

УДК 546.621:548.734

СТРУКТУРА ДИПИВАЛОИЛМЕТАНАТА АЛЮМИНИЯ(III) $\text{AlO}_6\text{C}_{33}\text{H}_{57}$ © 2011 П.А. Стабников*, А.И. Смоленцев, Н.В. Первухина, О.С. Кошечева,
Л.Н. Комиссарова, С.В. БорисовУчреждение Российской академии наук Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
Новосибирск

Статья поступила 15 января 2010 г.

Определена структура *трис*-дипивалоилметаната алюминия(III) (дифрактометр Bruker Nonius X8 Apex с 4К CCD детектором, $\lambda\text{MoK}\alpha$, графитовый монохроматор, $T = 150(2)$ К) и предложен метод его синтеза. Кристаллографические данные: пр. гр. $C2/c$, $a = 28,1587(12)$, $b = 18,5170(7)$, $c = 21,5332(8)$ Å, $\beta = 97,573(1)^\circ$, $V = 11129,8(8)$ Å³, $Z = 12$, $d_{\text{выч}} = 1,033$ г/см³, $R = 6,93$. Структура комплекса молекулярная, атом алюминия окружен шестью атомами кислорода трех хелатных лигандов по октаэдру, расстояния Al—O 1,860(2)—1,873(2) Å, углы O—Al—O 88,08(9)—91,96(10)° и 177,93(9)—179,83(14)°. Проведен анализ известных упаковок *трис*-дипивалоилметанатов металлов. Установлено три типа упаковок молекул в кристаллах, которым приписано обозначение α , β и γ .

Ключевые слова: алюминий дипивалоилметанат, кристаллическая структура, упаковки *трис*-дипивалоилметанатов металлов.

ВВЕДЕНИЕ

β -Дикетонаты металлов обладают большим набором важных для практического применения свойств. Некоторые из этих комплексов катализируют процессы окисления спиртов до альдегидов и кетонов [1, 2], другие являются эффективными антиоксидантами масел и смазок [3], их также используют при синтезе углеродных нанотрубок [4], для очистки металлов зонной плавкой [5] и во многих других процессах. Наиболее важным свойством β -дикетонатов металлов является их летучесть, т.е. способность этих комплексов при небольшом нагревании переходить в газовую фазу без разрушения молекул. Благодаря летучести β -дикетонаты металлов широко используются при нанесении покрытий и пленок методом MOCVD [6, 7], для анализа и очистки соединений методами газовой хроматографии [8], для концентрирования элементов фракционной сублимацией [9]. Переход соединения в газовую фазу является сложным термодинамическим процессом, основными характеристиками которого являются теплота ($\Delta H_{\text{субл}}$) и энтропия ($\Delta S_{\text{субл}}$) сублимации. В зависимости от значений этих величин комплексы разделяют на хорошо и трудно летучие. Если сравнивать давления пара комплексов при одной и той же температуре, то наиболее летучими являются β -дикетонаты с фторированными, затем с алифатическими заместителями, а наименее летучими являются комплексы с ароматическими заместителями [8, 10]. Однако возможен и другой подход к оценке летучести соединений, например, по максимальному значению давления пара, которое может быть достигнуто для этого комплекса. При такой оценке летучести, кроме $\Delta H_{\text{субл}}$ и $\Delta S_{\text{субл}}$, начинает играть роль и термическая устойчивость соединений. По данным работы [10], самое высокое давление паров в 1,1 атм может быть достигнуто при температуре 370 °С для $\text{Al}(\text{dpm})_3$ (Hdpm =дипивалоилметан=2,2,6,6-тетраметилгептандион-3,5). Для других β -дикетонатов металлов максимальные

* E-mail: stabnik@niic.nsc.ru

значения паров меньше из-за термодеструкции. В работе [11] отмечено, что рекордное давление паров $\text{Eu}(\text{dpm})_3$ достигает 0,56 атм при 352 °С, а для $\text{Cu}(\text{dpm})_2$ это значение при 205 °С равно 0,2 атм [10]. Максимальные значения давления паров большинства других β -дикетонатов металлов не превышает 0,1 атм [12]. Таким образом, самым летучим (по максимальному значению давления пара) среди β -дикетонатов металлов является $\text{Al}(\text{dpm})_3$. Однако свойства этого интересного соединения изучены недостаточно. Так, в Кембриджской базе структурных данных (КБСД) [12] до сих пор отсутствуют структурные данные для этого комплекса, тогда как структуры других β -дикетонатов алюминия изучены гораздо лучше. Например, структурных расшифровок *трис*-ацетилацетоната алюминия ($\text{Al}(\text{aa})_3$) при различных температурах около двадцати, не считая структур твердых растворов $\text{Al}(\text{aa})_3$ с $\text{Cr}(\text{aa})_3$, $\text{Fe}(\text{aa})_3$ и $\text{Co}(\text{aa})_3$. Следует отметить, что в КБСД структурных расшифровок *трис*-дипивалоилметанатов переходных металлов пока немного: $\text{Mn}(\text{dpm})_3$ [13], $\text{Fe}(\text{dpm})_3$ [14], $\text{Co}(\text{dpm})_3$ [15] и $\text{Sc}(\text{dpm})_3$ [16]. Это, вероятно, связано с тем, что во многих случаях достаточно сложно вырастить монокристаллы хорошего качества для этих комплексов.

В настоящей работе предложен удобный метод синтеза $\text{Al}(\text{dpm})_3$, определена кристаллическая структура этого комплекса и проведено сопоставление известных упаковок *трис*-дипивалоилметанатов переходных металлов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез. В 100 мл спирта растворяли 0,06 моль лиганда (99 %), а затем при нагревании растворяли 0,06 моль (2,4 г) NaOH (чда). В другом сосуде в 50 мл спирта растворяли 0,03 моль, небольшой избыток (7,2 г) $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, очищенного по методике [17]. Растворы при перемешивании сливали. Спустя 1 ч полученную смесь охлаждали и медленно, при перемешивании, приливали к 400 мл охлажденной воды. Выпавший осадок отфильтровывали и оставляли сохнуть на воздухе. Через 1 сутки сухой остаток на фильтре смывали хлороформом. Фильтрат упаривали. Полученный белый порошок дважды сублимировали в вакуумной градиентной печи ($P = 2 \cdot 10^{-2}$ Торр), зона конденсации 160—180 °С. Выход ~85 %.

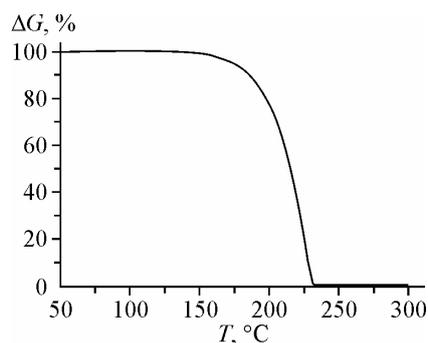
Элементный анализ проведен на анализаторе Euro EA 3000 (фирмы EuroVector, Италия): найд./расч., %: С 68,8/68,7, Н 10,0/10,0. Атомно-эмиссионный спектральный анализ проводили на спектрографе PGS-2 в дуге постоянного тока ($I = 13,5$ А, время экспозиции 25 с). Калибровочные графики строили на основе графитового порошка, содержащего 4 % NaCl и несколько десятков примесей в интервале концентраций 10^{-6} — 10^{-2} мас.%. Навеску пробы разбавляли спектрографическим буфером (графитовый порошок с 4 % NaCl) в соотношении 1:50. Навеска подготовленной пробы в графитовом электроде составляла 20 мг. Спектральный анализ проводили из трех параллельных. Метод обеспечивает пределы обнаружения на уровне $n \cdot 10^{-5}$ — $n \cdot 10^{-2}$ мас.%. Результаты анализа представлены в табл. 1.

При исследовании очищенного комплекса $\text{Al}(\text{dpm})_3$ на столике Бэтиуса установлено, что плавление происходит при 263—264 °С и это согласуется с 264—265 °С [18]. Термогравиметрические исследования проводили с использованием микротермовесов TG 209 F1 Iris® фирмы NETZSCH. Масса навески 20 мг, тигель Al_2O_3 , в атмосфере гелия, скорость потока газа 70 мл/мин, скорость нагрева 10 град./мин. Обработку результатов экспериментов проводили с использованием стандартного пакета программного обеспечения Proteus Analysis [19]. Результаты исследования представлены на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты атомно-эмиссионного спектрального анализа (мкг/г)

Элемент	Sn	Mg, Cr, Fe, Co, Zn, Pd, Zr, Pb	Cd, In, Bi	Be, Mn, Cu, Ag
Результат анализа	<10	<5	<2	<0,5

Рис. 1. Результаты термогравиметрического исследования Al(dpm)₃

Рентгеноструктурный анализ. Хорошо ограненные монокристаллы Al(dpm)₃ получены при медленном испарении толуольного раствора. Параметры элементарной ячейки Al(dpm)₃ и массив экспериментальных отражений при 150 К получены с монокристалла размерами 0,22×0,18×0,18 мм на автоматическом дифрактометре Bruker Nonius X8 Apex с 4К CCD-детектором по стандартной методике (λMoK_α, графитовый монохроматор) [20]. Кристаллографические данные и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 2. Поглощение учтено полуэмпирически по интенсивностям эквивалентных рефлексов (SADABS). Структура расшифрована прямым методом и уточнена полноматричным МНК по F^2 в анизотропном приближении для неводородных атомов с использованием комплекса программ SHELX-97 [21]. Атомы водорода органических лигандов локализованы геометрически и уточнены в приближении жесткого тела. Основные геометрические характеристики координационных полиэдров алюминия в комплексе Al(dpm)₃ даны в табл. 3.

Структурные данные для Al(dpm)₃ депонированы в Кембриджскую базу структурных данных (CCDC 759323).

Т а б л и ц а 2

Кристаллографические данные и условия дифракционного эксперимента для Al(dpm)₃

Стехиометрическая формула	C ₃₃ H ₅₇ AlO ₆
Молекулярный вес	576,79
Температура, К	150(2)
Длина волны λ, Å	0,71073
Сингония	Моноклиная
Пространственная группа	C2/c
Параметры ячейки a, b, c, Å	28,1587(12), 18,5170(7), 21,5332(8)
β, град.	97,573(1)
V, Å ³	11129,8(8)
Z	12
d _x , г/см ³	1,033
Коэффициент поглощения, мм ⁻¹	0,090
F(000)	3792
Размер кристалла, мм	0,22×0,18×0,18
Диапазон сбора данных по θ, град.	2,20—26,42
Диапазон h, k, l	-35 ≤ h ≤ 35, -23 ≤ k ≤ 20, -20 ≤ l ≤ 26
Число измеренных рефлексов	38831
Число независимых рефлексов	11395 (R _{int} = 0,0479)
Полнота сбора данных, %	99,9
Макс. и мин. пропускание	0,9839 и 0,9804
Метод уточнения	Полноматричный МНК по F ²
Число рефлексов / огр. / параметров	11395 / 0 / 569
S-фактор по F ²	1,034
R-фактор [I > 2σ(I)]	R ₁ = 0,0693, wR ₂ = 0,2022
R-фактор (все данные)	R ₁ = 0,1327, wR ₂ = 0,2295
Макс. и мин. остаточной эл. плотности, е/Å ³	0,507 и -0,329

Т а б л и ц а 3

Основные межатомные расстояния d (Å) и углы ω (град.) в координационных полиэдрах алюминия в структуре $\text{Al}(\text{dpm})_3$

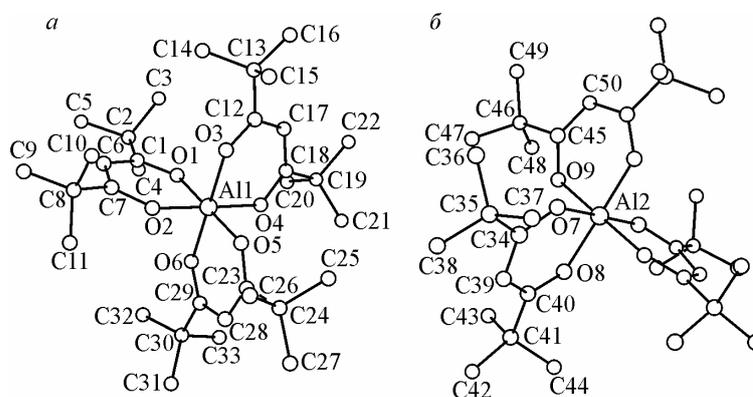
Связь	d	Угол	ω	Угол	ω
Al(1)—O(1)	1,871(2)	O(5)—Al(1)—O(2)	89,90(9)	O(7)—Al(2)—O(8)	90,20(8)
Al(1)—O(2)	1,863(2)	O(5)—Al(1)—O(3)	90,35(9)	O(7)—Al(2)—O(9)	91,20(9)
Al(1)—O(3)	1,868(2)	O(2)—Al(1)—O(3)	88,56(9)	O(9)—Al(2)—O(8)	89,22(8)
Al(1)—O(4)	1,869(2)	O(5)—Al(1)—O(4)	91,61(10)	O(7)#1—Al(2)—O(9)#1	91,20(9)
Al(1)—O(5)	1,860(2)	O(2)—Al(1)—O(4)	177,93(9)	O(7)—Al(2)—O(9)#1	88,92(8)
Al(1)—O(6)	1,872(2)	O(3)—Al(1)—O(4)	90,02(9)	O(7)#1—Al(2)—O(8)	89,68(8)
Al(2)—O(7)#1*	1,866(2)	O(5)—Al(1)—O(1)	178,50(10)	O(7)#1—Al(2)—O(9)	88,92(8)
Al(2)—O(7)	1,866(2)	O(2)—Al(1)—O(1)	90,13(9)	O(7)#1—Al(2)—O(7)	179,83(14)
Al(2)—O(8)	1,873(2)	O(3)—Al(1)—O(1)	91,15(9)	O(7)—Al(2)—O(8)#1	89,68(8)
Al(2)—O(8)#1	1,873(2)	O(4)—Al(1)—O(1)	88,40(9)	O(9)#1—Al(2)—O(8)	179,02(8)
Al(2)—O(9)	1,870(2)	O(5)—Al(1)—O(6)	90,42(9)	O(7)#1—Al(2)—O(8)#1	90,20(8)
Al(2)—O(9)#1	1,870(2)	O(2)—Al(1)—O(6)	91,96(10)	O(9)—Al(2)—O(9)#1	90,37(12)
		O(3)—Al(1)—O(6)	179,07(10)	O(9)—Al(2)—O(8)#1	179,02(8)
		O(4)—Al(1)—O(6)	89,44(10)	O(9)#1—Al(2)—O(8)#1	89,22(8)
		O(1)—Al(1)—O(6)	88,08(9)	O(8)—Al(2)—O(8)#1	91,20(13)

* Оператор симметрии, используемый для генерации эквивалентных атомов: #1 $-x+1, y, -z+1/2$.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура комплекса $\text{Al}(\text{dpm})_3$ молекулярная, построена из дискретных молекул, строение которых с нумерацией атомов приведено на рис. 2. В структуре два кристаллографически независимых атома алюминия: Al(1) находится в общем положении (xyz), а Al(2) — в частном положении на оси 2 ($1/2 y 1/4$). Молекулы $\text{Al}(1)(\text{dpm})_3$ и $\text{Al}(2)(\text{dpm})_3$ имеют близкое строение. Координационные полиэдры атомов металла — почти правильные октаэдры, образованные атомами кислорода трех dpm -лигандов, расстояния Al—O и хелатные валентные углы OAlO лежат в интервале 1,860(2)—1,873(2) Å и 88,08(9)—91,96(10)°, *транс*-углы OAlO отклоняются от 180° и равны 177,93(9)—179,83(14)°. Два металлоцикла в координационном окружении атома Al(1) неплоские, в металлоциклах Al(1)O(1)O(2)C(1)C(6)C(7) и Al(1)O(3)O(4)C(12)C(17)C(18) углы перегиба по линии O...O равны 3,9 и 14,7° соответственно, металлоцикл Al(1)O(5)O(6)C(23)C(28)C(29) практически плоский, отклонения атомов от среднеквадратичной плоскости не превышают 0,004 Å.

Рис. 2. Строение двух независимых молекул в кристалле $\text{Al}(\text{dpm})_3$



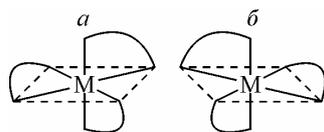


Рис. 3. Две молекулы трис-дипивалоилметаната металла (хиральность $C(a)$ и $C^*(b)$)

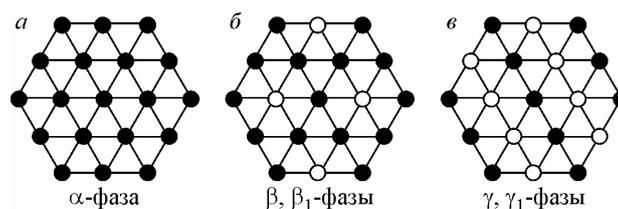


Рис. 4. Ближайшее гексагональное окружение в плотноупакованных плоскостях с учетом хиральности молекул. Молекулы с хиральностью C — \circ , с C^* — \bullet

В молекуле $Al(2)$ металлоциклы практически плоские, отклонения атомов от среднеквадратичных плоскостей циклов не превышают $0,005 \text{ \AA}$. Расстояния $O-C$, $C-C_\gamma$, $C-C_{Me}$ и $C_{Me}-C_{Me}$ лежат в интервале $1,253(3)–1,286(3)$, $1,377(3)–1,399(4)$, $1,518(4)–1,533(4)$ и $1,484(6)–1,557(7) \text{ \AA}$.

Исследованное соединение $Al(dpm)_3$ изоструктурно комплексу $Co(dpm)_3$ [15], кристаллы которого образованы из равного количества энантиомерных молекул.

Мотивы упаковок трис-дипивалоилметанатов переходных металлов. Координация трех лигандов приводит к двум хиральным формам молекул (рис. 3).

Для большинства металлов наблюдается быстрый обмен между энантиомерами, поэтому обычно при сублимации из растворов растут кристаллы-рацематы. Кристаллографические данные для таких кристаллов приведены в табл. 4. На основе этих данных выявлены три различные фазы (α , β и γ) рацематов трис-дипивалоилметанатов металлов. Для $\beta-Fe(dpm)_3$ и $\gamma-Co(dpm)_3$ при понижении температуры ниже 150 K наблюдаются небольшие обратимые изменения сим-

Т а б л и ц а 4

Некоторые характеристики упаковок трис-дипивалоилметанатов переходных металлов

Комплекс, ссылка	Фаза	REFCODE в базе [12]	Пр. гр. Z	$V_{\text{крист}}$	T, K R	a α	b β	c γ
$Mn(dpm)_3$ 2000 [13]	α	QAYYEU	$C2/c$ 4	887,2	153 7,23	9,529	17,450 95,86	21,454
$Fe(dpm)_3$ 1986[14]	β	DUBMES10	$C2/c$ 8	947,1	RT 10,0	20,325	17,350 111,98	23,171
$Fe(dpm)_3$ 2008 [22]	β		$C2/c$ 8	939,6	243 —	20,300	17,286 112,23	23,141
	β_1		$P-1$ 4	935,0	210 —	13,034 106,95	13,545 100,64	23,125 99,16
$Co(dpm)_3$ 2008 [15]	γ_1	FECWEP01	$C2/c$ 12	912,2	100 6,91	28,007	18,482 98	21,356
	γ	FECWEP02	$P-3c1$ 6	960,9	RT 5,0	18,810	18,810	18,815 120
	ξ	FECWEP03	$Pnma$ 4	—	100 5,94	19,239	18,8810	10,781
$Sc(dpm)_3$ 2006 [16]	β	KENMEW	$C2/c$ 8	942,1	173 9,72	20,171	17,380 112,71	23,304
$Al(dpm)_3$	γ_1		$C2/c$ 12	927,5	150 7,1	28,158 7	18,517 97,573	21,5332
	γ_1		$C2/c$ 12	968,5	RT —	28,54	18,93 97,16	21,68

метрии кристаллов, для обозначения этих фаз введены подстрочные индексы β_1 и γ_1 . Причем в β -фазе число молекул в элементарной ячейке в 2 раза больше, чем в β_1 , а в γ , наоборот, в 2 раза меньше, чем в γ_1 . Кроме того, для $\text{Co}(\text{dpm})_3$ установлена структура метастабильной фазы, в которой статистически разупорядочены формы C и C^* молекул. Эту фазу обозначили ξ . Структура исследуемого нами комплекса $\text{Al}(\text{dpm})_3$ в интервале температур 100—290 К не меняется и описывается в рамках γ_1 -фазы.

Анализ упаковок молекул показал, что в большинстве фаз *трис*-дипивалоилметанатов, как и в *трис*-ацетилацетонатах металлов [23], выделяются плоскости с плотной гексагональной укладкой комплексов. В таких плоскостях каждая молекула имеет 6 ближайших соседей с расстояниями между центрами $\sim 8,7$ — $9,4$ Å. Центры молекул не выходят из таких плоскостей более чем на $0,8$ Å. Дополнительно на расстояниях $\sim 9,1$ — $9,8$ Å расположены молекулы из соседних плоскостей (упаковка однослойная, в общепринятых обозначениях AA). Таким образом, ближайшее молекулярное окружение в кристалле является почти правильной гексагональной бипирамидой. При анализе рацемических упаковок важна хиральность молекул. Приписывание молекуле формы C или C^* проводили так же, как и в [23]. Для дипивалоилметанатов металлов установлены 3 типа гексагонального молекулярного окружения в плотнейших плоскостях, которые представлены на рис. 4.

Плоскости с гексагональным окружением $4a$ наблюдаются в структуре α -фазы $\text{Mn}(\text{dpm})_3$, пр. гр. $C2/c$ (см. рис. 4, *a*). В кристалле одна независимая молекула. Элементами симметрии получаем в элементарной ячейке 4 молекулы, две формы C и две C^* . В плоскости (002) центры молекул формируют тригональную сетку $4a$, в которой молекулы только одной хиральности. Вдоль оси z идет последовательное чередование плоскостей с изменением хиральности молекул (упаковка AA^*). С учетом хиральности ближайшее окружение для молекулы формы C можно записать $[6C] + 2C^*$, а для формы C^* — $[6C^*] + 2C$.

Плоскости с гексагональным окружением $4b$ наблюдаются в фазах β и β_1 (см. рис. 4, *b*). В кристалле β - $\text{Fe}(\text{dpm})_3$, пр. гр. $C2/c$ две независимых молекулы и 8 молекул в элементарной ячейке: 4 C и 4 C^* . В плоскости (020) центры молекул формируют гексагональную сетку (см. рис. 4, *b*). В каждой из таких плоскостей одной из хиральных форм в 3 раза больше, чем другой. Вдоль оси b выше и ниже на $\Delta y = 1/2$ располагаются точно такие же две плоскости, в которых хиральности молекул меняются на противоположные (т.е. снова упаковка однослойная AA^*). Поэтому общее число хиральных форм молекул в двух ближайших плоскостях одинаково. Гексагональное окружение молекул в плоскостях дополняется до бипирамиды еще двумя молекулами другой хиральности. С учетом хиральности ближайшее окружение симметрично, его можно записать для тех молекул, хиральность которых в плоскости преобладает, например, для формы C $[4C + 2C^*] + 2C^*$, а для другой формы C^* — $[6C] + 2C$. Для соседней плоскости в записи ближайшего окружения C и C^* меняются местами.

Плоскости с гексагональным окружением $4c$ наблюдаются в γ и γ_1 -фазах (см. рис. 4, *c*). В кристалле γ - $\text{Co}(\text{dpm})_3$, пр. гр. $P-3c_1$ в элементарной ячейке две независимых молекулы с центрами $\text{Co}(1)$, $\text{Co}(2)$, которые имеют хиральности C и C^* соответственно. Общее число молекул в элементарной ячейке равно шести, 3 C и 3 C^* формы. В кристалле центры молекул образуют несколько искаженную плотную кубическую объемно-центрированную упаковку ($I_{\text{куб}}$). В центре кубов молекулы одной хиральности, а в вершинах кубов — другой. В структуре можно выделить 6 плоскостей, характерных для идеальной кубической объемно-центрированной упаковки, в координатных осях которой они имеют индексы типа $\{110\}$. Узловые сетки в этих плоскостях тригональные, наложение их происходит по закону $I_{\text{куб}}$.

Полученные данные показывают, что структура $\text{Al}(\text{dpm})_3$ совпадает со структурой $\text{Co}(\text{dpm})_3$ при 100 К. Во всех известных упаковках *трис*-дипивалоилметанатов металлов можно выделить плоскости, в которых каждая молекула имеет гексагональное окружение точно такими же молекулами. Учет хиральности этих молекул позволяет установить отличительные особенности всех трех фаз упаковок этих комплексов.

Авторы выражают благодарность И.А. Байдиной за исследование комплекса при комнатной температуре и П.Е. Плюснину за проведение термических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xu L., Trudell M.L.* // *Tetrahedron Lett.* – 2003. – **44**, N 12. – P. 2553 – 2555.
2. *Низельский Ю.Н., Иценко С.С., Лунатова Т.Э.* Теоретическая и прикладная химия β-дикетонатов металлов / Под ред. В.И. Спицына и Л.И. Мартыненко – М.: Наука, 1985. – С. 236 – 256.
3. *Малетин Ю.А.* / Теоретическая и прикладная химия β-дикетонатов металлов. / Под ред. В.И. Спицына и Л.И. Мартыненко – М.: Наука, 1985. – С. 256 – 261.
4. *Nisibulin A.G., Moisala A., Brown D.P., Kauppinen E.I.* // *Carbon.* – 2003. – **41**. – P. 2711 – 2724.
5. *Варламова Л.М., Тананаева О.И., Мартыненко Л.И.* Проблемы химии и применения β-дикетонатов металлов. Под ред. акад. В.И. Спицына – М.: Наука, 1982. – С. 184 – 199.
6. *Грибов Б.Г., Домрачев Г.А., Жук Б.В. и др.* Осаждение пленок и покрытий разложением металлоорганических соединений / Под ред. Г.А. Разуваева. – М.: Наука, 1981.
7. *The chemistry of metal CVD* / Ed. T. Kodas, M. Hampden-Smith. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge. – Tokyo: VCH, 1994.
8. *Moshier R.W., Sievers R.E.* Gas Chromatography of Metal Chelates. – Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1967.
9. *Пешикова В.М.* Проблемы химии и применения β-дикетонатов металлов / Под ред. акад. В.И. Спицына – М.: Наука, 1982. – С. 203 – 211.
10. *Игуменов И.К., Чумаченко Ю.В., Земсков С.В.* Проблемы химии и применения β-дикетонатов металлов / Под ред. В.И. Спицына – М.: Наука, 1982. – С. 100 – 120.
11. *Константинов С.Г., Дудчик Г.П., Поляченко О.Г.* Теоретическая и прикладная химия β-дикетонатов металлов / Под ред. В.И. Спицына и Л.И. Мартыненко – М.: Наука, 1985. – С. 148 – 159.
12. *Cambridge Structural Database Systems. Version 5.29.* Cambridge Crystallographic Data Centre. – 2008.
13. *Magnus P., Payne A.H., Waring M.J. et al.* // *Tetrahedron Lett.* – 2000. – **41**. – P. 9725.
14. *Байдина И.А., Стабников П.А., Алексеев А.В. и др.* // *Журн. структур. химии.* – 1986. – **27**, № 3. – С. 102 – 109.
15. *Ahmed M.A.K., Fjellvag H., Kjekshus A., Dietzel P.D.C.* // *Z. Anorg. Allg. Chem.* – 2008. – **634**. – P. 247 – 254.
16. *Rossini A.J., Schurko R.W.* // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2006. – **128**. – P. 10391.
17. *Карякин Ю.В., Ангелов И.И.* Чистые химические вещества. – М.: Химия, 1974.
18. *Мишер Р., Сиверс Р.* Газовая хроматография хелатов металлов. – М.: Мир, 1967.
19. *NETZSCH Proteus Thermal Analysis v.4.8.1.* – NETZSCH-Gerätebau—Bayern. – Germany, 2005.
20. *Bruker AXS Inc. (2004).* APEX2 (Version 1.08), SAINT (Version 7.03), and SADABS (Version 2.11). Bruker Advanced X-ray Solutions. – Madison, Wisconsin, USA, 2004.
21. *Sheldrick G.M.* SHELXL-97, release 97-2. – Germany, University of Coettigen, 1998.
22. *Смоленцев А.И., Алексеев А.В., Горвард Р.В. и др.* // *Журн. структур. химии.* – 2008. – **49**, № 2. – С. 383 – 386.
23. *Стабников П.А., Жаркова Г.И., Комисарова Л.А. и др.* // *Журн. структур. химии.* – 2010. – **51**, № 3. – С. 575 – 586.