

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ТЕРМИЧЕСКИМ РАЗЛОЖЕНИЕМ АРОМАТИЧЕСКИХ КАРБОКСИЛАТОВ Fe (III)

Д.С. Толстогузов, Д.А. Жеребцов[✉], А.М. Тарасов, М.А. Паладий
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
[✉] zherebtcovda@susu.ru, zherebtsov_da@yahoo.com

Аннотация. В статье рассматриваются основные способы получения углеродных композитных наноматериалов и выделяется метод термолитиза как один из основных методов. Для понимания сущности процессов термического разложения как метода синтеза углеродных наноматериалов были рассмотрены ароматические карбоксилаты железа (III). Это 8-гидроксихинолилат, бензоат, салицилат, фталат, п-аминобензоат железа (III). В статье подробно рассматривается методика синтеза этих карбоксилатов железа (III) в простых условиях. Процесс термического разложения проводился в двух средах (воздушная как окислительная и аргоновая как нейтральная) для сравнения получаемых продуктов. Для подробного изучения процессов разложения карбоксилатов железа (III) использовались методы термического анализа (ТГ и ДСК) на синхронном термоанализаторе Netzsch 449 Jupiter. Для изучения морфологии и состава продуктов применялись методы рентгенофазового анализа, оптической и сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного микроанализа. Использовались приборы: рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV и сканирующий электронный микроскоп с приставкой элементного микроанализа Jeol JSM-7001F. По полученным результатам были рассчитаны предполагаемые формулы исходных карбоксилатов железа (III). Также были предложены механизмы процессов, протекающих при термическом разложении ароматических карбоксилатов железа (III). Для более точного определения состава продуктов синтеза карбоксилатов железа (III) и более точного описания процессов термического разложения этих солей также были подвергнуты термическому разложению и соответствующие ароматические карбоновые кислоты. В приложении к статье находятся данные для более точной интерпретации результатов и более подробного описания процессов термического разложения.

Ключевые слова: карбоксилаты железа, карбонизация, термический анализ, продукты термолитиза

Для цитирования: Получение порошковых углеродных композитных наноматериалов термическим разложением ароматических карбоксилатов Fe (III) / Д.С. Толстогузов, Д.А. Жеребцов, А.М. Тарасов, М.А. Паладий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 1. С. 188–198. DOI: 10.14529/chem240113

Original article
DOI: 10.14529/chem240113

SYNTHESIS OF POWDERED CARBON COMPOSITE NANOMATERIALS BY THERMAL DECOMPOSITION OF Fe(III) AROMATIC CARBOXYLATES

D.S. Tolstoguzov, D.A. Zherebtsov[✉], A.M. Tarasov, M.A. Paladiy
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
[✉] zherebtcovda@susu.ru, zherebtsov_da@yahoo.com

Abstract. The article discusses the principal methods for obtaining carbon composite nanomaterials and highlights the thermolysis method as one of them. In order to understand the essence of thermal decomposition processes as a method for synthesis of carbon nanomaterials, aromatic iron(III) carboxylates have been considered. These are iron(III) 8-hydroxyquinolinate, benzoate, salicylate,

phthalate, and p-aminobenzoate. The article discusses the procedure for the synthesis of these iron(III) carboxylates under standard conditions in detail. The thermal decomposition process was carried out in two media (air as oxidizing one and argon as neutral one) to compare the obtained products. For a detailed study of the processes of decomposition of iron(III) carboxylates, the thermal analysis methods (TG and DSC) were used on a Netzsch 449 Jupiter synchronous thermal analyzer. In order to study the morphology and composition of the products, X-ray phase analysis, optical and scanning electron microscopy, as well as X-ray fluorescence microanalysis were used. We used a Rigaku Ultima IV X-ray diffractometer and a scanning electron microscope with a Jeol JSM-7001F elemental microanalysis attachment. Based on the obtained results, the expected formulas of the initial iron(III) carboxylates were calculated. The mechanisms of the processes occurring during the thermal decomposition of iron(III) aromatic carboxylates were also proposed. For a more accurate determination of the composition of the synthesized iron(III) carboxylates and a more appropriate description of the processes of thermal decomposition of these salts, the corresponding aromatic carboxylic acids were also subjected to thermal decomposition. The appendix to the article contains the data for a more accurate interpretation of the results and a more detailed description of the thermal decomposition processes.

Keywords: iron carboxylates, carbonization, thermal analysis, thermolysis products

For citation: Tolstoguzov D.S., Zherebtsov D.A., Tarasov A.M., Paladiy M.A. Synthesis of powdered carbon composite nanomaterials by thermal decomposition of Fe(III) aromatic carboxylates. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;24(1):188–198. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240113

Введение

Известны несколько методов синтеза углеродных наноматериалов. Это термические методы [1, 5–9], CVD [2–4, 6], плазмохимический [6], электродуговые [4] и др. К направлению термических методов относят пиролиз и карбонизацию. Как можно заметить, термические методы остаются одними из основных для получения ряда материалов. Применяют углеродные наноматериалы в очистке сточных вод [1, 6], электрохимических приложениях [2], как катализаторы [6].

В работе [10] исследуются методы синтеза карбоксилатов железа и наночастиц окислов Fe при пиролизе полученных карбоксилатов. При разложении солей [11–16] образуются оксиды Fe либо элементное Fe. При этом для данных солей была достаточной для разложения температура ниже 600 °С. Авторы [17] исследуют процессы термического разложения различных оксалатов металлов, в том числе Fe⁺² и Fe⁺³, в атмосфере азота и кислорода при нагреве до 800 °С.

Рассматривая термограммы карбоксилатов железа [20–28], можно выделить следующие моменты. Основным продуктом термического разложения карбоксилатов Fe является Fe₂O₃ [20–22, 26–28] в разных температурных интервалах. В работах [23–25] получают металлические наночастицы Fe, Ni, Cu методом термического разложения соответствующих карбоксилатов. В результате образуются частицы металлов размерами до 10 нм, образующие кластеры (агломераты) размером до нескольких микрон. В работах [29–33] показаны особенности термического разложения ароматических карбоновых кислот. Эти сведения важны при интерпретации термограмм соответствующих солей.

Целью данной работы является интерпретация процессов (и соответствующих температур, тепловых эффектов и изменений массы) при термолизе пяти органических солей железа, а также определение морфологии и структуры нанокompозитов, образующихся при их термолизе в аргоне.

Экспериментальная часть

Для проведения работы были синтезированы ароматические карбоксилаты (салицилаты, бензоаты, 8-гидроксихинолинаты, фталаты, п-аминобензоаты) железа (III) по методике [18, 19]. Для синтеза использовались химически чистые FeCl₃·9H₂O, салицилат и бензоат Na, 8-гидроксихинолин, фталевая и п-аминобензойная кислоты, NaOH. В качестве растворителей использовали вода и 1,4-диоксан. Соли переходных металлов и NaOH растворяли в воде, а кислоты растворяли в 1,4-диоксане при нагревании до 80 °С. Растворы NaOH и кислоты смешивали в стехиометрическом соотношении для получения однозамещенного карбоксилата натрия. Салицилат и бензоат натрия растворяли в 1,4-диоксане при нагревании до 80 °С. Выход продукта реакций составлял 70–90 %. Реакции протекали мгновенно, растворы карбоксилатов железа (III)

окрашивались в красно-бурый цвет. В течение нескольких суток происходило испарение растворителя при комнатной температуре. Затем полученные продукты перекристаллизовывали из горячего 1,4-диоксана для очистки от NaCl.

Полученные карбоксилаты были исследованы на синхронном термическом анализаторе Netzsch STA 449F1 Jupiter. Предварительно была произведена оценка чистоты полученных соединений методом рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA X-max 80, а также методом рентгенофазового анализа на рентгеновском порошковом дифрактометре Rigaku Ultima IV. Термическое исследование проводилось в корундовом тигле при нагревании образцов массой от 10 до 15 мг в интервале температур от 30 до 900 °С в двух вариантах атмосферы в печи термоанализатора: воздух и Ar. Скорость нагрева составляла 10 К/мин. После термолиты солей фазовый состав продуктов их разложения изучался методом рентгенофазового анализа, морфология металлооксидных фаз – методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Jeol JSM-7001F, а их состав – на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA X-max 80.

Результаты и обсуждения

Анализ химического состава карбоксилатов выявил в них незначительную примесь NaCl, которая не превышала 1 масс. %. Термический анализ карбоксилатов Fe(III) подробно рассмотрен на термограмме разложения фталата Fe(III) (рис. 1, 2). Проведен подробный анализ термического разложения фталата железа (III) в интервале температур от 25 °С до 900 °С в атмосфере аргона и воздуха.

Процессы разложения соли протекают в шесть этапов в атмосфере аргона (Ar) и в четыре ступени в атмосфере воздуха (воздух). В процессе термического разложения в случаях (Ar) и (воздух) в интервале температур от 60 до 205 °С происходит потеря массы образца величиной 19,88 % (Ar) и 19,04 % (O₂) (по кривой ТГ) при дегидратации примеси фталевой кислоты.

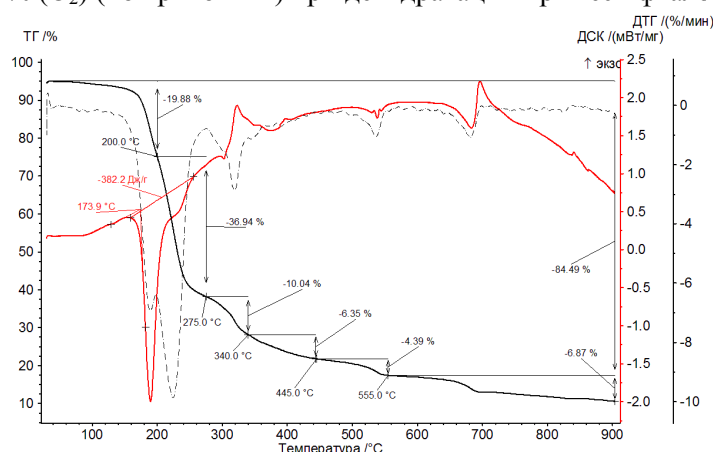


Рис. 1. Диаграмма ТГ-ДСК термического распада фталата железа (III) при нагревании образца в атмосфере Ar

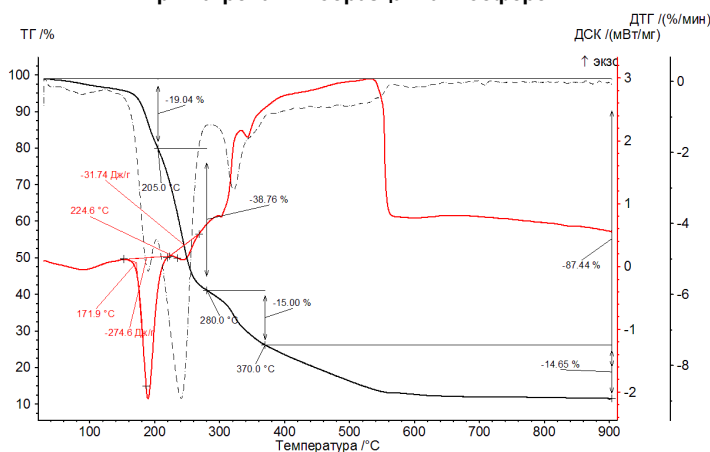


Рис. 2. Диаграмма ТГ-ДСК термического распада фталата железа (III) при нагревании образца в атмосфере воздуха

Визуальный осмотр и электронная микроскопия не выявили признаков плавления в образовавшихся продуктах. Тем не менее, сходство в первых двух этапах позволяет предполагать, что они относятся к примеси чистой фталевой кислоты и происходящим с ней процессам.

Плавление *o*-фталевой кислоты при быстром нагревании происходит при 200–211 °С, особенности её поведения при термическом разложении описаны в [34–36]. Дегидратация кислоты должна сопровождаться потерей лишь 10,83 масс. %, но наблюдаемая потеря в три раза выше, что позволяет предполагать испарение не только молекул воды, но и её ассоциатов с молекулами кислоты или ангидрида.

На второй ступени наблюдается потеря массы образца величиной 36,94 % (Ar) и 38,76 % (воздух) от исходной массы при температурах 200–275 °С (Ar) и 205–280 °С (воздух).

На последующих ступенях происходит дальнейшее снижение массы. Выше 300 °С в атмосфере воздуха происходит горение образца до температуры 600 °С. К этому моменту сгорание образца заканчивается, поэтому продуктом является Fe₂O₃. В атмосфере аргона потеря массы при нагреве продолжается до 900 °С.

Общая потеря массы образца составляет 84,94 % (Ar) и 87,44 % (воздух) от исходной массы образца. Можно предположить, что протекающие процессы очень схожи, поэтому схожими будут и продукты термического распада.

Однако по результатам рентгенофазового анализа основными твёрдыми продуктами термического распада этой соли являются Fe₃C (87 %) и Fe (3 %) для случая (Ar) и смесь Fe₂O₃ (90 %) + Fe₃O₄ (10 %) для случая (воздух). Дифрактограммы твёрдых продуктов термоллиза фталата Fe(III) представлены на рис. 3, 4.

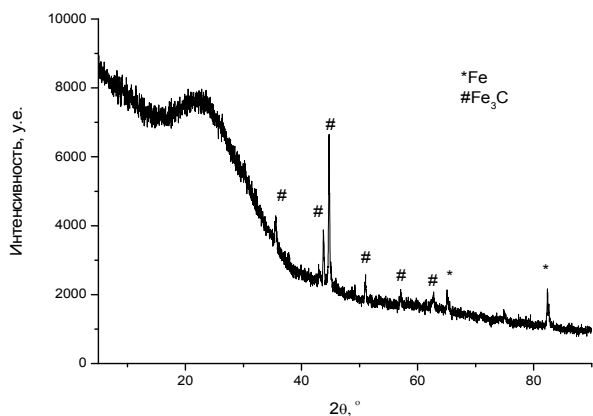


Рис. 3. Дифрактограмма твёрдых продуктов термического распада фталата Fe (III) при 900 °С в Ar

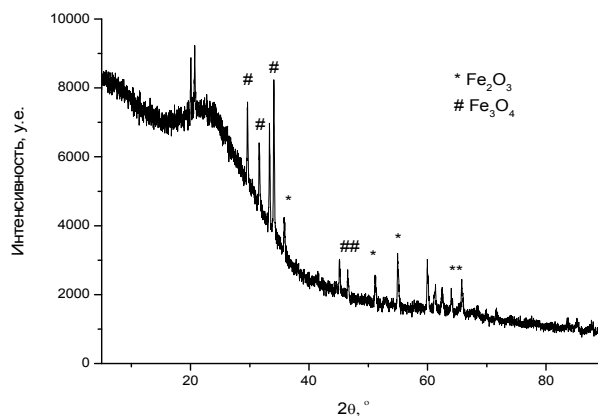


Рис. 4. Дифрактограмма твёрдых продуктов термического распада фталата Fe (III) при 900 °С на воздухе

Методом сканирующей электронной микроскопии был проведён анализ продуктов термоллиза фталата железа (III) (рис. 5, 6).

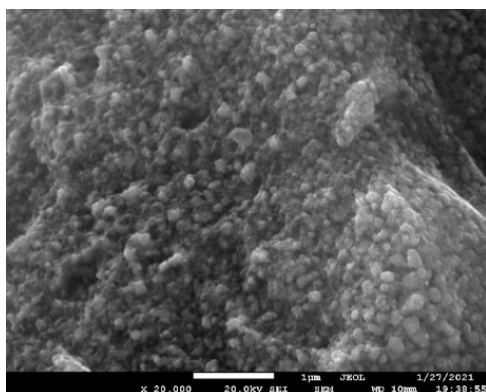


Рис. 5. Изображение продуктов термоллиза фталата железа (III) после разложения при 900 °С (x20000) в аргоне

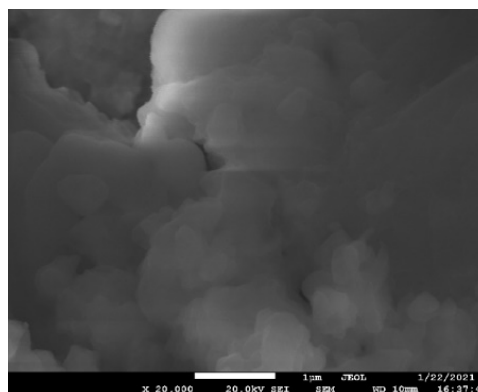


Рис. 6. Изображение продуктов термоллиза фталата железа (III) после разложения при 900 °С (x20000) на воздухе

Как видно по микрофотографиям, частицы твёрдых продуктов термолитического разложения фталата железа (III) на воздухе крупнее частиц продуктов термолитического разложения в аргоне. В аргоне образовавшиеся частицы имеют сферическую форму и размер 20–200 нм. В случае разложения на воздухе размер частиц составлял 0,4–4 мкм.

По измеренным массовым долям образующегося на воздухе оксида железа можно предложить несколько вариантов формул исходного соединения (табл. 1). Вариант $Fe_2(OH)_2(Phthal)(HPhthal)_2$ ближе других к наблюдаемым потерям массы, если учесть эффекты, внесенные примесью свободной кислоты. Остаток Fe_2O_3 составляет 12,56 масс. % (см. рис. 2), что соответствует 15 масс. % Fe_2O_3 для чистого образца соли, если учитывать разбавление фталевой кислотой на 19–20 масс. %.

Таблица 1

Гипотетические формулы полученного фталата железа

Величина	$Fe(HPhthal)_3$	$FeO(HPhthal)$	$Fe_2(OH)_2(Phthal)(HPhthal)_2$
Молярная масса соли, г/моль	467	237	640
% H_2O в виде OH-групп	0	0	5,31
Число молекул воды	0	0	0
% Fe_2O_3	14,52	33,76	25,00

На рис. 7–16 приведены термограммы ароматических карбоксилатов Fe (III).

В табл. 2 указаны процессы термического разложения перечисленных солей и характеристика продуктов термолитического разложения в двух атмосферах.

Таблица 2

Анализ кривых ТГ-ДСК термического разложения ароматических карбоксилатов железа (III)

Соли	Характеристика продуктов термолитического разложения (твёрдый остаток)		Описание термического разложения	
	Состав остатка и размер зерна металлосодержащего компонента в остатке		Количество ступеней на кривой ТГ-ДСК, температурные интервалы процесса термолитического разложения	
	воздух	Ar	воздух	Ar
1	2	3	4	5
8-гидрокси-хинолилат железа (III) $Fe_2O(OH)(8OHQ)_3$	100 % Fe_2O_3 . ОКР частиц Fe_2O_3 : 34 нм. Размер частиц: 0,8–5 мкм	60 % Fe_3C , 10 % FeO , 30 % Fe_3O_4 , ОКР частиц Fe_3C : 39 нм. ОКР частиц FeO : 10 нм. ОКР частиц Fe_3O_4 : 2 нм. Размер частиц: 0,2–2 мкм	6 ступеней. Потеря 8-гидроксихинолина при 100–305 °С, потеря массы 6,08 %. В интервале температур 369–435 °С происходит окисление образца. Общая потеря массы 71,8 %	5 ступеней. Потеря 8-гидроксихинолина при 100–250 °С, потеря массы 5,27 %. При 327 °С происходит плавление образца. Общая потеря массы 46,32 %
Бензоат железа (III) $Fe_2O(benz)_4$	100 % Fe_2O_3 ОКР частиц: 20 нм. Размер частиц: 0,2–1,0 мкм	23 % Fe, 77 % углерода. ОКР частиц Fe: 38 нм. Размер частиц: 30–600 нм	7 ступеней. Испарение бензойной кислоты при 60–140 °С с потерей массы в 4,93 %. К окончанию разложения при 690 °С образуется Fe_2O_3 . Общая потеря массы 79,96 %	7 ступеней. Испарение бензойной кислоты при 80–135 °С с потерей массы в 4,87 %. При разложении 500–900 °С образуется Fe. Общая потеря массы в 63,96 %

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Фталат железа (III) $Fe_2(OH)_2(Phthal)$ $(HPhthal)_2$	87 % Fe_3C , 3 % Fe. ОКР частиц: 4 нм. Размер частиц: 0,4–4 мкм.	90 % Fe_2O_3 , 10 % Fe_3O_4 . ОКР частиц Fe_2O_3 : 30 нм, ОКР частиц Fe_3O_4 : 90 нм. Размер частиц: 20–200 нм	4 ступени. Испарение фталевой кислоты при 100–204 °С с потерей массы 18,56 %. Свыше 600 °С потери массы нет, образовались оксиды Fe. Общая потеря массы в 87,44 %	5 ступеней. Испарение фталевой кислоты 100–198 °С с потерей массы в 18,63 %. Общая потеря массы в 84,43 %
Салицилат железа (III) $Fe_2O(OH)(HSal)_3$	100 % Fe_2O_3 . ОКР частиц: 40 нм. Размер частиц: 0,1–0,8 мкм.	61 % Fe_3C , 22 % Fe, 17 % Fe_3O_4 . ОКР частиц Fe_3C : 27 нм, ОКР частиц Fe: 40 нм, ОКР частиц Fe_3O_4 : 15 нм Размер частиц: 40–400 нм	5 ступеней. Испарение салициловой кислоты при 100–180 °С. Потеря массы 65,28 %. Общая потеря массы в 73,27 %	4 ступени. Испарение салициловой кислоты при 100–180 °С. Потеря массы 6,83 %. Общая потеря массы 78,42 %
п-аминобензоат железа (III) безводный $Fe_2O(OH)_2(pAB)_2$	80 % Fe_3O_4 , 10 % Fe_3C 10 % FeO ОКР частиц Fe_3O_4 : 15 нм. ОКР частиц Fe_3C : 15 нм ОКР частиц FeO: 20 нм Размер частиц: 30–120 нм	90 % Fe_3C . ОКР частиц: 20 нм. Размер частиц: 120–600 нм	5 ступеней. Испарение п-аминобензойной кислоты при 60–185 °С, потеря массы в 10,21 %. Общая потеря массы в 65,46 %	4 ступени. Испарение п-аминобензойной кислоты при 60–185 °С, потеря массы в 9,98 %. Общая потеря массы в 67,31 %

Количество ступеней термического разложения, исходя из данных табл. 2, не зависит от характера газовой атмосферы над образцом. Для каждой соли можно выделить повторяемость в числе ступеней разложения. Получается, что на процесс термолиза карбоксилатов Fe(III) влияет только строение органического аниона, в данном случае, заместителей в бензольном кольце.

При дальнейшем нагревании некоторые образцы (кроме фталата железа (III)) плавятся в интервале температур от 200 до 400 °С. Также для некоторых образцов (фталата железа (III)) была характерна полимеризация из расплава в интервале температур от 300 до 400 °С. При дальнейшем нагреве происходил пиролиз с образованием аморфного углерода и формированием оксидов железа и карбида железа (в атмосфере Ar) либо полное окисление твёрдого остатка (в атмосфере воздуха) с образованием оксидов железа и карбида железа.

Как можно наблюдать, для каждой соли характерны одинаковые процессы при термолизе в разных атмосферах. Для карбоксилатов Fe, разлагавшихся в атмосфере воздуха, на кривой ДСК наблюдается процесс окисления. Он отображен в виде возрастания и убывания функции (трапециевидальная форма) отклика на кривой ДСК в интервале температур в среднем от 300 до 700 °С.

Высокая общая потеря массы от 50 до 80 % указывает на постепенное разложение до аморфного углерода и потерю части металлсодержащих твёрдых продуктов вследствие их улетучивания. При сравнении общих потерь масс видно, что на воздухе потеря массы выше, чем в аргоне для 8-гидроксихинолината, фталата и бензоата железа (III). Это означает, что наличие окислительной атмосферы ускоряет разложение кислотных остатков до простых летучих продуктов (CO_2 , CO, H_2O). В атмосфере аргона же происходит постепенный распад с выделением более сложных газообразных продуктов термолиза.

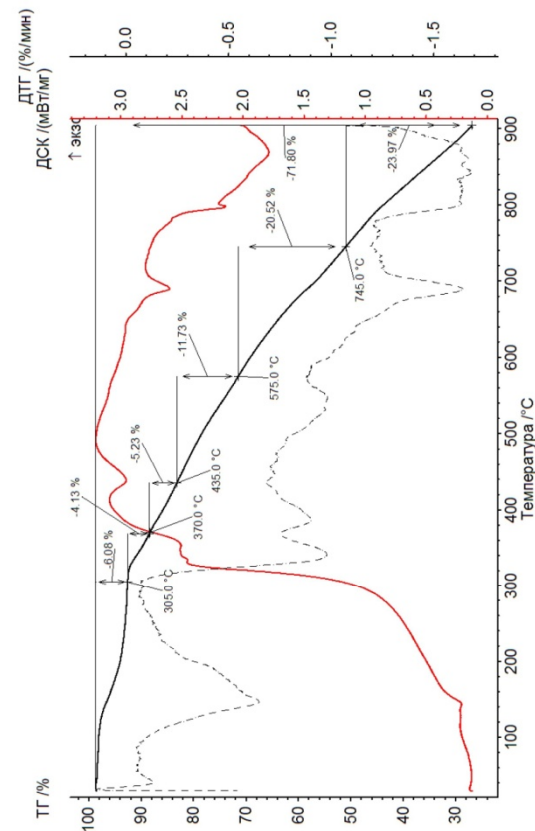


Рис. 8. Термограмма 8-гидроксихинолината железа (III) в атмосфере воздуха

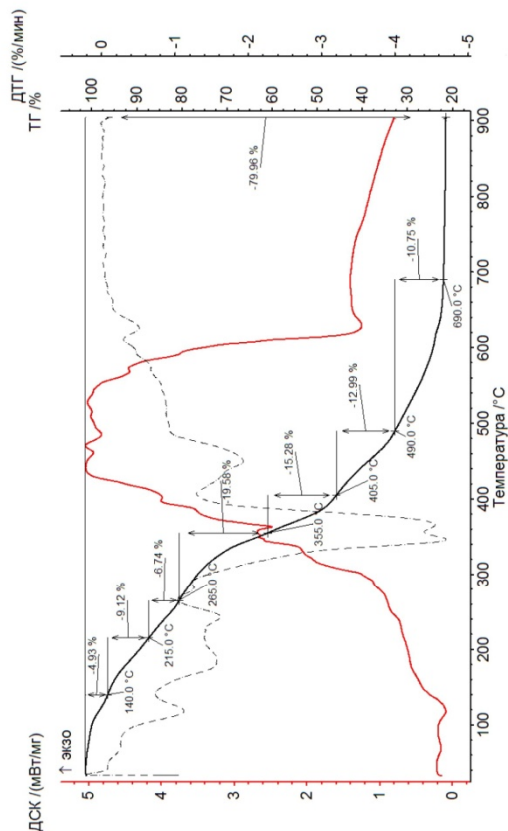


Рис. 10. Термограмма бензоата железа (III) в атмосфере воздуха

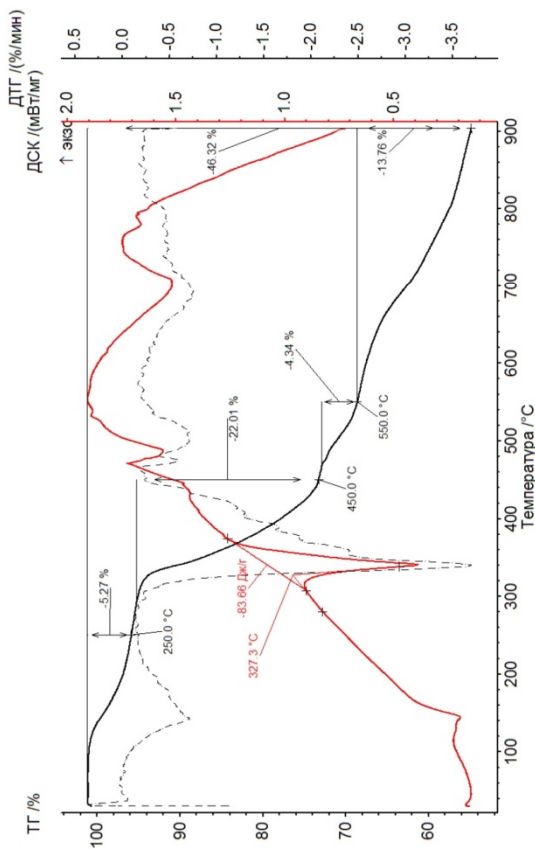


Рис. 7. Термограмма 8-гидроксихинолината железа (III) в атмосфере Ar

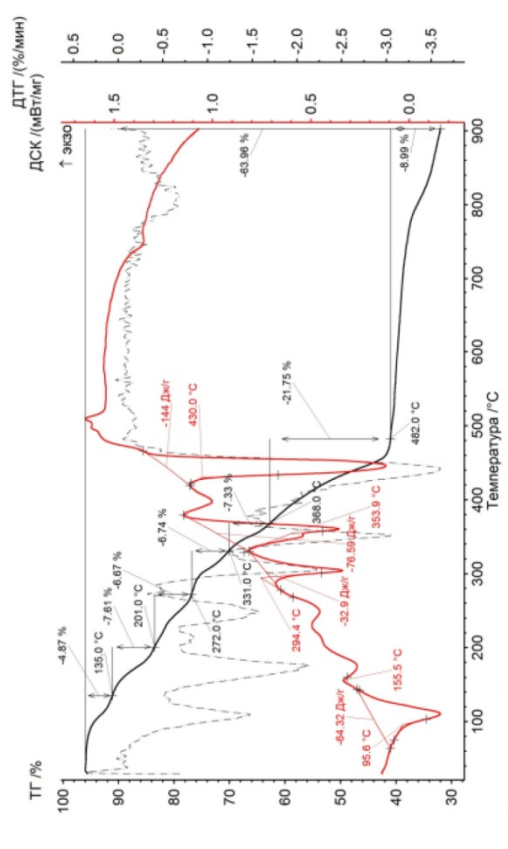


Рис. 9. Термограмма бензоата железа (III) в атмосфере Ar

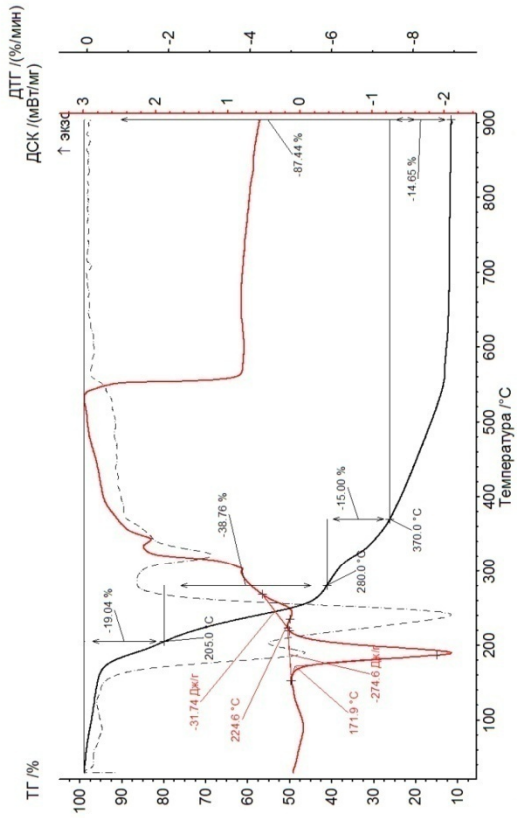


Рис. 12. Термограмма фталата железа (III)
в атмосфере воздуха

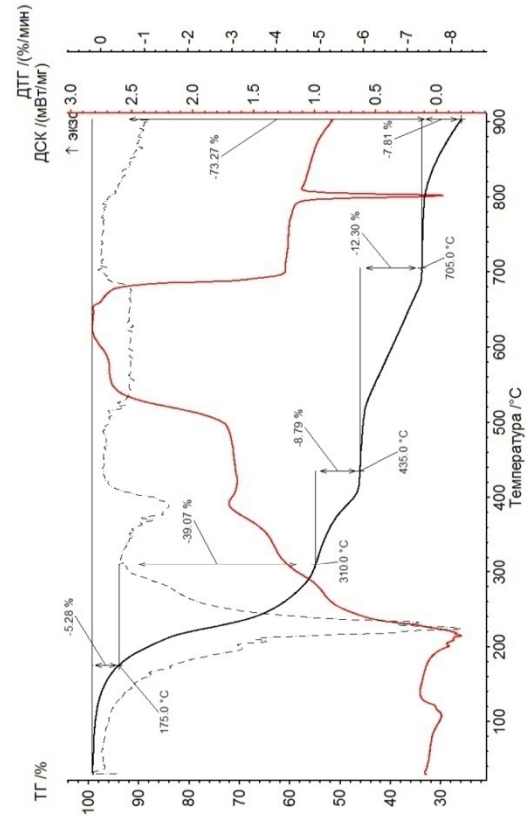


Рис. 14. Термограмма салицилата железа (III) в атмосфере воздуха

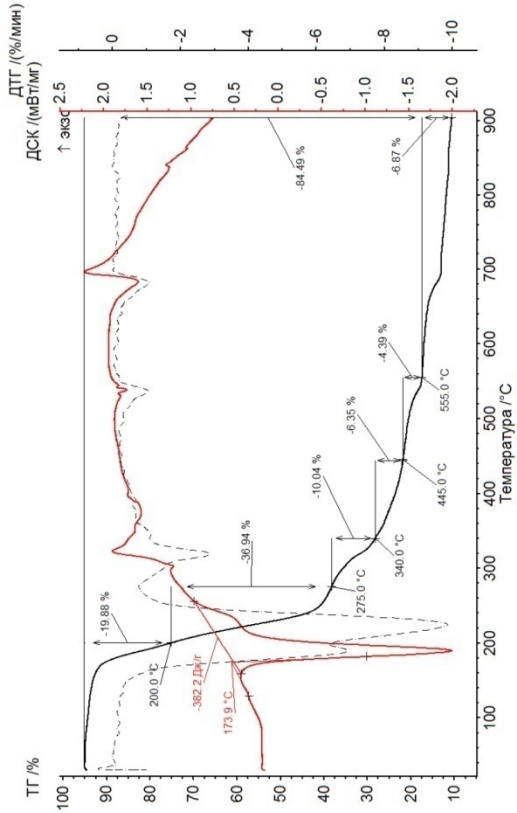


Рис. 11. Термограмма фталата железа (III)
в атмосфере Ar

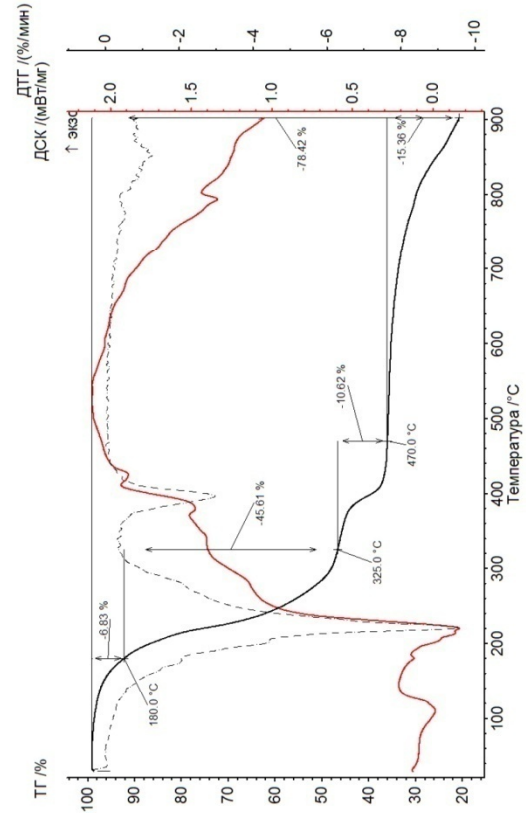


Рис. 13. Термограмма салицилата железа (III)
в атмосфере Ar

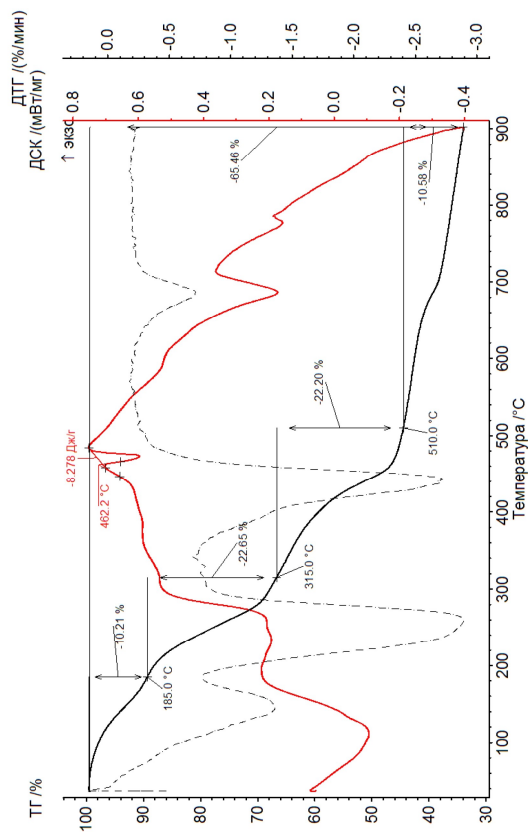


Рис. 16. Термограмма л-аминобензоата железа (III) в атмосфере воздуха

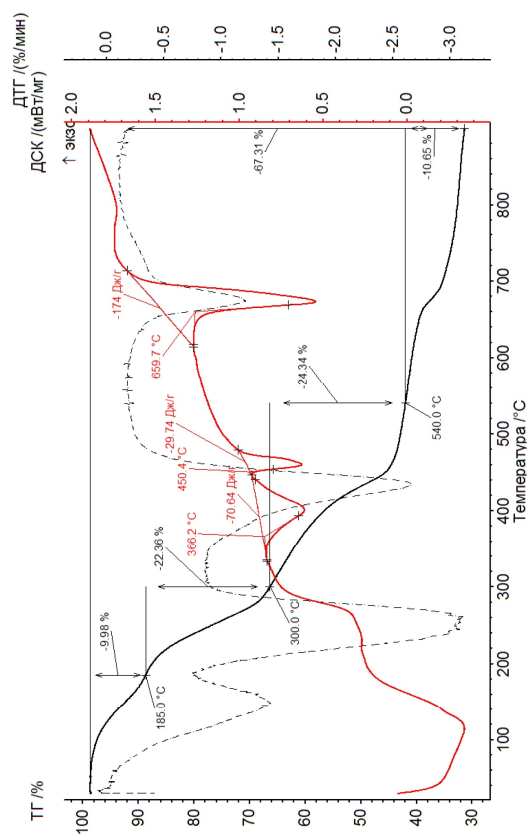


Рис. 15. Термограмма л-аминобензоата железа (III) в атмосфере Ar

В результате термического разложения карбоксилатов Fe (III) основными твёрдыми продуктами являются оксиды и карбиды железа и углерод. Причём углерод в продуктах характерен для разложения в атмосфере аргона, так как атмосфера является нейтральной и происходит пиролиз солей. Кислород остаётся от аниона соли и входит в состав оксидов железа.

Согласно исследованию морфологии продуктов термолитизации можно заключить, что размер образующихся кристаллических частиц доходил до 5 мкм. При этом размер области когерентного рассеяния был значительно меньше и находился в нанометровой размерности. Анализируя морфологию твёрдых продуктов термолитизации, можно заметить, что зернистость и форма твёрдых продуктов термолитизации зависит не от атмосферы термолитизации, а от кислотного остатка. В случае с $Fe_2O(benz)_4$ в Ag частицы Fe приняли сферическую форму, в остальных случаях подобного не произошло.

Заключение

В результате анализа термического разложения рассмотренных карбоксилатов железа (III) были выявлены следующие закономерности. Во-первых, общая потеря массы на воздухе выше, чем в аргоне при термолитизации соли для некоторых солей. Во-вторых, число ступеней разложения зависит от природы ароматического карбоксилатного остатка соли. В-третьих, основные пики на кривых ДСК для одной соли в разных атмосферах повторяются. Небольшое различие наблюдается в температурах и энтальпии происходящих на рассматриваемых этапах процессов. Это свидетельствует о схожести протекающего термолитизации независимо от атмосферы, в которой происходит разложение. В-четвёртых, состав продуктов разложения схож для термолитизации в обоих условиях. Так, во многих случаях продуктами были оксиды железа и карбид железа. Это значит, что кислород от кислотного остатка прочно связан с атомом железа и вместе с железом остаётся в твёрдых продуктах совместно с аморфным углеродом и продуктами восстановления Fe_2O_3 . Образовавшиеся частицы твёрдых продуктов в матрице из аморфного углерода обладают наноразмерами и, обладая подвижностью при высокой температуре, агломерировали до более крупных частиц.

Список источников

1. *Le V.T., Doan V.D., Tran V.A. et al.* // Materials Research Bulletin. 2020. V. 129. P. 110913. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.110913.
2. *Ferial G., May A., Robiah Y., Raja N.O.* // Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials. 2019. P. 1. DOI: 10.1016/B978-0-12-815757-2.00001-2.
3. *Ali M., Li Y., Song B., Yudong H.* // Journal of Nanomaterials. 2011. P. 1. DOI: 10.1155/2011/685081.
4. *Yehia M.M., Ihsanullah A.S., Tareq Al-Ansari* // A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method / Materials. 2018. V. 11. P. 822. DOI: 10.3390/ma11050822.
5. *Temidayo O.A.* // Bioinorganic Chemistry and Applications. 2018. P. 1. DOI: 10.1155/2018/9354708.
6. *Ремпель А.А.* // Успехи химии. 2007. Т. 76, № 5. С. 474. DOI: 10.1070/RC2007v076n05ABEH003674.
7. *Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Джардималиева Г.И.* // Успехи химии. Т. 80, № 3. С. 272. DOI: 10.1070/RC2011v080n03ABEH004079.
8. *Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Джардималиева Г.И.* // Российский химический журнал. 2009. Т. 53, № 1. С. 140.
9. *Yan J., Wang H., Jin B., Zeng M.* // Journal of Solid State Chemistry. 2021. V. 297. P. 122060. DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122060.
10. *Yu W.W., Falkner J.C., Yavuz C.T., Colvin V.L.* // Chemical Communication. 2004. P. 2306. DOI: 10.1039/B409601K.
11. *Siqueira A.P.C., Ionashiro E.Y., Bannach G., De Souza A.R. et al.* // Thermochemica Acta. 2021. V. 698. P. 178892. DOI: 10.1016/j.tca.2021.178892.
12. *Muraishi K., Takano T., Nagase K., Tanaka N.* // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. 1981. V. 43, No. 10. P. 2293. DOI: 10.1016/0022-1902(81)80252-7.
13. *Davis R., Schultz H.P.* // J. Org. Chem. 1962. V. 27, No. 3. P. 854. DOI: 10.1021/jo01050a039.
14. *Суздаев И.П., Максимов Ю.В., Буравцев В.Н., Имшенник В.К. и др.* // Коллоидный журнал. 2000. Т. 62. С. 257.
15. *Sileo E.E., Morando P.I., Baumgartner W.C., Bless M.A.* // Thermodynamica Acta. 1991. V. 184. P. 295. DOI: 10.1016/0040-6031(91)80031-d.

16. *Sánchez N.M., Klerk A. de* // *Thermochimica Acta*. 2018. V. 662. P. 23. DOI: 10.1016/j.tca.2018.01.015.
17. *Dollimore D., Griffiths D. L.* // *Journal of Thermal Analysis*. 1970. V. 2. P. 229.
18. *Фейизоглу А., Алтун О., Фиринци А., Туркы-Алмаз М.* // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2003. № 3. С. 58.
19. *Джардималиева Г.И., Помогайло А.Д.* // *Успехи химии*. 2008. Т. 77. № 3. С. 270. DOI: 10.1070/RC2008v077n03ABEH003682.
20. *Bassi P.S., Randhawa B.S., Jamwal H.S.* // *Thermochimica Acta*. 1983. V. 69. P. 367. DOI: 10.1016/0040-6031(83)80343-8.
21. *Gorinchoy V., Shova S., Melnic E., Kravtsov V. et al.* // *Chem. J. Mold*. 2013. V. 8, No. 2. P. 83. DOI: 10.19261/cjm.2013.08(2).10.
22. *Gorinchoy V., Zubareva V., Melnic E., Kravtsov V.* // *Chem. J. Mold. General, Industrial and Ecological Chemistry*. 2018. V. 13, No. 1. P. 46. DOI: 10.19261/cjm.2018.483.
23. *Yudanov L.I., Logvinenko V.A., Sheludyakova L.A., Korolkov I.V. et al.* // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2019. V. 93, No. 7. P. 1327. DOI: 10.1134/S003602441907032X.
24. *Yudanov L.I., Logvinenko V.A., Yudanov N.F., Rudina N.A. et al.* // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016. V. 90, No. 6. P. 1206. DOI: 10.1134/S0036024416060315.
25. *Yu Q., Zhao S., Asuha S.* // *Ceramics International*. 2022. V. 48. P. 6556. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.203.
26. *Bassi P.S., Randhawa B.S., Bilaspuri G.K.* // *Journal of Thermal Analysis*. 1986. V. 31. P. 1007. DOI: 10.1007/BF02119254.
27. *Galwey A.K.* // *Journal of the Chemical Society*. 1965. P. 4235.
28. *Bassi P.S., Uppal P., Bilaspuri G.K.* // *Journal of Thermal Analysis*. 1997. V. 49. P. 703. DOI: 10.1007/bf01996754.
29. *Winter K., Barto D.* // *Canadian journal of chemistry*. 1970. V. 48 (24). P. 3797. DOI: 10.1139/v70-641.
30. *Rajasekaran M., Anbusrinivasan P., Mojumdar S. C.* // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2010. V. 100. P. 827. DOI: 10.1007/s10973-010-0761-5.
31. *Wesolowski M., Konarski T.* // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1999. V. 55. P. 995. DOI: 10.1023/a:1010162607157.
32. *Radecki A., Wesolowski M.* // *Journal of Thermal Analysis*. 1976. V. 9. P. 357. DOI: 10.1007/BF01909400.
33. *Teixeira J.A., Nunes W.D.G., Colman T.A.D., Nascimento A.L.C.S do, et al.* // *Thermochimica Acta*. 2016. V. 624. P. 59. DOI: 10.1016/j.tca.2015.11.023.
34. *Кнунянца И.Л. М.: Советская энциклопедия, 1998. 783 с.*
35. *Никольский Б.П. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1963. 1168 с.*
36. *Кнунянца И.Л. М.: Советская энциклопедия, 1983. 786 с.*

Информация об авторах:

Толстогузов Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, младший научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: tolstoguzov.dim@yandex.ru.

Жеребцов Дмитрий Анатольевич – доктор химических наук, старший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: zherebtcovda@susu.ru, zherebtsov_da@yahoo.com.

Тарасов Артём Михайлович – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: tarasov_a02@mail.ru.

Паладий Мария Алексеевна – студент кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: 3217234m@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2023 г.

The article was submitted 11 October 2023.