

Кинетические параметры процесса термического разложения нанопорошка гидроксида кобальта при изотермических условиях

© Т.Х. Нгуен

НИТУ «МИСиС», Москва, 119049, Россия
ГТУ им. Ле Куй Дона, Ханой, 100000, Вьетнам

В работе исследованы кинетические параметры процесса получения нанопорошка Co_3O_4 термическим разложением гидроксида кобальта $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях. Процесс термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ проводили в трубчатой печи в интервале температур 150...200 °С. Установлено, что константа скорости термического разложения при 200 °С примерно в 2,7 раза больше, чем в случае разложения при 150 °С, соответственно; за 80 мин термического разложения процесс ускоряется в 1,8 раза. Энергия активации данного процесса приблизительно равна 33 кДж/моль, что свидетельствует о смешанном режиме реагирования. Показано, что полученные при температуре максимальной скорости термического разложения (180 °С) наночастицы Co_3O_4 главным образом состоят из агрегатов вытянутой овоидной и игольчатой формы с частицами, средний размер которых составляет 47 нм, их длина достигает 200 нм.

Ключевые слова: кинетика, нанопорошок, оксид кобальта, термическое разложение, изотермические условия

Введение. Нанопорошок оксида кобальта Co_3O_4 обладает уникальными свойствами [1–4]. Оксид Co_3O_4 является наиболее стабильной фазой, так как чистый кобальт фактически нестабилен при комнатной температуре и может превращаться в оксиды CoO , Co_2O_3 и Co_3O_4 [1]. Это обуславливает применение наночастиц Co_3O_4 в различных областях науки, техники и промышленности: в газовых сенсорах, литий-ионных батареях, солнечных селективных поглотителях, конденсаторах, автоэмиссионных материалах, системах накопления энергии, тонких электрохромных пленках, магниторезистивных устройствах и катализаторах [2, 5–7]. Следует отметить, что из всех магнитных материалов наночастицы Co_3O_4 являются предпочтительными вследствие их магнитных свойств [1, 7]. Кроме того, нанопорошок Co_3O_4 также можно использовать в качестве сырья для синтеза нанопорошка металлического кобальта путем восстановления, а также и для других способов [8, 9]. Поэтому исследование и разработка методов для синтеза нанопорошка Co_3O_4 является научно-практической задачей.

Получение нанопорошка Co_3O_4 осуществляется различными способами, большинство которых характеризуется рядом недостатков, таких как пониженная производительность и высокие затраты энер-

гии [2, 5, 8]. Химико-металлургический метод, который включает в себя этапы термического разложения гидроксидного соединения, представляет собой высокоэффективный метод, позволяющий регулировать размерные характеристики наночастиц в ходе их получения [9, 10–13].

Недостатком химико-металлургического метода получения нанопорошка является низкая производительность вследствие низкой скорости процесса термического разложения в условиях выдержки при низких температурах. В то же время чрезмерное увеличение температуры термического разложения не рекомендуется, поскольку приводит к интенсивному протеканию процессов агрегации и спекания наночастиц и, соответственно, к формированию частиц размером вне нанометрового диапазона [9, 11].

Изучение кинетики процесса получения нанопорошка Co_3O_4 термическим разложением нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях для определения оптимальных временно-температурных параметров при гарантии необходимых свойств полученных продуктов представляет собой весьма важную задачу как с научной, так и с практической точек зрения.

Цель работы — изучение кинетических параметров процесса получения нанопорошка оксида кобальта Co_3O_4 термическим разложением гидроксида кобальта $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях, а также исследование свойств полученных порошковых образцов.

Материалы и методики. Нанопорошок Co_3O_4 был получен из нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ путем термического разложения. До этого нанопорошок $\text{Co}(\text{OH})_2$ синтезировали методом химического осаждения из водных растворов нитрата кобальта $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (10 %, мас.) и щелочи NaOH (10 %, мас.) в условиях непрерывного перемешивания, контроля температуры $T = 20$ °С и кислотности $\text{pH} = 9$. Реакция осаждения гидроксида имеет следующий вид:

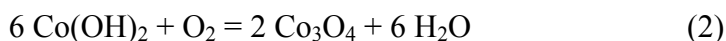


Кислотность pH смеси растворов регистрировали с помощью рН-метра Mettler Toledo MP 230, точность которого составляет 0,03. Температуру проведения осаждения контролировали на термостате Lauda E 300.

Отмывку синтезированного осадка $\text{Co}(\text{OH})_2$ выполняли дистиллированной водой с помощью воронки Бюхнера. Полная очистка осадка от ионов соли нитрата была достигнута при pH воды над осадком, равном 7. После этого полученный осадок сушили в течение 2 сут при температуре 40 °С. Высушенный $\text{Co}(\text{OH})_2$ измельчали на мельнице-ступке Fritsch Pulverisette 2. В результате был получен нанопорошок $\text{Co}(\text{OH})_2$, который использовали при дальнейшем исследовании.

Для выбора температурных условий проведения процесса термического разложения нанопорошок $\text{Co}(\text{OH})_2$ исследовали термогравиметрическим (ТГ) методом на установке SDT Q600 (США) при режиме линейного нагрева со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $25 \dots 700^\circ\text{C}$ в атмосфере воздуха.

Изучение кинетики процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ проводили в трубчатой печи SNOL 0,2/1250 при температуре, выбранной на основе данных ТГ. В ходе процесса протекала реакция



Степень превращения α (д.е.) (отношение массы прореагировавшего вещества к его общей массе в исходном образце) рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \frac{6M_{\text{Co}(\text{OH})_2} + M_{\text{O}_2}}{6M_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,16 \frac{m_0 - m_t}{m_0}, \quad (3)$$

где m_0 — исходная масса навески образца $\text{Co}(\text{OH})_2$, г; m_t — масса образца через время t , г; M — молярная масса веществ.

Кинетика процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ изучена с помощью модели Грея — Веддингтона [14]. Использование этой модели позволяет рассчитать константы скорости процесса по формуле

$$kt = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}, \quad (4)$$

где k — константа скорости, с^{-1} ; t — время протекания реакции, с.

Расчет энергии активации E_a (Дж/моль) проводили по экспериментальным данным, полученным в изотермических условиях, используя уравнение Аррениуса:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln A, \quad (5)$$

где R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К; A — константа, называемая предэкспоненциальным множителем.

Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре «Дифрей-401» (Россия) (CrK_α -излучение) при комнатной температуре.

Размер и морфологию полученных наночастиц порошков исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA 3В (Чехия).

Удельную поверхность $S_{\text{уд}}$ ($\text{м}^2/\text{кг}$) образцов измеряли методом БЭТ (BET method) по низкотемпературной адсорбции азота на анали-

заторе NOVA 1200e (США). Средний размер частиц порошков $D_{\text{ср}}$ (м) вычисляли по данным измерений $S_{\text{уд}}$, используя формулу

$$D_{\text{ср}} = \frac{6}{\rho S_{\text{уд}}}, \quad (6)$$

где ρ — пикнометрическая плотность, кг/м^3 .

Результаты и их обсуждение. Результаты РФА и измерений на СЭМ образца нанопорошка гидроксида $\text{Co}(\text{OH})_2$ приведены на рис. 1.

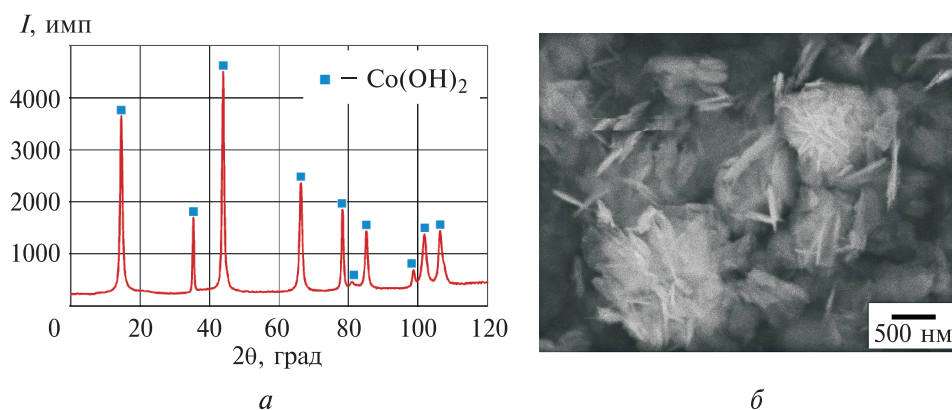


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и СЭМ-изображение (б) образца нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$

В результате РФА (рис. 1, а) установлено, что порошковый образец является однофазным, содержащим только гидроксидную фазу $\text{Co}(\text{OH})_2$. Анализ СЭМ-изображения (рис. 1, б) показал, что наночастицы $\text{Co}(\text{OH})_2$ в основном имеют игольчатую форму и предрасположены к образованию крупных агрегатов шаровидной формы. Удельная поверхность нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ составляет $31,7 \text{ м}^2/\text{г}$, соответственно значение среднего размера полученных наночастиц $D_{\text{ср}} = 53 \text{ нм}$.

На рис. 2 приведены ТГ-кривые, полученные в ходе термического разложения нанопорошка гидроксида $\text{Co}(\text{OH})_2$ на установке SDT Q600 при режиме линейного нагрева со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $25 \dots 700^\circ\text{C}$.

Согласно данным ТГ-исследований, процесс термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ состоит из трех этапов. В соответствии с проведенными расчетами на I этапе происходит удаление адсорбированной воды в интервале температур $25 \dots 150^\circ\text{C}$, II и III этапы связаны с отщеплением структурной воды по реакции (2). Наличие двух пиков (I, III) отщепления структурной воды, фиксируемых на ТГ-кривой, можно объяснить тем, что во всех случаях частицы имеют закрытые поры. При повышении температуры закрытые поры образцов вскрываются и из них удаляется структурная

вода. В интервале температур 150...200 °C идет процесс термического разложения, причем при температуре 180 °C — с максимальной удельной скоростью $11,5 \cdot 10^{-8}$ кг/с.

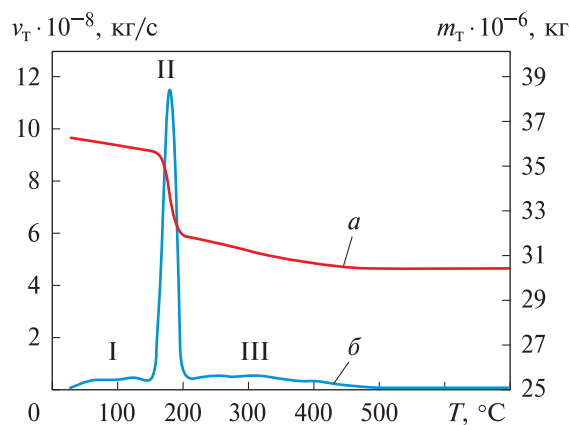


Рис. 2. ТГ-кривые термического разложения нанопорошка гидроксида $\text{Co}(\text{OH})_2$:

a — изменение массы m_T , кг; *б* — скорость v_T изменения массы, кг/с

Для исследования кинетических параметров процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях были получены зависимости степени превращения α от времени t при разных температурах: 150, 160, 170, 180 и 200 °C. Эти температуры находятся в интервале интенсивного протекания процесса термического разложения (см. рис. 2).

Зависимости степени превращения от времени $\alpha(t)$ и графический расчет констант скорости $k(T)$ процесса термического разложения при различных температурах приведены на рис. 3.

На рис. 3, *a* видно, что процесс термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ начинает сильно ускоряться в интервале температуры 180...200 °C. При температуре 200 °C за 80 мин термического разложения значение α составило 96 %, т. е. примерно в 1,8 раза больше, чем значение, полученное в случае при 150 °C (за то же время). Значения константы скорости $k(T)$ находят по тангенсу угла наклона прямой, проходящей через экспериментальные точки (рис. 3, *б*). В таблице приведены рассчитанные значения степени превращения α и константы скорости k при различных температурах.

Из приведенных в таблице данных следует, что константа скорости термического разложения при 200 °C примерно в 2,7 раза больше значения, полученного в случае при 150 °C, соответственно за 80 мин термического разложения процесс ускоряется в 1,8 раза, согласно данным изменения $\alpha(t)$.

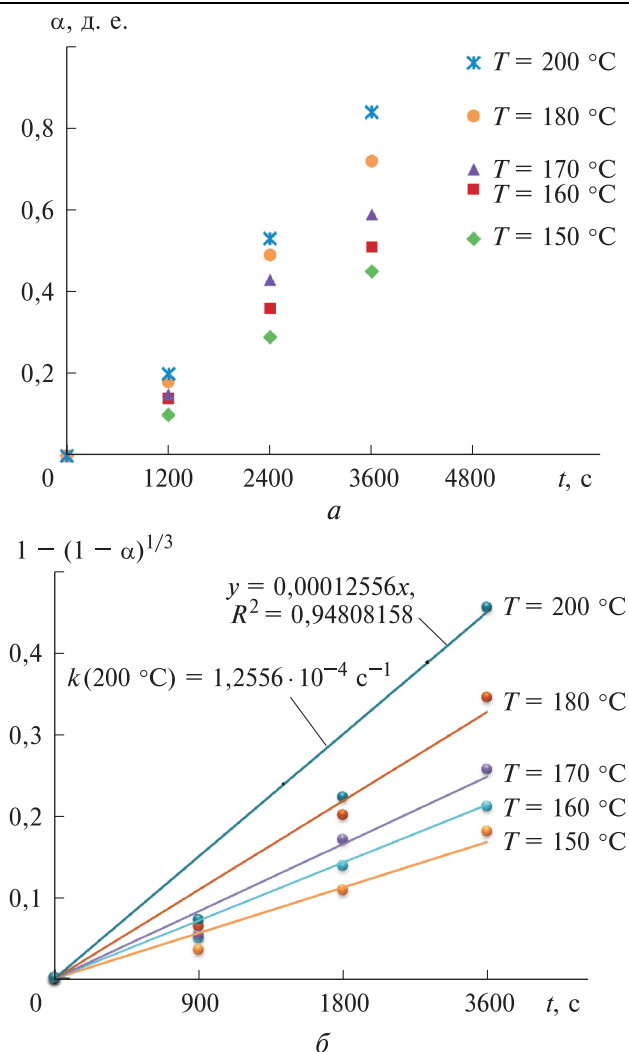


Рис. 3. Зависимость $\alpha(t)$ (а) и результаты графического расчета констант скорости $k(T)$ (б) процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ при различных температурах

Значения степени превращения α и константы скорости k в интервале температур 150...200 °C

t , мин	T , °C				
	150	160	170	180	200
	α , д.е.				
20	0,10	0,14	0,15	0,18	0,20
40	0,29	0,36	0,43	0,49	0,53
60	0,45	0,51	0,59	0,72	0,84
80	0,53	0,65	0,70	0,83	0,96
	$k \cdot 10^4$, c^{-1}				
—	0,4673	0,5948	0,6911	0,9132	1,2556

Для определения энергии активации E_a процесса получения нанопорошка Co_3O_4 термическим разложением нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях были построены графики зависимости логарифма константы скорости от обратной температуры (рис. 4) по уравнению Аррениуса (5).

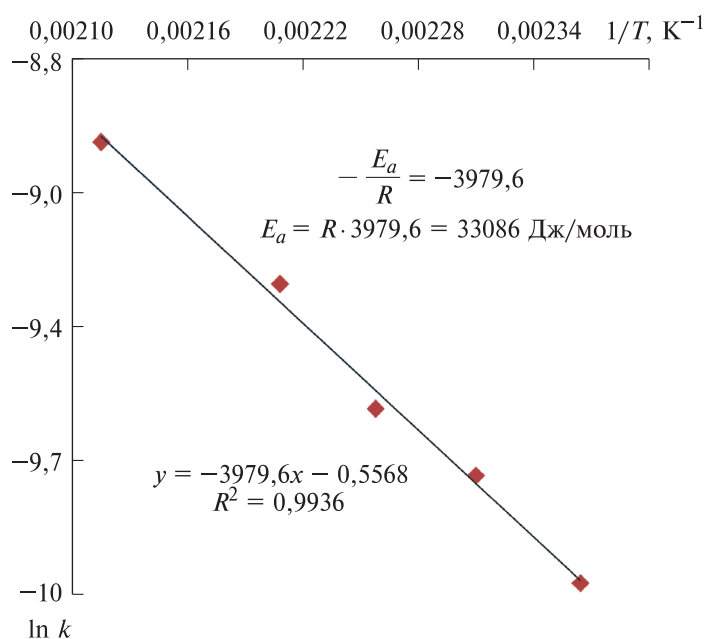


Рис. 4. Результаты расчета энергии активации в координатах уравнения Аррениуса

Значение E_a процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$, рассчитанное по данным рис. 4, составило ~ 33 кДж/моль. Сравнение этого значения с предельными значениями, приведенными в работе [15], подтверждает, что процесс протекает в смешанном режиме реагирования. В этом случае кинетика общего процесса термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ лимитируется как кинетикой химической реакции, так и кинетикой диффузии, соответственно; целесообразным путем ускорения процесса является повышение температуры либо устранение диффузионного слоя продукта термического разложения путем интенсивного перемешивания.

Тем не менее термическое разложение при высоких температурах может приводить к интенсивному протеканию процессов агрегирования и спекания образуемых частиц, что ухудшает качество продукта — нанопорошка Co_3O_4 . Поэтому для проведения процесса выбрана температура, соответствующая максимальной удельной скорости термического разложения ($T = 180$ °С), как указано на ТГ-данных (см. рис. 2).

Рассмотрим результаты исследования свойств полученного нанопорошка в процессе термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ при $180\text{ }^\circ\text{C}$ и времени выдержки 2 ч (рис. 5).

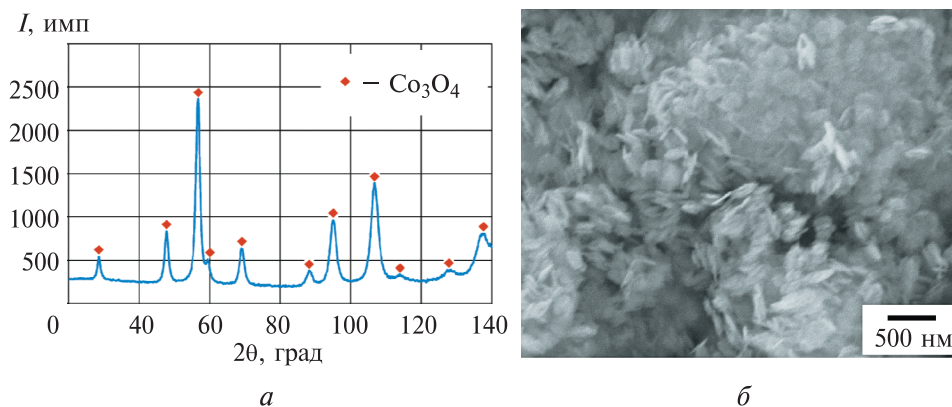


Рис. 5. Рентгенограмма (а) и СЭМ-изображение (б) продукта термического разложения нанопорошка гидроксида $\text{Co}(\text{OH})_2$ при $180\text{ }^\circ\text{C}$

Согласно результатам РФА продукта термического разложения (рис. 5, а), образец содержит только кристаллическую фазу Co_3O_4 , других фаз не обнаружено, т. е. полученный продукт представляет собой нанопорошок чистого Co_3O_4 , термическое разложение нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ при $180\text{ }^\circ\text{C}$ было полным после 2 ч выдержки.

Анализ СЭМ-изображения (рис. 5, б) показал, что нанопорошок Co_3O_4 в основном состоит из агрегатов вытянутой овоидной и игольчатой формы, длина которых достигает 200 нм.

Удельная поверхность $S_{\text{уд}}$ нанопорошка Co_3O_4 составила $28,2\text{ м}^2/\text{г}$, что соответствует среднему размеру наночастиц $D_{\text{ср}} = 47\text{ нм}$. Результаты измерения $S_{\text{уд}}$ подтверждают, что процессы спекания и агрегирования образованных при термическом разложении наночастиц приводят к уменьшению $S_{\text{уд}}$ полученного продукта (нанопорошок Co_3O_4) по сравнению с исходным образцом нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ (от $31,7$ у нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ до $28,2\text{ м}^2/\text{г}$ у нанопорошка Co_3O_4).

Заключение. Изучены кинетические параметры процесса получения нанопорошка Co_3O_4 термическим разложением нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ в изотермических условиях при изменении температуры от 150 до $200\text{ }^\circ\text{C}$. Установлено, что константа скорости процесса при $200\text{ }^\circ\text{C}$ примерно в 2,7 раза больше, чем в случае проведения процесса при $150\text{ }^\circ\text{C}$; соответственно за 80 мин термического разложения процесс ускоряется в 1,8 раза.

Энергия активации термического разложения нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ составила $\sim 33\text{ кДж/моль}$, что свидетельствует о смешанном режиме реагирования. В данном случае кинетика общего процесса

лимитируется как кинетикой химической реакции, так и кинетикой диффузии, соответственно, целесообразным путем ускорения процесса является повышение температуры либо устранение диффузионного слоя продукта термического разложения за счет интенсивного перемешивания.

Показано, что наночастицы Co_3O_4 , полученные термическим разложением нанопорошка $\text{Co}(\text{OH})_2$ при $180\text{ }^\circ\text{C}$, в основном состоят из агрегатов вытянутой овоидной и игольчатой формы со средним размером частиц 47 нм , длина которых достигает 200 нм .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Syam Sundar L., Singh Manoj K., Antonio Pereira M.B., Antonio Sousa C.M. The Cobalt Oxide-Based Composite Nanomaterial Synthesis and Its Biomedical and Engineering Applications. *Cobalt Compounds and Applications*, 2019, pp. 1–19. DOI: 10.5772/intechopen.88272
- [2] Hafeez M., Shaheen R., Akram B., et al. Green synthesis of cobalt oxide nanoparticles for potential biological applications. *Mater. Res. Express*, 2020, vol. 7, no. 2, art. 025019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab70dd
- [3] Bhushan B. *Springer Handbook of Nanotechnology*. 4th edition. Berlin, Springer-Verlag Heidelberg, 2017, 1500 p.
- [4] Dahman Y. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*. 1st edition. Elsevier, Health Sciences Division, 2017, 282 p.
- [5] Adekunle A.S., John Oyekunle A.O., Durosinmi L.M., et al. Potential of cobalt and cobalt oxide nanoparticles as nanocatalyst towards dyes degradation in wastewater. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2020, vol. 21, art. 100405. DOI: 10.1016/j.nanoso.2019.100405
- [6] Ghaem E.N., Dorrastian D., Sari A.H. Characterization of cobalt oxide nanoparticles produced by laser ablation method: Effects of laser fluence. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, vol. 115, art. 113670. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113670
- [7] Shatrova N., Yudin A., Levina V., Novakova V., Dzidziguri E., Kuznetsov D., Perov N., Issi J. Characteristics of Co_3O_4 and cobalt nanostructured microspheres: Morphology, structure, reduction process, and magnetic properties. *Materials Research Bulletin*, 2018, vol. 99, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.materresbull.2017.11.017
- [8] Новакова А., Должикова А.В., Шатрова Н.В., Левина В.В. Структура частиц металлического кобальта, формирующихся при восстановлении микросфер Co_3O_4 , полученных методом пиролиза ультразвуковых аэрозолей. *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2017, № 4, с. 22–26.
- [9] Нгуен В.М., Конюхов Ю.В., Рыжонков Д.И. Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом. *Известия вузов. Черная металлургия*, 2018, т. 61, № 2, с. 96–101. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-96-101
- [10] Ryzhonkov D.I., Konyukhov Y.V., Nguyen V.M. Kinetic regularities and mechanisms of hydrogen reduction of nanosized oxide materials in thin layers. *Nanotechnologies in Russia*, 2017, vol. 12, no. 11-12, pp. 620–626. DOI: 10.1134/S1995078017060076

- [11] Рыжонков Д.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. *Теория металлургических процессов*. Москва, Металлургия, 1989, 392 с.
- [12] Нгуен Т.Х., Нгуен В.М. Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2020, № 1, с. 22–28. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-22-28
- [13] Конюхов Ю.В., Нгуен В.М., Рыжонков Д.И. Кинетические закономерности процессов водородного восстановления нанопорошка $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ при энергомеханической обработке в электромагнитном поле. *Физика и химия обработки материалов*, 2018, № 1, с. 66–74.
- [14] Колпакова Н.А., Романенко С.В., Колпаков В.А. *Сборник задач по химической кинетике*. Томск, Издательство ТПУ, 2008, 280 с.
- [15] Schmalzried H. *Chemical Kinetics of Solids*. Weinheim, VCH, 1995, 433 p.

Статья поступила в редакцию 08.09.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Нгуен Т.Х. Кинетические параметры процесса термического разложения нанопорошка гидроксида кобальта при изотермических условиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-11-2035>

Тиен Хиен Нгуен — аспирант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Область научных интересов: нанотехнологии и наноматериалы (в металлургии). e-mail: htnru7@yandex.ru

Kinetic parameters of the thermal decomposition of cobalt hydroxide nanopowder under isothermal conditions

© T.H. Nguyen^{1,2}

¹ National University of Science and Technology “MISiS”,
Moscow, 119049, Russia

²Le Quy Don Technical University, Hanoi, 100000, Vietnam

The paper focuses on the kinetic parameters of synthesizing Co₃O₄ nano-powder by thermal decomposition of hydroxide Co(OH)₂ under isothermal conditions. The thermal decomposition of Co(OH)₂ nano-powder under isothermal conditions was carried out in a tube furnace in the temperature range from 150 to 200 °C. Findings of research show that the thermal decomposition rate constant at 200 °C is approximately 2.7 times higher than that at 150 °C. Accordingly, for 80 min of thermal decomposition, the process accelerates 1.8 times. The activation energy of this process is approximately 33 kJ/mol, which indicates a mixed reaction mode. The study shows that Co₃O₄ nanoparticles obtained at the temperature of the maximum thermal decomposition rate, i.e. 180 °C, mainly consist of elongated ovoid and acicular aggregates with an average particle value of 47 nm and the length of up to 200 nm.

Keywords: kinetics, nano-powder, cobalt oxide, thermal decomposition, isothermal conditions

REFERENCES

- [1] Syam Sundar L., Singh Manoj K., Antonio Pereira M.B., Antonio Sousa C.M. The Cobalt Oxide-Based Composite Nanomaterial Synthesis and Its Biomedical and Engineering Applications. *Cobalt Compounds and Applications*, 2019, pp. 1–19. DOI: 10.5772/intechopen.88272
- [2] Hafeez M., Shaheen R., Akram B., et al. Green synthesis of cobalt oxide nanoparticles for potential biological applications. *Mater. Res. Express*, 2020, vol. 7, no. 2, 025019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab70dd
- [3] Bhushan B. *Springer Handbook of Nanotechnology*. 4th edition. Berlin, Springer-Verlag Heidelberg, 2017, 1500 p.
- [4] Dahman Y. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*. 1st edition. Elsevier, Health Sciences Division, 2017, 282 p.
- [5] Adekunle A.S., John Oyekunle A.O., Durosinmi L.M., et al. Potential of cobalt and cobalt oxide nanoparticles as nanocatalyst towards dyes degradation in wastewater. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2020, vol. 21, art. 100405. DOI: 10.1016/j.nanoso.2019.100405
- [6] Ghaem E.N., Dorranean D., Sari A.H. Characterization of cobalt oxide nanoparticles produced by laser ablation method: Effects of laser fluence. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, vol. 115, art. 113670. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113670
- [7] Shatrova N., Yudin A., Levina V., Novakova V., Dzidziguri E., Kuznetsov D., Perov N., Issi J. Characteristics of Co₃O₄ and cobalt nanostructured microspheres: Morphology, structure, reduction process, and magnetic properties. *Materials Research Bulletin*, 2018, vol. 99, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.materresbull.2017.11.017
- [8] Novakova A., Dolzhikova A.V., Shatrova N.V., Levina V.V. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiia — Moscow University Physics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 22–26.

- [9] Nguyen V.M., Konyukhov Yu.V., Ryzhonkov D.I. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya — Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 96–101. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-96-101
- [10] Ryzhonkov D.I., Konyukhov Y.V., Nguyen V.M. Kinetic regularities and mechanisms of hydrogen reduction of nanosized oxide materials in thin layers. *Nanotechnologies in Russia*, 2017, vol. 12, no. 11-12, pp. 620–626. DOI: 10.1134/S1995078017060076
- [11] Ryzhonkov D.I., Arsentev P.P., Yakovlev V.V. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, 392 p.
- [12] Nguyen T.H., Nguyen V.M. *Izv. vuzov. Poroshkovaia metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya — Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2020, no. 1, pp. 22–28. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-22-28
- [13] Konyukhov Yu.V., Nguyen V.M., Ryzhonkov D.I. *Fizika i khimiia obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2018, no. 1, pp. 66–74.
- [14] Kolpakova N.A., Romanenko S.V., Kolpakov V.A. *Sbornik zadach po khimicheskoy kinetike* [Collection of problems in chemical kinetics]. Tomsk, TPU Publ., 2008, 280 p.
- [15] Schmalzried H. *Chemical Kinetics of Solids*. Weinheim, VCH, 1995, 433 p.

Tien Hiep Nguyen, post-graduate student, Department of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, National University of Science and Technology “MISIS”. Research interests: nanotechnology and nanomaterials (in metallurgy). e-mail: httru7@yandex.ru