \left[\frac{\Delta(1/T)}{\Delta \lg(1 - \alpha)} \right] \quad (7)$$

Если построить зависимость $\Delta \lg(d\alpha/dt)/\Delta \lg(1 - \alpha)$ от $\Delta(1/T)/\Delta \lg(1 - \alpha)$, то получим прямую линию с наклоном $-E/2,303R$ пересекающую ось ординат в точке n .

На рис. 4 приведены результаты обработки данных исследования кинетики разложения конденсатов NaCl по методу Коутса-Редферна (6) [14] и Фримена-Кэрролла (7) [16]. Слишком малые потери массы при нагреве исходных свежеполученных конденсатов NaCl (рис. 2, 3, а) не позволили рассчитать энергию активации и порядок реакции. Обработка данных кинетики разложения конденсатов NaCl исходных «с влагой» (рис. 3, а, кривая 2) и после отжига «с влагой» (рис. 3, а, кривая 3) дали близкие энергии активации -75 и -89 кДж/моль соответственно, и порядок реакции равный 1 (таблица). То, что потеря массы образца происходит до 100 °С, указывает на выделение насыщенной влаги, что совпадает с литературными данными [17].

Обработка данных исследования кинетики разложения конденсатов NaCl-Fe оказалась более сложной (рис. 5). Для исходного конденсата NaCl-Fe разложение характеризовалось низкой энергией активации 31...33 кДж/моль и высоким порядком реакции $n = 4$, что указывает на несколько одновременно проходящих процессов. Для случая с исходным конденсатом «с влагой» наблюдается промежуточный вариант. Превалирующий процесс дает высокую энергию активации равную

84...94 кДж/моль (т.е. испаряется вода) и порядок реакции $n = 4$ указывает на присутствие нескольких процессов разложения.

В то же время конденсат NaCl-Fe после отжига «с влагой» теряет вес с высокой энергией активации 86...102 кДж/моль (присуще для испарения воды) и порядком реакции равном 1...1,6. Полученный показатель $n = 1,6$ для модели Фримена-Кэрролла указывает на остатки процесса, влияющего на динамику разложения. Эти данные близки к данным для образцов конденсатов чистой соли «с влагой» (см. таблицу) и совпадают с литературными [17].

Выводы

1. Проведенный анализ динамической термогравиметрии приводит к выводу о нескольких процессах разложения полученных исходных конденсатов NaCl-Fe.

2. Наряду с испарением воды присутствует низкоэнергетический процесс потери массы, возможно, из-за поглощенного ранее кислорода. Пока температура недостаточна для реакции окисления железа, избыток адсорбированного кислорода покидает конденсат NaCl-Fe. Процесс этот необратим, по крайней мере, в пределах времени проведения опыта.

3. Для моделей Коутса-Редферна и Фримена-Кэрролла рассчитаны эффективная энергия активации и порядок реакции разложения при нагреве. Для исходного конденсата NaCl-Fe полученная энергия активации 31 кДж/моль и порядок реакции $n = 4$ не соответствовали испарению воды.

4. Для окончательного определения причин уменьшения веса конденсата NaCl-Fe при нагреве необходимо провести спектральные исследования выделяемого газа (пара).

1. Мовчан Б.А. Электронно-лучевая нанотехнология и новые материалы в медицине — первые шаги // Вісник фармакології та фармації. — 2007. — № 12. — С. 5-13.



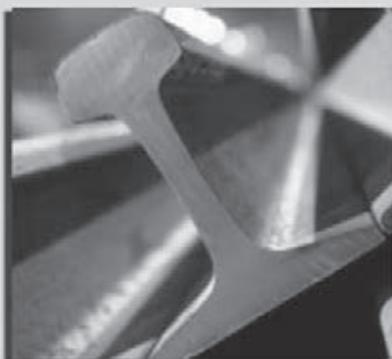
2. Пат. України № 92556. Спосіб одержання наночастинок системи метал–кисень із заданим складом електронно-променевим випаровуванням і конденсацією у вакуумі / Б.Э. Патон, Б.О. Мовчан, Ю.А. Курапов, К.Ю. Яковчук. — Заяв. від 10.11.2010; Бюл. № 21/2010.
3. *Movchan B.A., Lemkey F.D.* Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials // *Materials Sci. and Eng. A.* — 1997. — **224**, Issues 1–2. — P. 136–145.
4. Регулирование состава и структуры наночастиц системы Fe–O в процессе электронно-лучевого испарения Fe₃O₄ / Б.А. Мовчан, Ю.А. Курапов, Г.Г. Дидикин и др. // Порошковая металлургия. — 2011. — **50**, № 3–4. — С. 56–63.
5. Влияние концентрации железа на адсорбционную способность наночастиц оксидов железа в пористой матрице NaCl к кислороду воздуха / Ю.А. Курапов, Б.А. Мовчан, С.Е. Литвин и др. // Современ. электротехнология. — 2011. — № 1. — С. 30–32.
6. Ковинский И.С., Крушинская Л.А., Мовчан Б.А. Структура и некоторые свойства конденсатов хлорида натрия, полученных электронно-лучевым испарением с последующим осаждением в вакууме // Там же. — 2011. — № 1. — С. 42–46.
7. Получение наночастиц серебра и их термическая стабильность в системе Ag–O / Ю.А. Курапов, Л.А. Крушинская, С.Е. Литвин и др. // Порошковая металлургия. — 2014. — **53**, № 3–4. — С. 95–102.
8. Пат. України № 47930. Спосіб отримання стабілізованого розчину наночастинок магнетиту для адресної доставки протипухлинних препаратів / В.Ф. Чехун, І.К. Хаєцький, Н.Ю. Лук'янова та ін. — Заяв. від 25.02.2010; Бюл. № 4/2010.
9. Пат. України № 103401. Спосіб лікування гострої кровотрати за допомогою наночастинок оксиду заліза (II, III) / О.М. Важнича, С.В. Мокляк, Б.О. Мовчан, Ю.А. Курапов. — Заяв. від 10.10.2013; Бюл. № 19/2013.
10. Пат. України № 95555. Спосіб одержання наночастинок оксиду срібла з антимікробними властивостями / О.М. Важнича, Г.А. Лобань, О.В. Ганчо та ін. — Заяв. від 25.12.2014; Бюл. № 24/2014.
11. *Movchan B.A.* Inorganic materials and coatings produced by EB-PVD // *Surface Engineering.* — 2006. — **22**, № 1. — P. 35–46.
12. Уэндланд У. Термические методы анализа. — М.: Мир, 1978. — 526 с.
13. AKTS (advanced kinetics and technology solutions) — thermokinetics software, in siders, Valais (Switzerland), <http://www.akts.com>.
14. *Coats A.W., Redfern J.P.* Kinetic parameters from thermogravimetric data // *Nature.* — 1964. — **201**, № 4914. — P. 68–69.
15. *Ozawa T.* On the method of coats and redfern for the kinetic analysis of thermoanalytical data // *J. Thermal Anal.* — 1973. — **5**. — P. 499–500.
16. *Freeman E.S., Carroll B.* The application of thermoanalytical techniques to reaction kinetics: the thermogravimetric evaluation of the kinetics of the decomposition of calcium oxalate monohydrate // *J. Phys. Chem.* — 1958. — **62**, № 4. — P. 394–397.
17. Исследование десорбции воды с поверхности стекла методом масс-спектрометрии / Л.Г. Байкова, О.Ф. Поздняков, В.П. Пух и др. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. — 1975. — **11**, № 1. — С. 144–149.

Considered are the nanostructured condensates NaCl–Fe, produced by electron beam evaporation (EB PVD method) from two sources and by physical precipitation of a mixed vapor flow on a water-cooled substrate. Microstructure of condensates NaCl–Fe was studied by using a scanning electron microscopy in device H-800. Condensates, separated from substrate, were investigated in air by the method of thermogravimetric analysis (TGA) in the range of 20...650 °C in analyzer TGA7. Given are the results of investigations of microstructure and sorption properties of condensates NaCl and NaCl–Fe (28 wt.%) at its saturation with moisture. Analyzed are the data of TGA with processing by models of Coats–Redfern and Freeman–Carroll and calculation of energy of activation and sequence of decomposition reaction during heating. It is shown that during withdrawal of condensates from vacuum chamber the iron nanoparticles in porous matrix NaCl are actively adsorbing not only moisture but also oxygen from air. During heating in the next investigations the desorption of moisture and oxygen led to the monotonously falling TGA-relationships. 17 Ref., 1 Table, 5 Figures.

Key words: EB PVD method; energy of activation; sequence of reaction; condensates; nanoparticles; sorption; water; oxygen

Поступила 19.05.2015

АЗОВСТАЛЬ ОСВОИЛА ВЫПУСК НОВОГО ВИДА РЕЛЬС



<http://www.metalinfo.ru/ru/news>

Металлургический комбинат Азовсталь (входит в группу Метинвест) освоил производство рельсов с закаленной боковой гранью из конвертерной стали, что позволяет добиться более высоких качественных характеристик. Одним из основных показателей качества рельсов является их твердость, с повышением которой увеличивается износостойкость. Рельсы, закаленные по поверхности катания и боковым граням, служат в 1,7 раза дольше по сравнению с обычными.

Данный вид рельсов укладывается на криволинейных участках железнодорожного пути. Рельсобалочный цех комбината изготовит для «Укрзалізниці» партию рельсов Р-65 с закалкой боковых граней объемом 5,7 тыс. т. Продукция будет использована в проекте по реконструкции железнодорожных путей в Украине.