

## ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СМЕСЕЙ ДИПИВАЛОИЛМЕТАНАТА ЦИРКОНИЯ(IV) И ДИПИВАЛОИЛМЕТАНАТА ИТТРИЯ(III)

© А. Е. Тургамбаева<sup>1</sup>, К. В. Жерикова<sup>1</sup>, С. А. Мосягина<sup>1,2</sup>, В. В. Крисюк<sup>1</sup>,  
В. В. Лукашов<sup>1,3</sup>, И. К. Игуменов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН (ИНХ СО РАН),  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 3

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

<sup>3</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН),  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1

\* E-mail: igumen@niic.nsc.ru

Поступила в Редакцию 9 ноября 2018 г.

После доработки 2 марта 2021 г.

Принята к публикации 2 марта 2021 г.

*Проведен комплекс исследований термических свойств в конденсированной и газовой фазах индивидуальных прекурсоров дипивалоилметаната циркония(IV)–дипивалоилметаната иттрия(III)  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  ( $Hthd$  — 2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дион) и их смесей, используемых для получения смешанно-оксидных пленок методом химического осаждения из газовой фазы. Установлено, что в конденсированной фазе скорость процесса испарения как индивидуальных соединений, так и их смесей существенно выше скорости разложения. С использованием масс-спектрометрического мониторинга состава газовой фазы изучено парообразование, термическая устойчивость паров и термораспад в вакууме и в присутствии кислорода. Сравнение термического поведения индивидуальных соединений  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$ , нагреваемых в отдельных испарителях системы ввода масс-спектрометра, и их смесей с различным соотношением компонентов  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  фазы показало, что в исследованном температурном интервале отсутствует химическое взаимодействие прекурсоров.*

Ключевые слова: дипивалоилметанат циркония; дипивалоилметанат иттрия; MOCVD-прекурсоры; термические свойства

DOI: 10.31857/S0044461821040046

Термобарьерные покрытия, обладающие низкой теплопроводностью, широко применяются в аэрокосмической промышленности и энергетике [1, 2]. Использование оксидных покрытий на различных элементах газотурбинных двигателей позволяет повысить рабочую температуру и, как следствие, их КПД. В настоящее время для нанесения термобарьерных покрытий, работающих при повышенных температурах (до 1150°C), наиболее широко используется система  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$  (7-8YSZ).

Известные технологии нанесения термобарьерных покрытий энергоемки и затратны. Актуальной задачей является разработка эффективных технологических

процессов нанесения термобарьерных покрытий на лопатки турбины, камеры сгорания, системы трубопроводов и др. Большие перспективы для получения многокомпонентных толстых слоев оксидов металлов (от 50 мкм и выше) на поверхностях со сложным рельефом имеет химическое осаждение из газовой фазы с использованием летучих соединений металлов с органическими лигандами (metallorganic chemical vapor deposition, MOCVD) [3, 4]. В основе метода лежит формирование покрытия на поверхности изделия при термическом разложении исходного летучего соединения металла с органическими лигандами (прекурсор), транспортируемого через газовую фазу.

Для получения методом MOCVD керамических термобарьерных покрытий состава 7-8YSZ в качестве прекурсоров используют  $\beta$ -дикетонаты соответствующих металлов, в частности, дипивалоилметанаты (2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионаты, thd) [5–8]. Пленки, содержащие оксиды двух или более металлов, можно получать с использованием различных способов формирования смесей паров прекурсоров в зоне осаждения покрытий: из разных испарителей с монометалльными прекурсорами; из одного испарителя, содержащего смесь прекурсоров с заданным соотношением компонентов; из одного испарителя с гетерометаллическим прекурсором.

Как показали исследования конвективного теплообмена при сублимации одиночной частицы смеси  $Z(\text{thd})_4/Y(\text{thd})_3$  в потоке инертного газа, интенсификация процессов переноса способна изменить кинетику сублимации смесей прекурсоров. Так, например, использование вихревых камер [9] с центробежным псевдооживленным слоем частиц существенно ускоряет процесс массопереноса и позволяет использовать единый источник паров для смеси прекурсоров с различной летучестью. В любом случае при применении как разных испарителей, так и одного испарителя для смеси прекурсоров с заданным соотношением компонентов необходима полная информация о термическом поведении в конденсированной и газовой фазах индивидуальных соединений и их смесей.

В работах [10–12] приведены результаты исследований процесса парообразования бинарных смесей  $\beta$ -дикетонатных металлокомплексов. Авторы отмечают синергический эффект при сублимации/испарении, проявляющийся в увеличении массопереноса малолетучего комплекса в смеси с высоколетучим комплексом. Оба комплекса образованы одним и тем же  $\beta$ -дикетоном. Ожидаемо, что массоперенос компонентов в газовую фазу из смесей дипивалоилметанатов циркония и иттрия будет зависеть от совокупности различных экспериментальных факторов. Информация о подобном рода исследованиях применительно к системе  $Zr(\text{thd})_4-Y(\text{thd})_3$  в литературе отсутствует.

Цель работы — изучение термического поведения системы прекурсоров  $Zr(\text{thd})_4-Y(\text{thd})_3$  в конденсированной и газовой фазах. Эта система отличается от ранее исследованной  $Zr(\text{thd})_4-Nd(\text{thd})_3$  [13] главным образом тем, что летучесть (давление насыщенного пара)  $Y(\text{thd})_3$  значительно выше, чем у  $Zr(\text{thd})_4$  [14], тогда как эти величины для  $Zr(\text{thd})_4-Nd(\text{thd})_3$  системы сравнимы. Температуры сублимации ( $T_{\text{субл}}$ ) для комплексов  $Zr(\text{thd})_4$ ,  $Nd(\text{thd})_3$  и  $Y(\text{thd})_3$  — 180, 185 и 140°C соответственно.

## Экспериментальная часть

Коммерчески доступные индивидуальные комплексы  $Zr(\text{thd})_4$  и  $Y(\text{thd})_3$  (99%, ООО «ДалХИМ») перед экспериментами были дополнительно очищены сублимацией в градиентной трубчатой печи при пониженном давлении ( $10^{-2}$  Торр) при  $T = 190$  и  $160^\circ\text{C}$  для  $Zr(\text{thd})_4$  и  $Y(\text{thd})_3$  соответственно. Смесей прекурсоров с мольным соотношением компонентов  $Zr(\text{thd})_4$  и  $Y(\text{thd})_3$  1:1 и 3:1 готовили двумя способами: совместным истиранием в ступке соответствующих навесок индивидуальных соединений и совместным растворением навесок прекурсоров в диэтиловом эфире с последующим упариванием растворителя на воздухе. Смесь прекурсоров с соотношением компонентов 1:1, полученную механическим смешением, подвергали дополнительной термообработке. Для этого навеску смеси в стеклянном контейнере помещали в разогретую до  $190^\circ\text{C}$  печь и выдерживали в течение 30 мин в токе аргона высокой чистоты. Полученную смесь анализировали после ее охлаждения до комнатной температуры.

Термогравиметрический и дифференциально-термический анализ (ТГ-ДТА) выполнены с использованием термоанализатора Netzsch TG 209 F1 Iris. Условия всех экспериментов были идентичны: масса навески составляла 10 мг, нагрев проводили в атмосфере гелия ( $30 \text{ мл}\cdot\text{мин}^{-1}$ , открытый тигель  $Al_2O_3$ , скорость нагрева  $10 \text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$ ), погрешность измерения температуры 1.5%.

Визуально-политермические исследования поведения образцов смесей, полученных различными способами, были проведены на нагревательном столике Кофлера с микроскопом (VEB Wägetechnik Rapido, РНМК 80/2555). Образцы нагревали от комнатной температуры до  $200^\circ\text{C}$  со скоростью  $10 \text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$ .

Рентгенофазовый анализ (РФА) комплексов и их смесей проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 ( $Cu_{K\alpha}$ -излучение, в области углов  $2\theta = 5-60^\circ$ , комнатная температура). Изменения фазового состава индивидуальных комплексов и их смесей при нагревании исследовали на дифрактометре Bruker D8 Advance с помощью высокотемпературной приставки в интервале температур  $25-190^\circ\text{C}$ . Измерения проводили при  $2\theta$  от  $5$  до  $60^\circ$  с шагом  $0.02^\circ$ . Ошибка метода 5%.

Исследование термического поведения паров прекурсоров было проведено с использованием время-пролетного масс-спектрометра МСХ-6 (диапазон до  $3000 m/z$ , ПО «Электрон») с оригинальной системой ввода паров в систему [15]. Вещество в стеклянной ампуле (несколько мг) помещали в испаритель и си-

стему вакуумировали. Пары исследуемого образца поступали из испарителя в реактор и далее через эффузионное отверстие (0,2 мм) в масс-спектрометр, где происходил анализ состава газовой фазы. При исследовании процесса испарения испаритель нагревали со скоростью 2 град·мин<sup>-1</sup> при постоянной температуре реактора. При исследовании термораспада температура испарителя оставалась постоянной, а реактор нагревали. Для исследования двухкомпонентной системы  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  была сконструирована система ввода, имеющая два испарителя с независимым нагревом: каждый прекурсор помещали в индивидуальную ампулу и нагревали до требуемой температуры (рис. 1). Для масс-спектрометрического мониторинга состава газовой фазы при испарении смесей  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  с мольным соотношением компонентов 1:1 и 3:1 смесь в стеклянной ампуле помещали в испаритель, который вакуумировали и нагревали со скоростью 2 град·мин<sup>-1</sup> от 130 до 182°C. При исследовании термораспада паров образец в испарителе нагревали до  $T_{исп} = 180^\circ C$  для смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  и до  $T_{исп} = 185$  и  $105^\circ C$  для  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  соответственно и поддерживали при заданной температуре в течение всего эксперимента. Пары вещества попадали в реактор, где происходил их нагрев до 500°C со скоростью 5 град·мин<sup>-1</sup>. Ионизация осуществлялась электронами с энергией 70 эВ. Сбор и обработку экспериментальных данных проводили с использованием аппаратного и программного обеспечения компании National Instruments Corp. Масс-

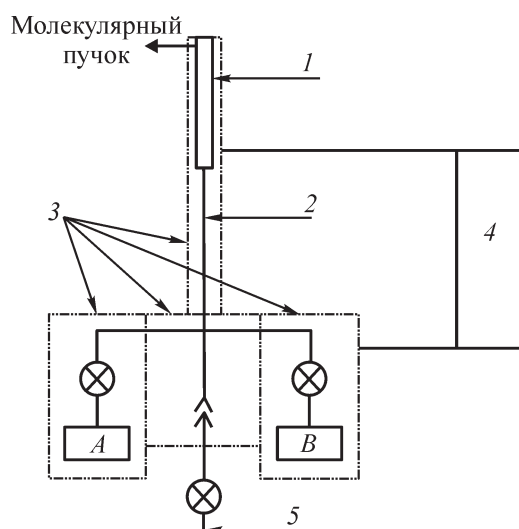


Рис. 1. Блок-схема системы ввода к масс-спектрометру для исследования многокомпонентных систем.

1 — реактор, 2 — трубопровод, 3 — нагревательные блоки, 4 — блок терморегуляторов, 5 — ввод газа-реактента.

спектры регистрировали каждые 2 мин. При необходимости в реактор вводили газ-реактент — кислород (рис. 1, позиция 5).

### Обсуждение результатов

Исследованные соединения и их смеси устойчивы на воздухе. Сублимационный тест показал, что оба индивидуальных комплекса  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  переходят в газовую фазу без остатка и конденсируются в виде одной зоны. По данным термогравиметрического анализа, они испаряются в одну стадию, нелетучий остаток <1%. Это свидетельствует о том, что скорость процесса испарения существенно выше скорости разложения. На кривой ДТА наблюдается отчетливо выраженный пик при 176°C, соответствующий плавлению  $Y(thd)_3$  (рис. 2, кривая 1). Комплекс  $Zr(thd)_4$  при нагревании претерпевает два фазовых перехода (эндотермические эффекты при 168 и 177°C, рис. 2, кривая 2). Из данных РФА следует, что кристаллическая структура комплекса при нагревании в интервале температур 25–190°C не изменяется, происходит лишь исчезновение малоинтенсивных пиков (см. таблицу).

Смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  3:1 и 1:1 при нагревании переходят в газовую фазу полностью при одинаковой температуре независимо от способа их приготовления. Кривые потери массы данных смесей лежат в температурном интервале между аналогичными кривыми индивидуальных комплексов. На кривой ДТА смеси 3:1, полученной механическим истиранием (рис. 2, кривая 3'), зарегистрированы два пика: при 161 и 168°C. Эндотермический эффект при 168°C соответствует фазовому переходу  $Zr(thd)_4$ . Эндотермический эффект при 162°C в виде широкого интенсивного пика зарегистрирован также и для механической смеси прекурсоров состава 1:1 (рис. 2, кривая 4'). На кривых ДТА индивидуальных комплексов термические эффекты при данных температурах отсутствуют.

При визуальном-политермическом исследовании смеси 1:1, приготовленной путем совместного растворения  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  в диэтиловом эфире (рис. 2, кривая 4), установлено, что оба пика при 144 и 160°C соответствуют плавлению. Фаза, плавящаяся в интервале ~144–150°C, присутствует в минимальном количестве, а после достижения температуры 160°C наблюдается плавление основной фазы. В расплаве наблюдаются также мелкие кристаллы еще одной неизвестной фазы, которые не плавятся при повышении температуры до 200°C. На кривой ДТА, зарегистрированной для механической смеси комплексов

Результаты рентгенофазового анализа сублимированного образца тетракис-2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионата циркония  $Zr(thd)_4$  при разных температурах

$T, ^\circ C$	Состав	Характеристика
40	$Zr(thd)_4$ + неизвестная фаза	Интенсивность непроиндицированных рефлексов существенно меньше, чем в начале нагрева
160	$Zr(thd)_4$ + неизвестная фаза	Непроиндицированных рефлексов почти нет
170	$Zr(thd)_4$ + неизвестная фаза	Дифрактограмма идентична зарегистрированной при 180°C
180	Однофазный $Zr(thd)_4$	
190	Однофазный $Zr(thd)_4$	

состава 3:1, наблюдаемые термические эффекты проявляются в виде малоинтенсивных и широких пиков (рис. 2, кривая 3). В целом характер кривой близок

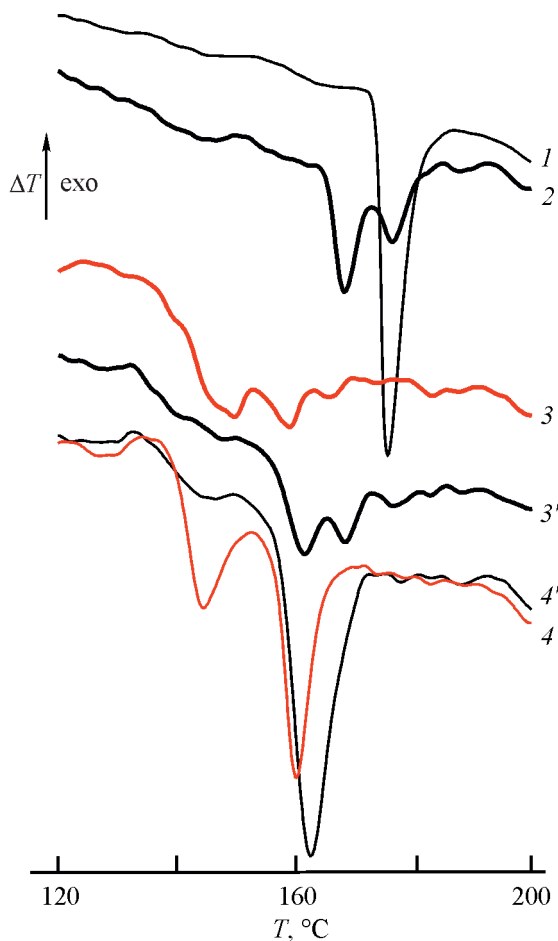


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа. 1 —  $Y(thd)_3$ , 2 —  $Zr(thd)_4$ , 3 — смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  3:1 (приготовлена растворением навесок), 3' — смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  3:1 (приготовлена механическим смешением), 4 — смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1 (приготовлена растворением навесок), 4' — смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1 (приготовлена механическим смешением);  $thd^-$  — 2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионат-анион.

к кривой ДТА, полученной для механической смеси состава 1:1. При визуально-политермическом исследовании образца установлено, что основная фаза не плавится, а наблюдается плавление только отдельных кристаллов в интервале 140–170°C. На основе совокупного анализа термического поведения смесей комплексов можно сделать заключение о том, что во всех исследованных композициях присутствуют одни и те же легкоплавкие фазы, но в разном отношении к основной фазе. Для смеси с большим содержанием иттриевого компонента (1:1) интенсивности пиков на кривых ДТА в интервале 140–170°C и пиков на дифрактограммах выше, что свидетельствует об образовании легкоплавких фаз твердых растворов на основе  $Y(thd)_3$  (рис. 3, кривые 5, 6). Можно также предположить, что большее количество твердых растворов прекурсоры образуют при кристаллизации из раствора. При механической обработке смесей образование твердых растворов, по-видимому, происходит медленнее, и их количество значительно ниже.

На дифрактограммах смеси состава 1:1 (рис. 3, кривые 5, 6) зарегистрированы два неразрешенных рефлекса при  $2\theta = 8-9^\circ$ , из которых только первый относится к  $Zr(thd)_4$ . Кроме того, присутствуют широкие рефлексы от  $11^\circ$  и до  $23^\circ$ . Дифрактограмма образца, полученного сплавлением эквимолярной смеси компонентов, заметно отличается от дифрактограмм для смесей, приготовленных механическим и растворным методами.

Таким образом, данные термического и рентгенофазового анализа при повышенных температурах подтверждают образование твердых растворов в системе  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$ .

По масс-спектрометрическим данным,  $Zr(thd)_4$  и  $Y(thd)_3$  в газовой фазе мономерны. При изотермическом нагреве исследованные соединения показали хорошую термическую устойчивость при испарении, определяющуюся воспроизводимостью масс-спектров в нескольких циклах нагревания и охлаждения испарителя. Отсутствие термической дегградации

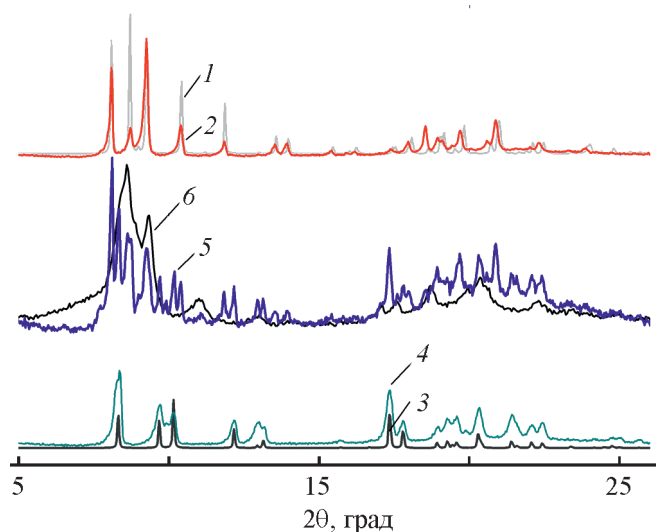


Рис. 3. Дифрактограммы образцов.

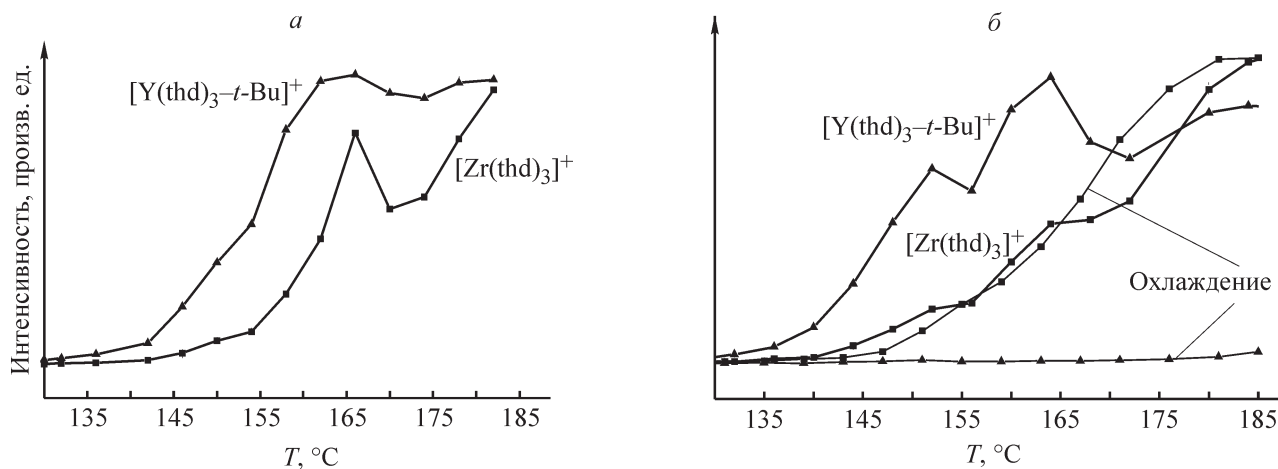
1 —  $Zr(thd)_4$ , дифрактограмма, построенная на базе монокристаллических данных [16]; 2 —  $Zr(thd)_4$  (эксп.); 3 —  $Y(thd)_3$ , дифрактограмма, построенная на базе монокристаллических данных [17]; 4 —  $Y(thd)_3$  (эксп.); 5 — смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1 (приготовлена растворением навесок); 6 — смесь после плавления  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1 (приготовлена растворением навесок);  $thd^-$  — 2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионат-анион.

образца было также подтверждено идентичностью дифрактограмм до и после нагрева.

Масс-спектрометрический мониторинг состава газовой фазы при испарении смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1, приготовленной из раствора, показал следующее. При нагревании наблюдался экспоненциальный рост интенсивности пиков ионов в масс-спектре, а

после 166°C происходил небольшой спад интенсивности, которая при дальнейшем нагреве до 180°C восстанавливалась. Мы полагаем, что это связано с плавлением  $Y(thd)_3$  компонента, приводящим к уменьшению поверхности испарения и блокированию испарения  $Zr(thd)_4$  компонента смеси (рис. 4, а). При нагревании смеси 3:1 наблюдалось два менее интенсивных спада и восстановления интенсивности пиков при  $T > 152$  и 164°C (рис. 4, б). В этом случае все эффекты также связаны с фазовыми переходами в конденсированной фазе, в частности, плавлением твердых растворов (145 и 161°C по ДТА) и с полиморфным переходом компонента  $Zr(thd)_4$  (168°C для индивидуального комплекса). При изотермическом выдерживании смеси 3:1 при 185°C интенсивность пиков  $Zr$ -содержащих ионов не изменялась, тогда как интенсивность пиков  $Y$ -содержащих ионов монотонно падала, что связано с испарением более летучего компонента  $Y(thd)_3$  из смеси. При последующем охлаждении смеси интенсивность пиков компонентов падала монотонно.

Было исследовано термическое поведение газовой фазы, полученной при нагревании смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  состава 1:1. Данные получены при температурах 190–500°C в присутствии кислорода. Использованная система ввода для масс-спектрометра фактически представляла собой миниатюрный МОСVD-реактор с горячими стенками, имеющий отдельные испарители с независимым нагревом, при этом давление в реакторе не превышало 0.5 Торр. Реакционная смесь из реактора непрерывно поступала через эффузионное отверстие непосредствен-

Рис. 4. Зависимость интенсивности избранных пиков ионов от температуры испарителя (представлены фрагментарные ионы  $[Y(thd)_3-t-Bu]^+$  и  $[Zr(thd)_3]^+$ ).

а — испарение смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  1:1, б — испарение смеси  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  3:1 (смеси приготовлены из раствора);  $thd^-$  — 2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионат-анион,  $t-Bu$  — *tert*-бутил.

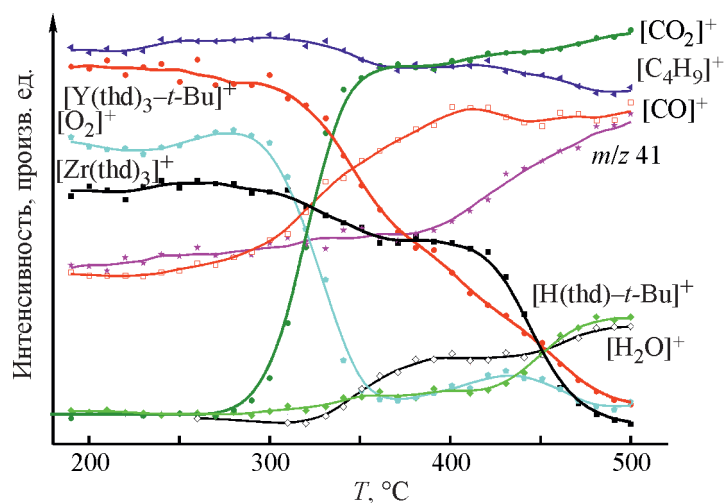


Рис. 5. Смесь  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$  (1:1), термораспад в присутствии кислорода: зависимость интенсивности избранных пиков ионов от температуры ( $T_{исп} = 180^\circ C$ ).

но в ионный источник (рабочее давление не превышало  $1.5 \cdot 10^{-5}$  Торр). В таких условиях разложение происходит на стенках реактора, а не в газовой фазе, вторичные реакции в ионном источнике исключены.

Из зарегистрированных при различных температурах масс-спектров получали температурные зависимости интенсивности выбранных пиков ионов, характеризующих состав газовой фазы при программируемом нагревании паров исследованных соединений (рис. 5). Температуру начала термолитического разложения оценивали по уменьшению интенсивности пиков ионов исходного соединения и росту интенсивности пиков ионов газообразных продуктов. Погрешность определения пороговых температур составляла  $\pm 10^\circ C$ .

В вакууме термораспад паров смеси начинается при  $T > 380^\circ C$ , и даже при  $500^\circ C$  интенсивность металлосодержащих ионов в масс-спектре достаточно высока. Это свидетельствует о том, что полнота разложения комплексов в условиях масс-спектрометрического эксперимента не достигается.

Термораспад паров смеси в присутствии кислорода на поверхности реактора начинается при  $T > 270^\circ C$ . Кислород расходуется на окисление органической части комплекса с образованием оксидов углерода и воды. При недостатке кислорода термораспад образца протекает при более высокой температуре. При этом в газовой фазе регистрируются молекулы свободного лиганда и его фрагменты, что более характерно для термораспада в вакууме.

Установлено, что вид температурных зависимостей интенсивности пиков металлосодержащих ионов для системы  $Zr(thd)_4$ – $Y(thd)_3$ , зарегистрированных при программируемом нагревании паров комплексов

в присутствии кислорода, практически совпадает для смесевой композиции и при отдельном введении паров индивидуальных компонентов в реактор.

## Выводы

Исследование системы дипивалоилметанат циркония(IV)–дипивалоилметанат иттрия(III) в конденсированной фазе показало, что индивидуальные комплексы и их смеси в исследованном температурном интервале термически стабильны и сублимируются без разложения.

Установлено, что при приготовлении смесей происходит образование легкоплавких фаз твердых растворов. Нагревание смесей выше температуры их плавления влияет на состав пара над образцом, что важно учитывать при выборе параметров эксперимента при осаждении пленок. Исходя из предположения, что твердые растворы образуются на основе более летучего иттриевого компонента смеси, для получения пленок с заданным содержанием иттрия необходимо оптимизировать содержание данного прекурсора в смеси.

В условиях масс-спектрометрического эксперимента при отдельном нагревании индивидуальных соединений в присутствии кислорода, как и при нагревании смесей, состав газообразных продуктов не изменяется. Это свидетельствует об отсутствии взаимного влияния паров прекурсоров на поверхности при температурах по крайней мере до  $500^\circ C$ . Температуры начала разложения исследованных смесей совпадают с аналогичным параметром для индивидуальных прекурсоров.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-19-10325.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность к.х.н. А. С. Юношеву (ИГиЛ СО РАН) за проведение РФА.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация о вкладе авторов

А. Е. Тургамбаева выполнила масс-спектрометрические эксперименты; К. В. Жерикова и С. А. Мосягина синтезировали, очистили исходные соединения, подготовили смеси и провели их исследование методами ТГ-ДТА и РФА; В. В. Крисюк интерпретировал данные РФА; В. В. Лукашов разработал систему ввода к масс-спектрометру для исследования многокомпонентных систем; И. К. Игуменов — постановка задачи и интерпретация экспериментов по массопереносу паров прекурсоров.

### Информация об авторах

Тургамбаева Асия Есенкельдиновна, к.х.н.,  
WoS ResearcherID AAQ-2589-2020,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-7325>

Жерикова Ксения Васильевна, к.х.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7938-1456>

Мосягина Светлана Андреевна,

ORCID: <https://orcid.org/000-0002-3802-3262>

Крисюк Владислав Владимирович, к.х.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-6488>

Владимир Владимирович Лукашов, к.т.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8178-7607>

Игуменов Игорь Константинович, д.х.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3621-9974>

### Список литературы

- [1] Мубояджян С. А., Будиновский С. А., Гаямов А. М., Смирнов А. А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток двигателей авиационных газовых турбин магнетронным методом // *Авиаци. материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 3–8.
- [2] Игуменов И. К., Аксенов А. Н. Термобарьерные покрытия лопаток газовых турбин: метод химического осаждения из паровой фазы (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2017. № 12. С. 5–15 [Igumenov I. K., Aksenov A. N. Thermal barrier coatings on gas turbine blades: Chemical vapor deposition (Review) // *Therm. Eng.* 2017. V. 64. N 12. P. 865–873. <https://doi.org/10.1134/S0040601517120035>].
- [3] Chemical Vapor Deposition—Precursors, Processes and Applications / Eds Anthony C. Jones and Michael L. Hitchman. Cambridge: RSC Publ., 2009. P. 37–92. <https://doi.org/10.1039/9781847558794>
- [4] Сыркин В. Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. М.: Наука, 2000. С. 177–180.
- [5] Wahl G., Nemetz W., Giannozzi M., Rushworth S., Baxter D., Archer N., Cernuschi F., Boyle N. Chemical vapor deposition of TBC: An alternative process for gas turbine components // *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2000. V. 123. N 3. P. 520–524. <https://doi.org/10.1115/1.1364495>
- [6] Wahl G., Metz Ch., Samoilenkov S. Thermal barrier coatings // *J. De Physique IV: Proc.* 2001. V. 11. N Pr3. P. 835–846. <https://doi.org/10.1051/jp4:20013105>
- [7] Garcia J. R. V., Goto T. Thermal barrier coatings produced by chemical vapor deposition // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2003. V. 4. P. 397–402. [https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(03\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(03)00048-2)
- [8] Tu R., Goto T. Thermal cycle resistance of yttria stabilized zirconia coatings prepared by MO-CVD // *Mater. Trans.* 2005. V. 46 (6). P. 1318–1323. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.1318>
- [9] Абдрахманов Р. Х., Дворников Н. А., Лукашов В. В. Динамика двухфазного закрученного потока в вихревой камере с нижним торцевым завихрителем // *Теплофизика и аэромеханика*. 2017. Т. 24. № 3 (105). С. 349–356.
- [10] Зайцева И. Г., Кузьмина Н. П., Мартыненко Л. И. Влияние ацетилацетоната натрия на переход в газовую фазу ацетилацетонатов скандия и лютеция // *Координац. химия*. 1999. Т. 25. № 11. С. 867–869.
- [11] Kuzmina N. P., Martynenko L. I., Chugarov N. V., Zaitseva I. G., Grigoriev A. N., Yakushevich A. N. Synergism by sublimation of volatile lanthanide  $\beta$ -diketonates // *J. Alloys Compd.* 2000. V. 308. N 1–2. P. 158–162. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)01047-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)01047-1)
- [12] Жаркова Н. Я., Дзюбенко Н. Г., Мартыненко Л. И. Эффект синергизма при совместной сублимации ацетилацетонатов циркония (IV) и иттрия (III) // *Координац. химия*. 1997. Т. 23. № 7. С. 520–524.
- [13] Тургамбаева А. Е., Жерикова К. В., Мосягина С. А., Игуменов И. К. Исследование термического поведения системы дивалоилметанатов циркония и неодима // *ЖПХ*. 2017. Т. 90. № 7. С. 848–852 [Turgambaeva A. E., Zherikova K. V.,

- Mosyagina S. A., Igumenov I. K.* A study of the thermal behavior of the system of zirconium and neodymium dipivaloylmethanates // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 7. P. 1062–1067.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427217070060>].
- [14] *Zelenina L. N., Chusova T. P., Zherikova K. V., Nazarova A. A., Igumenov I. K.* Thermal study of CVD metal–organic precursors // *J. Thermal Anal. Calorim.* 2018. V. 133. P. 1157–1165.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-018-7241-8>
- [15] *Turgambaeva A., Prud'homme N., Krisyuk V., Vahlas C.* Mass spectrometric monitoring of the gas phase during the CVD of copper from copper cyclopentadienyl triethylphosphine // *Chem. Vapor Deposition.* 2012. V. 18. P. 209–214.  
<https://doi.org/10.1002/cvde.201106972>
- [16] *Spijksma G. I., Bouwmeester H. J. M., Blank D. H. A., Fischer A., Henry M., Kessler V. G.* Chemistry of 2,2,6,6,-tetramethyl-3,5-heptanedione (Hthd) modification of zirconium and hafnium propoxide precursors // *Inorg. Chem.* 2006. V. 45. P. 4938–4950.  
<https://doi.org/10.1021/ic051674j>
- [17] *Громилов С. А., Байдина И. А., Прохорова С. А., Стабников П. А.* Кристаллическая и молекулярная структура мономерной модификации дипивалоилметаната иттрия(III). Структурная организация адсорбированных слоев // *ЖСХ.* 1995. Т. 36. № 3. С. 541–547 [*Gromilov S. A., Baidina I. A., Prokhorova S. A., Stabnikov P. A.* Crystal and molecular structure of monomeric yttrium(III) dipivalylmethanate // *J. Structur. Chem.* 1995. V. 36. N 3. P. 496–501.  
<https://doi.org/10.1007/BF02578537>].
-