

УДК 669.243.44

Нгуен Т.Х., Нгуен В.М., Введенская И.А.

**КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКА ОКСИДА НИКЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ**

**Аннотация.** Проведено исследование кинетики процесса получения нанопорошка оксида никеля термическим разложением его гидроксида в различных средах (неподвижный слой, неподвижный слой с магнитным полем и вихревой слой) при температурах от 220 до 280°C. Нанопорошок Ni(OH)<sub>2</sub> заранее получали химическим осаждением из водного раствора нитрата никеля (10 мас. %) и щелочи NaOH (10 мас. %) при комнатной температуре, pH=9. Исследование кристаллической структуры и состава образцов выполняли методом рентгенофазового анализа. Удельная поверхность S<sub>уд</sub> порошков измеряли методом БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота. Размер и морфологию частиц изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что магнитное поле фактически не влияет на скорость процесса термического разложения. Показано, что процесс термического разложения в вихревом слое протекает гораздо интенсивнее, чем в неподвижных (5–10 раз). Наночастицы NiO, полученные термическим разложением гидроксида никеля при температуре 280°C в различных средах, имеют разные размер и морфологию. Выявлено, что термическое разложение в магнитном поле способствует округлению границ наночастиц, а вихревой слой активизирует процесс их коагуляции.

**Ключевые слова:** кинетика, гидроксид никеля, оксид никеля, термическое разложение, наночастица, нанопорошок, неподвижный слой, вихревой слой, магнитное поле, энергия активации.

**Введение**

В настоящее время нанопорошки (НП) оксидов металлов, в том числе НП NiO, нашли широкое применение в различных областях науки, техники и промышленности. Например, НП NiO используются в качестве модифицирующих добавок, улучшения стойкости лакокрасочных материалов и сплавов, высокочувствительных катализаторов, высокоактивных адсорбентов, электродных материалов в литий-ионных аккумуляторах, высокоэффективных оптоэлектронных материалов, для производства химико-фармацевтических препаратов, используемых в медицине, и др. [1-6]. Кроме этого, НП NiO можно использовать как сырьевые ресурсы для синтеза НП металлического никеля путем восстановления и других способов [7, 8]. Однако стоимость НП, включая НП NiO, еще высока, поэтому исследование и разработка новых методов для синтеза НП является технологически и экономически эффективной задачей [9].

Получение НП NiO проводится различными механическими и физико-химическими методами, большинство которых характеризуется высокими энергозатратами, пониженной производительностью. Химико-металлургический метод, заключающийся в химическом осаждении кислородсодержащих соединений металлов с последующим термическим разложением или восстановлением гидроксидов металлов, обладает рядом преимуществ, таких как низкие затраты, экологическая чистота, возможность контролировать свойства продуктов в ходе их получения [10-18].

Наиболее затратной стадией процесса является термическое разложение из-за необходимости поддерживать заданную температуру в течение протекания реакций. Таким образом, поиск путей интенсифи-

каций процессов термического разложения является важной научно-технической задачей.

Были найдены некоторые конструктивные и технологические решения, такие как создание псевдокипящего слоя, предварительная механохимическая активация исходного сырья и т.д. Тем не менее еще остается ряд нерешенных вопросов и пространство для дальнейшего изучения и развития этого направления. В последнее время одним из методов интенсификации технологических процессов является обработка материалов в аппарате с вихревым слоем ферромагнитных частиц, создаваемым путем воздействия на них вращательного магнитного поля [19]. В связи с вышеизложенным в качестве целей работы были выбраны исследование и сравнение кинетических закономерностей процесса термического разложения НП Ni(OH)<sub>2</sub> в различных средах для поиска путей увеличения скорости и сокращения времени процесса термического разложения.

**Материал и методики эксперимента**

Для исследования процессов термического разложения был получен нанопорошок гидроксида никеля, синтезированного химическим осаждением из водных растворов нитрата никеля Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (10 мас. %) и щелочи NaOH (10 мас. %) при комнатной температуре, pH=9, и непрерывном перемешивании. Получение гидроксида никеля проходит по реакции:



Контроль pH осуществляли pH-метром марки «Эксперт 001», погрешность измерений составляла ±0,03. С помощью центрифуги полученный осадок Ni(OH)<sub>2</sub> промывали до полной отмывки ионов растворенной соли, которую контролировали по pH раствора над осадком. Затем осадок сушили при комнатной температуре в течение двух суток. После этого

высушенный  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  измельчали в специальной мельнице «Fritsch Pulverisette 2».

Эксперименты исследования влияния магнитного поля и эффекта механоактивации на кинетику процессов термического разложения НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  проводились в аппарате вихревого слоя (АВС) модели УАП-3 с монтированными нагревательным модулем и проточным реактором. Основные компоненты аппарата УАП-3 представляют собой магнитные индукторы, позволяющие создавать высокоэнергетическое магнитное поле, контур водяного охлаждения и проточный реактор из нержавеющей стали (диаметр 45 мм, длина 350 мм) (рис. 1).

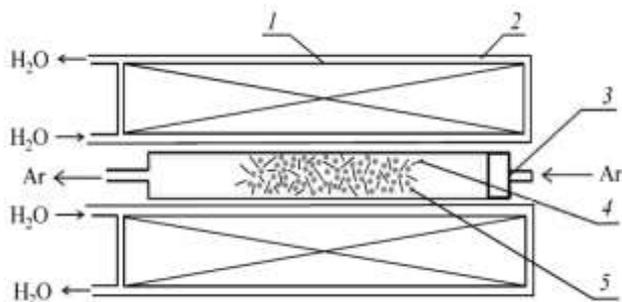


Рис. 1. Схема аппарата вихревого слоя УАП-3:  
1 – катушка; 2 – контур водяного охлаждения;  
3 – реактор из нержавеющей стали;  
4 – ферромагнитные иглы; 5 – обрабатываемый материал

В качестве ферромагнитных частиц, создающих вихревой слой, были использованы износостойкие стальные иглы длиной 15–20 мм, диаметром 0,6–1,2 мм. Масса обрабатываемого материала при одной загрузке составляла 15–20 г, а соотношение массы стальных иглолок к массе порошковой шихты при этом составляло 4:1.

Принцип работы, заложенный в АВС, основан на одновременном воздействии на обрабатываемые материалы вращающегося магнитного поля высокой мощности и механического воздействия рабочих тел (иглолок), находящихся в камере реактора с обрабатываемыми материалами и вращающихся под воздействием этого поля. В рабочей зоне, в единице ее объема сконцентрирована огромная энергия, непосредственно воздействующая на вещество. Под действием поля и рабочих тел любые вещества в рабочей зоне установки очень быстро перемешиваются, измельчаются и приобретают высокую химическую активность (ионизируются), в результате чего происходят глубокие изменения в строении веществ и активация взаимодействующих компонентов независимо от того, в каком виде они находятся: газообразном, жидком или твердом.

Температуру термического разложения выбирали на основе данных термогравиметрического анализа (ТГА) в работе [20]. В ходе процесса протекала следующая реакция:



Фазовый состав порошковых образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре «Дифрей-401» (Россия) ( $\text{CrK}_\alpha$ -излучение) при комнатной температуре.

Величину удельной поверхности  $S_{\text{уд}}$  образцов измеряли методом БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе NOVA 1200e (США). Точность измерения составляет  $\pm 5\%$ . Средний размер частиц порошков вычисляли по данным измерений величины  $S_{\text{уд}}$ , используя формулу

$$D_{\text{ср}} = \frac{6}{\rho \cdot S_{\text{уд}}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – пикнометрическая плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $S_{\text{уд}}$  – удельная поверхность,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $D_{\text{ср}}$  – средний размер частиц, м.

Размерные характеристики и морфологию полученных НЧ порошков исследовали методом электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM 6700F (Япония).

Расчет степени превращения  $\alpha$ , дол. ед. (отношение количества реагента, который вступил в реакцию, к его исходному количеству) проводили по формуле

$$\alpha = \frac{m_t}{m_0}, \quad (4)$$

где  $m_0$  и  $m_t$  – начальная и реагирующая масса  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  через время  $t$ , г.

Для неизотермического условия расчет энергии активации процесса термического разложения проводили дифференциально-разностным методом, используя данные термогравиметрического анализа и уравнения неизотермической кинетики [21].

Дифференциальная разность может быть записана как

$$\frac{\Delta \ln \left( b \cdot \frac{d\alpha}{dT} \right)}{\Delta \ln(1-\alpha)} = n - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{\Delta \frac{1}{T}}{\Delta \ln(1-\alpha)}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – степень превращения, дол. ед.;  $T$  – температура, К;  $b$  – скорость нагрева, К/с;  $E_a$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $n$  – порядок реакции.

В координатах  $X$  и  $Y$  наклон отрезка пропорционален величине энергии активации, а его пересечение с осью ординат дает значение  $n$ .

Константы скорости протекания реакций были рассчитаны по кинетическому уравнению, соответствующему модели Мак Кевана [22]:

$$D_{\text{ср}} \cdot d_0 \cdot [1 - (1-\alpha)^{1/3}] = k \cdot t, \quad (6)$$

где  $D_{\text{ср}}$  – средний размер частиц, м;  $d_0$  – доля кислорода в оксиде;  $\alpha$  – степень превращения, дол. ед.,  $k$  – кон-

станта скорости химической реакции, м/с;  $t$  – время, с.

### Результаты исследования и их обсуждение

Структура и морфология исходного материала НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  для получения НП  $\text{NiO}$  термическим разложением показаны на рис. 2.

Рентгенофазовый анализ (рис. 2, а) показал, что исходный образец содержит чисто кристаллическую гидроксидную фазу  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ , других фаз не обнаружено. Из рис. 2, б видно, что НЧ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  образуют хлопья. Значение удельной поверхности НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  составило  $38,6 \text{ м}^2/\text{г}$ , что соответствует величине среднего размера частиц  $\sim 38 \text{ нм}$ .

Для изучения влияния магнитного поля и эффекта механоактивации в АВС на кинетику процесса термического разложения НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  эксперименты были проведены при температурах  $T_1=220^\circ\text{C}$ ,

$T_2=250^\circ\text{C}$  и  $T_3=280^\circ\text{C}$ . Эти температуры находятся в интервале интенсивного протекания процесса термического разложения, которые показали в работе [20].

Опыты проводились в неподвижном слое, в слое с наложением вращающегося магнитного поля и в вихревом слое с механической активацией.

На рис. 3 представлены кинетические кривые термического разложения НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  в различных экспериментальных условиях.

Видно, что при  $220^\circ\text{C}$  (рис. 3, а) процесс термического разложения в неподвижном слое и в слое с наложением магнитного поля идет очень медленно. Однако под действием эффекта механоактивации в вихревом слое процесс термического разложения протекает с заметной скоростью и практически заканчивается после полутора часов выдержки.

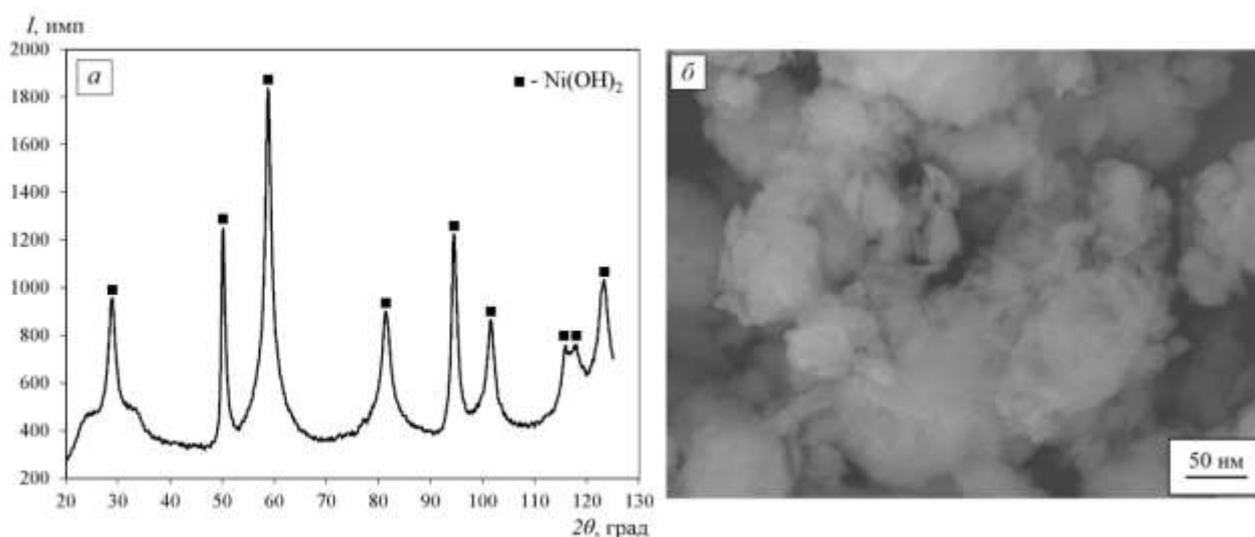


Рис. 2. Рентгенограмма (а) и СЭМ-изображение (б) исходного образца НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$

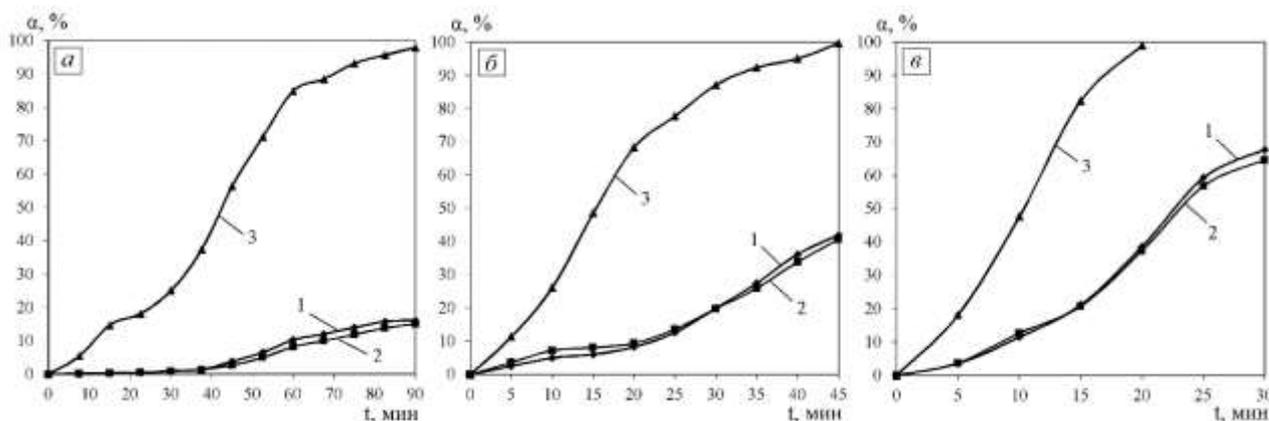


Рис. 3. Временные зависимости степени превращения при термическом разложении НП  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ :

а – при  $220^\circ\text{C}$ ; б – при  $250^\circ\text{C}$ , в – при  $280^\circ\text{C}$ ;

1 – неподвижный слой; 2 – неподвижный слой с магнитным полем; 3 – вихревой слой

При 250°C (рис. 3, б) степень превращения в неподвижных слоях с полем и без поля повышается, но, по-прежнему значительно меньше, чем в вихревом слое с механоактивацией. При этом процесс термического разложения в вихревом слое заканчивается после 45 мин обработки. Для образцов в неподвижных слоях на их кинетических кривых сначала идет инкубационный период, когда только-только начинается зарождение новой фазы, затем перегиб, отвечающий кинетическому режиму процесса, при котором протекает химическая реакция на поверхности неподвижного слоя гидроксида, при этом процесс еще не переходит в диффузионную область реагирования.

И наконец, при 280°C (рис. 3, в) процесс термического разложения во всех слоях значительно ускоряется, особенно в вихревом слое: процесс идет до конца только за 20 минут. Степень превращения в неподвижных слоях достигает 60–70% после 30 мин выдержки. Надо отметить, что магнитное поле практически не влияет на скорость процесса.

Рассчитанные энергии активации и константы скорости процесса термического разложения НП Ni(OH)<sub>2</sub> по уравнениям (5) и (6) соответственно приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет константы скорости и энергии активации процесса термического разложения

Вид слоя	Температура, °C			$E_a$ , кДж/моль
	220	250	280	
	$k \cdot 10^{11}$ , м/с			
Неподвижный слой	0,11	0,36	0,59	38
Неподвижный слой с магнитным полем	0,12	0,38	0,60	44
Вихревой слой	0,52	1,65	6,32	68

Анализ расчетных данных показал, что скорость процесса термического разложения в вихревом слое гораздо выше, чем в неподвижных слоях, примерно в 5-10 раз.

Расчетные данные энергии активации термического разложения в различных слоях также согласуются с теоретическим предположением: в вихревом слое за счет интенсивного перемешивания удаляется диффузионный слой и процесс протекает в кинетической области реагирования, поэтому скорость процесса больше зависит от температуры (т.е. при малом изменении температуры константа скорости  $k$  изменяется на большую величину), значит, энергия активации процесса в вихревом слое больше, чем в неподвижных.

На рис. 4 представлены рентгенограммы промежуточных и конечных продуктов термического разложения НП Ni(OH)<sub>2</sub>. В левой части рисунка представлены рентгенограммы промежуточных образцов, в правой – рентгенограммы конечных продуктов. Для исследования промежуточные образцы были взяты после 25 мин выдержки в неподвижных слоях, а в вихревом слое – 5 мин при  $T = 280^\circ\text{C}$ .

Расчет рентгенограмм показывает, что в образцах, полученных после 25 мин выдержки в неподвижных слоях без поля и с полем (рис. 4, а и в), в равной мере присутствуют как исходный материал – НП Ni(OH)<sub>2</sub>, так и продукт термического разложения – НП NiO. После 1 ч выдержки в поле и без поля Ni(OH)<sub>2</sub> разлагается полностью (рис. 4, б и г).

Из рентгенограммы на рис. 4, д видно, что при проведении процесса термического разложения в вихревом слое за 5 мин уже образовано значительное количество NiO. Разложение НП Ni(OH)<sub>2</sub> в вихревом слое полностью заканчивается после 20 мин обработки (рис. 4, е).

Количественный фазовый анализ был проведен путем расчета рентгенограмм с помощью программ «OUTSET» и «PHAN». Результат количественного фазового анализа показан в табл. 2.

Таблица 2

Результат количественного фазового анализа продуктов процесса

Образец	Количество фазы, ат. %	
	NiO	Ni(OH) <sub>2</sub>
Неподвижный слой, 25 мин	52	48
Неподвижный слой, 1 ч	100	0
Неподвижный слой с магнитным полем, 25 мин	56	44
Неподвижный слой с магнитным полем, 1 ч	100	0
Вихревой слой, 5 мин	27	73
Вихревой слой, 20 мин	100	0

Результат измерения удельной поверхности  $S_{уд}$  и среднего размера  $D_{ср}$  частиц исходного материала и продуктов термического разложения представлен в табл. 3. Видно, что при обработке во всех слоях  $S_{уд}$  полученных продуктов термического разложения растет со временем и значительно выше, чем у исходного образца. Это объясняется тем, что в ходе разложения испаряющаяся вода освобождает поры частиц и образуется мелкодисперсный NiO.

Таблица 3

Результат удельной поверхности исходного образца и продуктов процесса

Образец	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	$D_{ср}$ , нм
Исходный Ni(OH) <sub>2</sub>	68,8	21,4
Неподвижный слой, 25 мин	112,1	9,8
Неподвижный слой, 1 ч	149,5	6
Неподвижный слой с магнитным полем, 25 мин	106,3	10,2
Неподвижный слой с магнитным полем, 1 ч	139	6,5
Вихревой слой, 5 мин	96,2	13,0
Вихревой слой, 20 мин	35,6	25,3

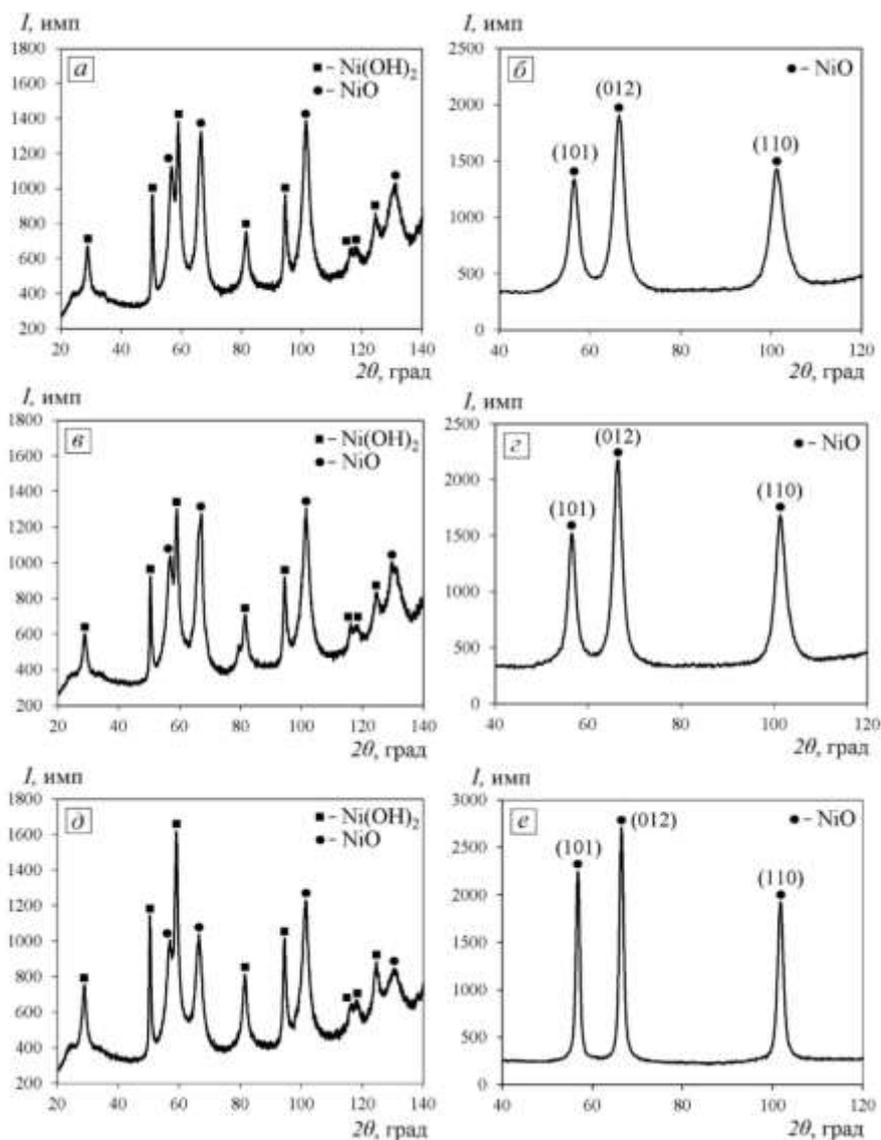


Рис. 4. Рентгенограммы продуктов процесса:

а, б – образцы, полученные в неподвижном слое; в, г – образцы, полученные в неподвижном слое с магнитным полем; д, е – образцы, полученные в вихревом слое

При сравнении данных различных образцов установлено, что  $S_{уд}$  образцов, полученных в неподвижном слое без поля, выше, чем у образцов, полученных в магнитном поле. Обработка в вихревом слое сначала также приводит к повышению  $S_{уд}$  по сравнению с исходным образцом, но затем она падает.

Расчет среднего размера частиц по формуле (3) показал, что самые мелкодисперсные частицы получились в неподвижном слое без поля, их средний размер составил 9,8 и 6,0 нм за 25 мин и 1 ч обработки соответственно. За такое же количество времени в магнитном поле он составил 10,2 и 6,5 нм. При обработке в вихревом слое средний размер частиц конечного продукта термического разложения равен 25,3 нм.

На рис. 5 представлены электронные микрофотографии продуктов термического разложения – НЧ NiO, полученных в различных слоях при 280°C.

Анализ микрофотографий (рис. 5, а) показал, что НЧ NiO, полученные в неподвижном слое без наложения поля, находятся в плотном контакте друг с другом и представляют собой пластинки неправильной формы, характерные размеры которых составляют от 30 до 100 нм.

Из микрофотографии образца, обработанного в магнитном поле (рис. 5, б), видно, что НЧ выглядят как тонкие плоские диски, которые собраны в крупные агрегаты. Размеры дисков колеблются от сорока до сотен нм, а их толщина не превышает 20 нм.

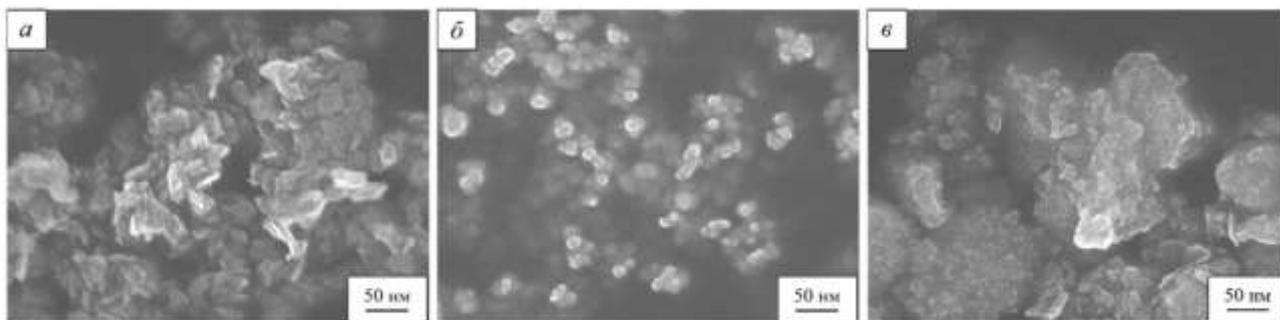


Рис. 5. СЭМ-микрофотографии конечных продуктов термического разложения при 280°C: а – образец, полученный в неподвижном слое; б – полученный в неподвижном слое с магнитным полем; в – полученный в вихревом слое

Обработка образца в вихревом слое (рис. 5, в) приводит к флокуляции материала, формируя большие круглые пластинки размером до 1 мкм, на поверхности которых размещены мелкодисперсные частицы размером порядка несколько нм.

Таким образом, при термическом разложении магнитное поле, немного увеличивая средний размер частиц, способствует округлению их границ. Вихревое поле активирует процесс коагуляции НЧ. Это подтверждают данные по измерению удельной поверхности, которая максимальна у образца, полученного в неподвижном слое без поля, чуть меньше у образца, полученного в магнитном поле, и в несколько раз меньше у образца, полученного в вихревом слое.

### Заключение

Исследованы кинетические закономерности процесса термического разложения НЧ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  в аппарате с вихревым слоем. Установлено, что магнитное поле фактически не влияет на скорость процесса термического разложения.

Показано, что процессы в вихревом слое протекают гораздо интенсивнее, чем в неподвижных (в 5–10 раз).

Выявлено, что при термическом разложении магнитное поле способствует округлению границ наночастиц, а вихревой слой активирует процесс их коагуляции.

### Список литературы

- Bhushan B. (Ed.). Springer Handbook of Nanotechnology. 4th edition. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg. 2017. 1500 p.
- Dahman Y. Nanotechnology and Functional Materials for Engineers. 1st Edition. Elsevier: Health Sciences Division. 2017. 282 p.
- Garba D.S., Abubakar Y., Suleiman S. Nickel Oxide (NiO) Devices and Applications: A Review // International Journal of Engineering and Technical Research. 2019. Vol. 8(4). P. 461-467.
- El-Kemary M., Nagy N., El-Mehasseb I. Nickel oxide nanoparticles: Synthesis and spectral studies of interactions with glucose // Materials Science in Semiconductor Processing. 2013. Vol. 16. P. 1747-1752.
- Ruscello M., Sarkar T., Levitsky A. Nanocomposite of nickel oxide nanoparticles and polyethylene oxide as printable hole transport layer for organic solar cells // Sustainable Energy & Fuels. 2019. Vol. 3. P. 1418-1426.
- Sun D.L., Zhao B.W., Liu J.B., Wang H., Yan H. Application of nickel oxide nanoparticles in electrochromic materials // Ionics. 2017. Vol. 23. P. 1509-1515.
- Изучение факторов, влияющих на процесс восстановления NiO / О.В. Большакова, М.Н. Нафталь, Н.В. Белюсова, Е.В. Салимжанова // Цветные металлы. 2018. № 6. С. 71-77.
- Волков Л.В., Калашникова М.И. Механизм растворения оксидов никеля растворами серной кислоты в окислительных условиях // Цветные металлы. 2011. № 8-9. С. 101-104.
- Gkika D.A., Vordos N., Nolan J.W., Mitropoulos A.C., Vansant E.F., Cool P., Braet J. Price tag in nanomaterials? // Journal of Nanoparticle Research. 2017. Vol. 19. 177.
- 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.
- Предельная степень использования водорода в реакциях восстановления железа из оксидов / В.М. Колокольцев, В.А. Бигеев, С.К. Сибгатуллин, А.А. Бородин // Теория и технология металлургического производства. 2010. № 10. С. 4-11.
- 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.
- Анализ особенностей применения порошковых покрытий на основе никеля при восстановлении автомобильных деталей / С.В. Зотов, А.С. Лимарев, И.Ю. Мезин, И.Г. Гун, И.В. Понурко // Теория и технология металлургического производства. 2020. Т. 32. № 1. С. 50-54.
- Ryzhonkov D.I., Konyukhov Yu.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. P. 620-626.
- Махоткина Е.С., Шубина М.В. Шлаки процесса прямого восстановления железа как источник получения ванадия и титана // Теория и технология металлургического производства. 2015. Т. 17. № 2. С. 60-65.

16. Свойства наноразмерных порошков железа, полученных химико-металлургическим методом с применением поверхностно-активных веществ / Ю.В. Конюхов, В.В. Левина, Д.И. Рыжонков, И.И. Пузик // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 5-6. С. 158-163.
17. Магнитные свойства нанопорошков Fe, Co, Ni, полученных химико-металлургическим методом / Т.Х. Нгуен, Ю.В. Конюхов, В.М. Нгуен, В.В. Левина, Д.Ю. Карпенков // XXII Международная конференция по постоянным магнитам, Суздаль, 23-27 сентября 2019 г.: сб. тезисов. М., 2019. С. 104–105.
18. 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. No. 2. С. 96-101.
19. Вершинин Н.П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология. Ростов-на-Дону, 2004. 314 с.
20. Конюхов Ю.В. Разработка научно-технологических основ получения нанопорошков из техногенного сырья и модифицирования материалов с применением энергомеханической обработки: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИСиС. 2018. 303 с.
21. Рыжонков Д.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989. 392 с.
22. McKewan W.M. Kinetics of iron oxide reduction // Trans. Met. Soc. AIME. 1960. Vol. 218. P. 2-6.

### Сведения об авторах

**Нгуен Тиен Хиеп** – аспирант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов (ФНСиВТМ), НИТУ «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: [htnru7@yandex.ru](mailto:htnru7@yandex.ru)

**Нгуен Ван Минь** – кандидат технических наук, Технологический институт, Ханой, Вьетнам. E-mail: [chinhnhan88@gmail.com](mailto:chinhnhan88@gmail.com)

**Введенская Ирина Андреевна** – студент-магистр кафедры ФНСиВТМ, НИТУ «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: [vvkrak@yandex.ru](mailto:vvkrak@yandex.ru)

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### KINETICS OF SYNTHESIZING PROCESS OF NICKEL OXIDE NANOPOWDER IN VARIOUS ENVIRONMENTS

**Nguyen Tien Hiep** – postgraduate, Department of Functional Nanosystems & High-Temperature Materials (FHS&HTM), NUST “MISiS”, Moscow, Russia. E-mail: [htnru7@yandex.ru](mailto:htnru7@yandex.ru)

**Nguyen Van Minh** – PhD. Sci. (Eng.), Institute of Technology, Hanoi, Vietnam. E-mail: [chinhnhan88@gmail.com](mailto:chinhnhan88@gmail.com)

**Vvedenskaya Irina A.** – master-student, Department of FHS&HTM, NUST “MISiS”, Moscow, Russia.. E-mail: [vvkrak@yandex.ru](mailto:vvkrak@yandex.ru)

**Abstract.** *The kinetics of synthesizing process of nickel oxide nanopowder by the thermal decomposition of nickel hydroxide in various environments (fixed layer, fixed layer with a magnetic field and vortex layer) at temperatures from 220 to 280°C were studied. Ni(OH)<sub>2</sub> nanopowder was prepared in advance by chemical deposition from an aqueous solution of nickel nitrate (10 wt. %) and alkali NaOH (10 wt. %) at room temperature, pH=9. The crystal structure and composition of the samples were studied by X-ray phase analysis. The specific surface area S of the powders was measured using BET method by low-temperature nitrogen adsorption. The size and morphology of the particles investigated by scanning electron microscope. It is show that the magnetic field does not actually affect the rate of the thermal decomposition process. It is shown that the thermal decomposition process in the vortex layer proceeds much more intensively than in the stationary layer (5–10 times). NiO nanoparticles obtained by thermal decomposition of nickel hydroxide at 280°C in various environments have different sizes and morphologies. It is show that the thermal decomposition in a magnetic field promotes rounding of the boundaries of nanoparticles and the vortex layer activates their coagulation process.*

**Keywords:** *kinetics, nickel hydroxide, nickel oxide, thermal decomposition, nanoparticle, nanopowder, fixed layer, vortex layer, magnetic field, activation energy*

Ссылка на статью:

Нгуен Т.Х., Нгуен В.М., Введенская И.А. Кинетика процесса получения нанопорошка оксида никеля в различных средах // Теория и технология металлургического производства. 2020. №4 (35). С. 10-16.

Nguyen T.H., Nguyen V.M., Vvedenskaya I.A. Kinetics of synthesizing process of nickel oxide nanopowder in various environments. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 35, no. 4, pp. 10-16.