

УДК 544.4:669.245

ДАСЛЕДАВАННЕ ПРАЦЭСА ТЭРМОЛІЗУ НАНАДЫСПЕРСНЫХ ПАРАШКОЎ ГІДРАКСІДА НІКЕЛЯ Ў РОЗНЫХ УМОВАХ

ТИЕН ХІЕП НГУЕН

*Дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт імя Ле Куй Дона,
г. Ханой, В'етнам*

Праведзена вывучэнне кінетыкі працэса тэрмолізу нанадысперсных парашкоў гідраксіда нікеля ў розных умовах (нерухомы пласт, нерухомы пласт з магнітным полем і віхравы пласт) пры тэмпературах ад 220 да 280 °С. Нанопарашок Ni(OH)₂ загодзя атрымлівалі хімічным асаджэннем з воднага раствора нітрата нікеля (10 мас. %) і шчолачы NaOH (10 мас. %) пры пакаёвай тэмпературы, pH = 9. Даследаванне крышталічнай структуры і складу ўзораў выконвалі метадам рэнтгенафазавага аналізу. Удзельная паверхня S_в парашкоў вымяралі метадам Брунаўэра–Эмета–Тэлера (БЭТ) на нізкатэмпературнай адсорбцыі азота. Памер і марфалогію часціц вывучалі метадам сканавальнай электроннай мікраскапіі. Устаноўлена, што магнітнае поле фактычна не ўплывае на хуткасць працэса тэрмолізу. Паказана, што працэс тэрмолізу ў віхравым пласце працякае значна больш інтэнсіўна, чым у нерухомых (у 5–10 разоў). Наначасціцы NiO, атрыманыя тэрмолізам гідраксіда нікеля пры тэмпературы 280 °С у розных асяроддзях, маюць розныя памер і марфалогію. Выяўлена, што тэрмоліз у магнітным полі спрыяе акругленню граніц наначасціц, а віхравы пласт актывуе працэс іх каагуляцыі.

Ключавыя словы: кінетыка, гідраксід нікеля, тэрмоліз, нанадысперсныя парашкі, нерухомы пласт, віхравы пласт, магнітнае поле, энергія актывацыі.

INVESTIGATION OF THE THERMOLYSIS PROCESS OF NANODISPERSED NICKEL HYDROXIDE POWDERS UNDER DIFFERENT CONDITIONS

TIEN HIEP NGUYEN

Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

The study of the kinetics of the process of thermolysis of nanodispersed powders of nickel hydroxide under different conditions (fixed layer, fixed layer with a magnetic field and vortex layer) at temperatures from 220 to 280 °C was carried out. Ni(OH)₂ nanopowder was prepared in advance by the 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 shown that the magnetic field does not actually affect the rate of the thermolysis process. It is shown that the thermolysis process in the vortex layer proceeds much more intensively than in the stationary layer (5–10 times). NiO nanoparticles obtained by the thermolysis of nickel hydroxide at 280 °C in various environments have different sizes and morphologies. It is shown that the thermolysis in a magnetic field promotes rounding of the boundaries of nanoparticles and the vortex layer activates their coagulation process.

Keywords: kinetics, nickel hydroxide, thermolysis, nanodispersed powders, fixed layer, vortex layer, magnetic field, activation energy.

Уводзіны

У цяперашні час нанопарашкі (НП) аксідаў металаў, у тым ліку НП NiO, знайшлі шырокае прымяненне ў розных галінах навукі, тэхнікі і прамысловасці. Напрыклад, НП NiO выкарыстоўваюцца ў якасці мадыфікуючых дабавак, для паляпшэння стойкасці лакафарбавых матэрыялаў і сплаваў, высокаадчувальных каталізатараў,

высокоактивных адсорбентаў, электродных матэрыялаў у літый-іённых акумулятарах, высокаэфективных оптаэлектронных матэрыялаў, для вытворчасці хіміка-фармацэўтычных прэпаратаў, якія выкарыстоўваюцца ў медыцыне і інш. [1–6]. Акрамя гэтага, НП NiO можна выкарыстоўваць як сыравінныя рэсурсы для сінтэзу НП металічнага нікеля шляхам аднаўлення і іншых спосабаў [7, 8]. Аднак кошт НП, уключаючы НП NiO, яшчэ высокі, таму даследаванне і распрацоўка новых метадаў для сінтэзу НП з'яўляецца тэхналагічна і эканамічна эфектыўнай задачай [9].

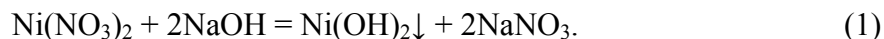
Атрыманне НП NiO праводзіцца рознымі механічнымі і фізіка-хімічнымі метадамі, большасць якіх характарызуецца высокімі энергазатратамі і паніжанай прадукцыйнасцю. Хіміка-металургічны метад, які складаецца ў хімічным асаджэнні кіслародзмяшчальных злучэнняў металаў з наступным тэрмолізам і аднаўленнем, характарызуецца шэрагам пераваг, такіх як нізкія выдаткі, экалагічная чысціня, магчымасць кантраляваць ўласцівасці прадуктаў у ходзе іх атрымання [10–12].

Найбольш затратнай стадыяй працэса з'яўляецца тэрмоліз праз неабходнасць падтрымліваць зададзеную тэмпературу на працягу праходжання рэакцыі. Такім чынам, пошук шляхоў інтэнсіфікацыі працэсаў тэрмолізу з'яўляецца важнай навукова-тэхнічнай задачай.

Былі знойдзеныя некаторыя канструктыўныя і тэхналагічныя рашэнні, такія як стварэнне псеўдакляпчага пласта, папярэдня механахімічная актывацыя зыходнай сыравіны і г. д. Тым не менш яшчэ застаюцца шэраг нявырашаных пытанняў і прастора для далейшага вывучэння і развіцця гэтага кірунку. У апошні час адным з метадаў інтэнсіфікацыі тэхналагічных працэсаў з'яўляецца апрацоўка матэрыялаў у апарце з віхравым пластом ферамагнітных часціц, створаным шляхам уздзеяння на іх ратацыйнага магнітнага поля [12]. У сувязі з вышэйпададзеным у якасці мэтаў работы былі абраныя даследаванне і параўнанне кінэтычных заканамернасцей працэса тэрмолізу НП Ni(OH)₂ у розных асяроддзях для пошуку шляхоў павелічэння хуткасці і скарачэння часу гэтага працэса.

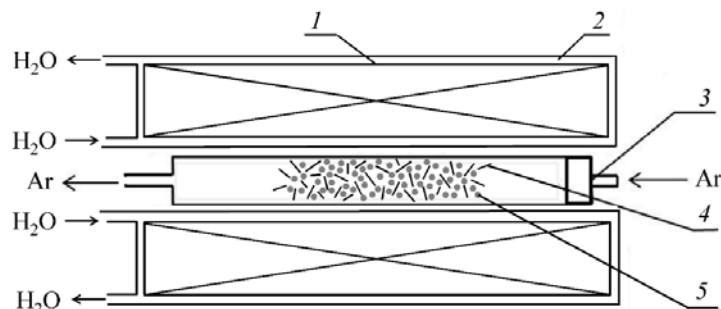
Матэрыял і методыкі эксперыменту

Для даследавання працэса тэрмолізу быў атрыманы НП Ni(OH)₂, сінтэзаваны хімічным асаджэннем з водных раствораў нітрата нікеля Ni(NO₃)₂ (10 мас. %) і шчолачы NaOH (10 мас. %) пры пакаёвай тэмпературы, pH = 9, і бесперапынным мяшанні. Атрыманне гідраксіда нікеля праходзіць паводле рэакцыі



Кантроль pH ажыццяўлялі pH-метрам маркі «Эксперт 001», хібнасць вымярэнняў складала ±0,03. З дапамогай цэнтрафугі атрыманы асадкі Ni(OH)₂ прамывалі да поўнага адмывання іёнаў растваранай солі, якую кантралявалі па pH раствора над асадкам. Затым асадкі сушылі пры пакаёвай тэмпературы на працягу двух сутак. Пасля гэтага высушаны Ni(OH)₂ драбілі ў спецыялізаваным млыне «Fritsch Pulverisette 2».

Эксперыменты па даследаванні ўплыву магнітнага поля і эфекту механаактывацыі на кінетыку працэса тэрмолізу НП Ni(OH)₂ праводзіліся ў апарце віхравога пласта (АВП) мадэлі УАП-3 з мантаванымі награвальным модулем і праточным рэактарам. Асноўныя кампаненты апарата УАП-3 уяўляюць сабой магнітныя індуктары, якія дазваляюць ствараць высокаэнергетычнае магнітнае поле, контур вадзянога астуджэння і праточны рэактар з нержавеючай сталі (дыяметр 45 мм, даўжыня 350 мм) (мал. 1).



Мал. 1. Схема апарата вихрового пласта УАП-3:
 1 – шпулька; 2 – контур вадзянога астуджэння; 3 – рэактар з нержавеючай сталі; 4 – ферромагнітныя іголкі; 5 – апрацоўваны матэрыял

У якасці ферромагнітных часціц, якія ствараюць вихравы пласт, былі выкарыстаныя зносастойкія сталёвыя іголкі даўжынёй 15–20 мм, дыяметрам 0,6–1,2 мм. Маса апрацоўванага матэрыяла пры адной загрузцы складала 15–20 г, а суадносіны масы сталёвых іголак да масы парашковай шыхты пры гэтым складала 4 : 1.

Прынцып работы, закладзены ў АВП, заснаваны на адначасовым уздзеянні на апрацоўваныя матэрыялы ратацыйнага магнітнага поля высокай магутнасці і механічнага ўздзеяння рабочых цел (іголак), якія знаходзяцца ў камеры рэактара з апрацоўванымі матэрыяламі і верцяцца пад уздзеяннем гэтага поля. У рабочей зоне, у адзінцы яе аб'ёму сканцэнтравана велізарная энергія, якая непасрэдна ўздзейнічае на рэчыва. Пад дзеяннем поля і рабочых цел любыя рэчывы ў рабочей зоне ўсталёўкі вельмі хутка змешваюцца, здрабняюцца і набываюць высокую хімічную актыўнасць, у выніку чаго адбываюцца глыбокія змяненні ў структуры рэчываў і актывацыя ўзаемадзейнічаючых кампанентаў незалежна ад таго, у якім выглядзе яны знаходзяцца: газападобным, вадкім або цвёрдым.

Тэмпературу тэрмолізу выбіралі на аснове даных тэрмагравіметрычнага аналізу (ТГА), прыведзеных у рабоце [13]. У ходзе працэса працякала наступная рэакцыя



Фазавы склад парашковых узораў вызначалі метадам рэнтгенафазавага аналізу (РФА) на рэнтгенаўскім дыфрактометры «Дыфрэй-401» (РФ) (СгК α -выпраменьванне) пры пакаёвай тэмпературы.

Велічыню ўдзельнай паверхні ($S_{\text{уд}}$) узораў вымяралі метадам БЭТ па нізка-тэмпературнай адсорбцыі азоту на аналізатары NOVA 1200e (ЗША). Дакладнасць вымярэння складае $\pm 5\%$. Сярэдні памер часціц парашкоў вылічалі па даных вымярэнняў велічыні $S_{\text{уд}}$ паводле формулы

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

дзе ρ – шчыльнасць матэрыялу, кг/м³; $S_{\text{уд}}$ – удзельная паверхня, м²/кг; $D_{\text{ср}}$ – сярэдні памер часціц, м.

Памерныя характарыстыкі і марфалогію атрыманых НЧ парашкоў даследавалі метадам электроннай мікраскапіі на сканавальным электронным мікраскопе (СЭМ) JSM 6700F (Японія).

Разлік ступені пераўтварэння (α) (адн. адз.) (адносіны колькасці рэагента, які ўступіў у рэакцыю, да яго зыходнай колькасці) праводзілі па формуле

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

дзе m_t і m_0 – адпаведна зыходная маса $\text{Ni}(\text{OH})_2$ і маса, якая ўступіла ў рэакцыю праз час t , гадз.

Для неізатэрмічнай ўмовы разлік энергіі актывацыі працэса тэрмолізу праводзілі дыферэнцыяльна-рознасным метадам, выкарыстоўваючы даныя ТГА і раўнанні неізатэрмічнай кінетыкі [14].

Дыферэнцыяльная рознасць можа быць запісана як

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

дзе α – ступень пераўтварэння, у долях; T – тэмпература, К; b – хуткасць нагрэву, К/с; E_a – энергія актывацыі, Дж/моль; R – універсальная газавая пастаянная, Дж/(моль · К); n – парадак рэакцыі.

У каардынатах X і Y нахіл адрэзка прапарцыійны велічыні энергіі актывацыі, а яго скрыжаванне з воссю ардынат дае значэнне n .

Канстанты хуткасці праходжання рэакцый былі разлічаны па кінэтычным раўнанні, якое адпавядае мадэлі Мак Кевана [15]:

$$D_{\text{cp}} d_0 [1 - (1 - \alpha)^{1/3}] = kt,$$

дзе D_{cp} – сярэдні памер часціц, м; d_0 – доля кіслароду ў аксідзе; α – ступень пераўтварэння, у долях; k – канстанта хуткасці хімічнай рэакцыі, м/с; t – час, с.

Вынікі і іх абмеркаванне

Для вывучэння ўплыву магнітнага поля і эфекту механаактывацыі ў АВП на кінэтыку працэса тэрмолізу НП $\text{Ni}(\text{OH})_2$ эксперыменты былі праведзены пры тэмпературах $T_1 = 220$ °С, $T_2 = 250$ °С і $T_3 = 280$ °С. Гэтыя тэмпературы знаходзяцца ў інтэрвале інтэнсіўнага праходжання гэтага працэса, як паказана ў рабоце [13].

Даследаванні праводзіліся ў нерухомым пласце, у пласце з накладаннем ратацыйнага магнітнага поля і ў віхравым слоі з механічнай актывацыяй.

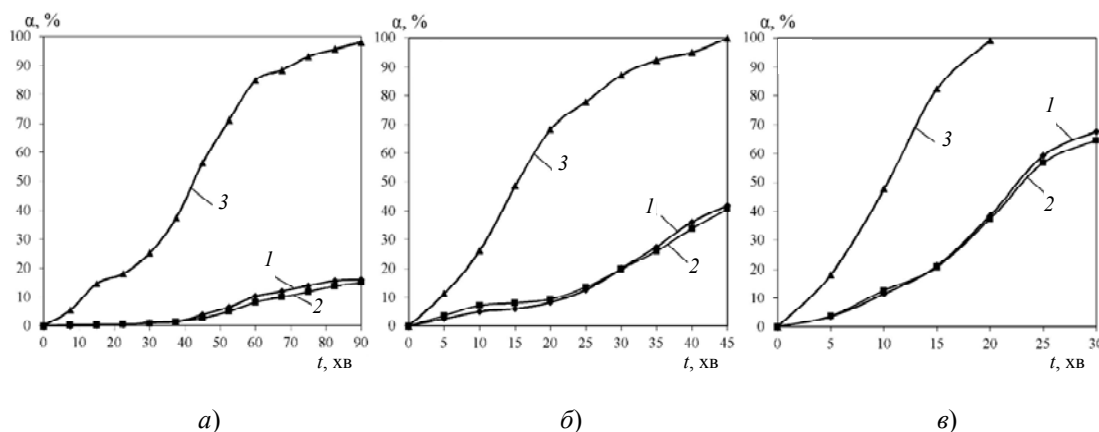
На мал. 2 прадстаўлены кінэтычныя крывыя тэрмолізу НП $\text{Ni}(\text{OH})_2$ у розных эксперыментальных умовах.

Бачна, што пры 220 °С (мал. 2, а) працэс тэрмолізу ў нерухомым пласце і ў пласце з накладаннем магнітнага поля ідзе вельмі павольна. Аднак пад дзеяннем эфекту механаактывацыі ў віхравым пласце працэс тэрмолізу працякае з прыкметнай хуткасцю і практычна заканчваецца пасля паўтары гадзіны вытрымкі.

Пры 250 °С (мал. 2, б) ступень пераўтварэння ў нерухомых пластах з полем і без поля павышаецца, але па-ранейшаму значна менш, чым у віхравым пласце з механаактывацыяй. Пры гэтым працэс тэрмолізу ў віхравым пласце заканчваецца пасля 45 хв. апрацоўкі. Для узораў у нерухомых пластах: на іх кінэтычных крывых спачатку ідзе інкубацыйны перыяд, калі толькі-толькі пачынаецца зараджэнне новай фазы, затым перагін, які адпавядае кінэтычнаму рэжыму працэса, пры якім працякае

хімічная рэакцыя на паверхні нерухомага пласта гідраксіда. Пры гэтым працэс яшчэ не пераходзіць у дыфузійную вобласць рэагавання.

І нарэшце пры 280 °С (мал. 2, в) працэс тэрмолізу ва ўсіх пластах значна паскараецца, асабліва ў віхравым пласце: працэс ідзе да канца толькі за 20 хв. Ступень пераўтварэння ў нерухомах пластах дасягае 60–70 % пасля 30 хв. вытрымкі. Трэба адзначыць, што магнітнае поле практычна не ўплывае на хуткасць працэса.



Мал. 2. Часавыя залежнасці ступені пераўтварэння пры тэрмолізе НП Ni(OH)₂:
 а – пры 220 °С; б – пры 250 °С; в – пры 280 °С: 1 – нерухомы пласт;
 2 – нерухомы пласт з магнітным полем; 3 – віхравы пласт

Разлічаныя энергіі актывацыі і канстанты скорасці працэса тэрмолізу НП Ni(OH)₂ па раўнаннях (5) і (6) адпаведна, прыведзены ў табл. 1.

Табліца 1

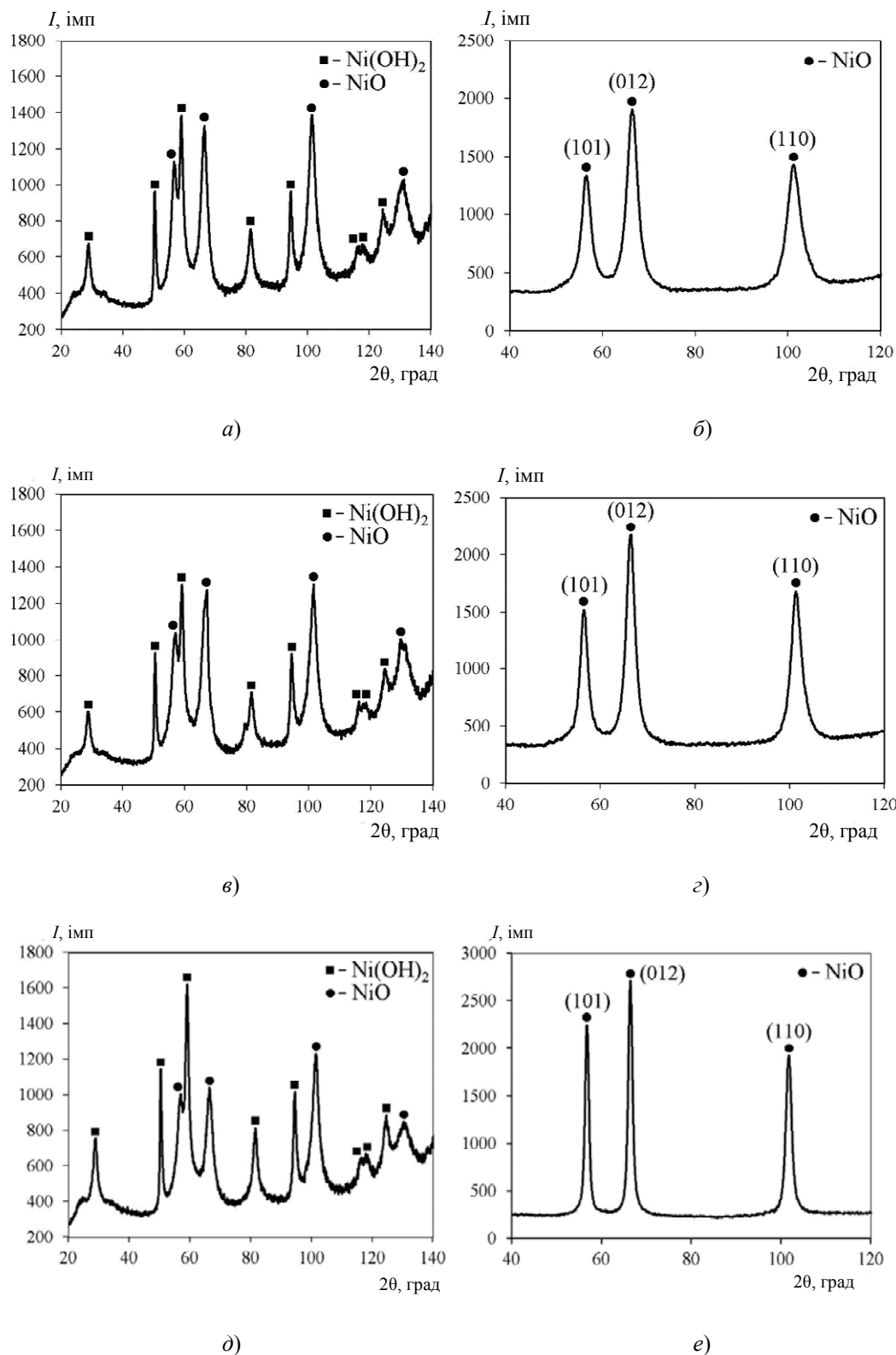
Разлік канстанты хуткасці і энергіі актывацыі працэса тэрмолізу

Выгляд пласта	Тэмпература, °С			E _a , кДж/моль
	220	250	280	
	k · 10 ¹¹ , м/с			
Нерухомы пласт	0,11	0,36	0,59	38
Нерухомы пласт з магнітным полем	0,12	0,38	0,60	44
Віхравы пласт	0,52	1,65	6,32	68

Аналіз разліковых даных паказаў, што хуткасць працэса тэрмолізу ў віхравым пласце значна вышэй, чым у нерухомах пластах, прыкладна ў 5–10 разоў.

Разліковыя даныя энергіі актывацыі тэрмолізу ў розных пластах таксама супадаюць з тэарэтычнай здагадкай: у віхравым пласце за кошт інтэнсіўнага мяшання выдаляецца дыфузійны пласт і працэс працякае ў кінетычнай вобласці рэагавання, таму хуткасць працэса мацней залежыць ад тэмпературы (гэта значыць пры малой змене тэмпературы канстанта хуткасці (k) змяняецца на істотную велічыню), значыць, энергія актывацыі працэса ў віхравым пласце больш, чым у нерухомах.

На мал. 3 прадстаўлены рэнтгенаграмы прамежкавых і канчатковых прадуктаў тэрмолізу НП Ni(OH)₂. У левай частцы малюнка прадстаўлены рэнтгенаграмы прамежкавых узораў, у правай – рэнтгенаграмы канчатковых прадуктаў. Для даследавання прамежкавыя ўзоры былі ўзятыя пасля 25 хв. вытрымкі ў нерухомах пластах, а ў віхравым пласце – 5 хв. пры T = 280 °С.



Мал. 3. Рентгенаграмы прадуктаў працэса:
 а, б – узоры, атрыманыя ў нерухомым пласце; в, г – узоры, атрыманыя ў нерухомым пласце з магнітным полем; д, е – узоры, атрыманыя ў віхравым пласце

Разлік рэнтгенаграм паказвае, што ва ўзорах, атрыманых пасля 25 хв. вытрымкі ў нерухомах пластах без поля і з полем (мал. 3, *a, в*), у роўнай меры прысутнічаюць як зыходны матэрыял – НІ $\text{Ni}(\text{OH})_2$, так і прадукт тэрмолізу – НІ NiO . Пасля 1 гадз. вытрымкі ў полі і без поля $\text{Ni}(\text{OH})_2$ раскладаецца цалкам (мал. 3, *б, з*).

З рэнтгенаграмы на мал. 3, *д* бачна, што пры правядзенні працэса тэрмолізу ў віхравым пласце за 5 хв. ужо ўтворана значная колькасць NiO . Раскладанне НІ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ у віхравым слоі цалкам заканчваецца пасля 20 хв. апрацоўкі (мал. 3, *е*).

Колькасны фазавы аналіз быў праведзены шляхам разліку рэнтгенаграм з дапамогай праграм «OUTSET» і «PHAN». Вынік колькаснага фазавога аналіза паказаны ў табл. 2.

Табліца 2

Вынік колькаснага фазавога аналіза прадуктаў працэса

Узор	Колькасць фазы, ат. %	
	NiO	Ni(OH) ₂
Нерухомы пласт, 25 хв.	52	48
Нерухомы пласт, 60 хв.	100	0
Нерухомы пласт з магнітным полем, 25 хв.	56	44
Нерухомы пласт з магнітным полем, 60 хв.	100	0
Віхравы пласт, 5 хв.	27	73
Віхравы пласт, 20 хв.	100	0

Вынік вымярэння ўдзельнай паверхні $S_{уд}$ і сярэдняга памеру $D_{ср}$ часціц зыходнага матэрыялу і прадуктаў тэрмолізу прадстаўлены ў табл. 3. Бачна, што пры апрацоўцы ва ўсіх пластах $S_{уд}$ атрыманых прадуктаў тэрмолізу расце з часам і значна вышэй, чым у зыходнага ўзору. Гэта тлумачыцца тым, што падчас раскладання вадзяны пар вызваляе пары часціц і ўтвараецца дробнадысперсны NiO .

Табліца 3

Вынік удзельнай паверхні зыходнага ўзору і прадуктаў працэса

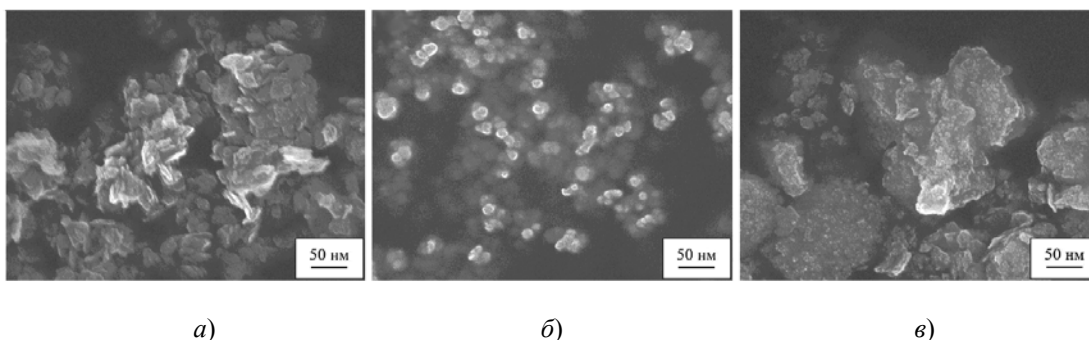
Узор	$S_{уд}$, м ² /г	$D_{ср}$, нм
Зыходны $\text{Ni}(\text{OH})_2$	68,8	21,4
Нерухомы пласт, 25 хв.	112,1	9,8
Нерухомы пласт, 60 хв.	149,5	6
Нерухомы пласт з магнітным полем, 25 хв.	106,3	10,2
Нерухомы пласт з магнітным полем, 60 хв.	139	6,5
Віхравы пласт, 5 хв.	96,2	13,0
Віхравы пласт, 20 хв.	35,6	25,3

Пры параўнанні даных розных узораў устаноўлена, што $S_{уд}$ узораў, атрыманых у нерухомым пласце без поля, перавышае $S_{уд}$ узораў, атрыманых у магнітным полі. Апрацоўка ў віхравым пласце спачатку таксама прыводзіць да павышэння $S_{уд}$ у параўнанні з зыходным узорам, але затым яна падае.

Разлік сярэдняга памеру часціц па формуле (3) паказаў, што самыя дробнадысперсныя часціцы атрымаліся ў нерухомым пласце без поля, іх сярэдні памер склаў 9,8 і 6,0 нм за 25 хв. і 60 хв. апрацоўкі адпаведна. За такую ж колькасць

часу ў магнітным полі ён склаў 10,2 і 6,5 нм. Пры апрацоўцы ў віхравым пласце сярэдні памер часціц канчатковага прадукта тэрмолізу роўны 25,3 нм.

На мал. 4 прадстаўлены электронныя мікрафатаграфіі прадуктаў тэрмолізу – НЧ NiO, атрыманых у розных пластах пры 280 °С.



Мал. 4. СЭМ-мікрафатаграфіі канчатковых прадуктаў тэрмолізу пры 280 °С:
a – узор, атрыманы ў нерухомым пласце; *б* – атрыманы нерухомым пласце з магнітным полем; *в* – атрыманы ў віхравым пласце

Аналіз мікрафатаграфій (мал. 4, *a*) паказаў, што НЧ NiO, атрыманыя ў нерухомым пласце без накладання поля, знаходзяцца ў шчыльным кантакце адзін з адным і ўяўляюць сабой пласцінкі няправільнай формы, характэрныя памеры якіх складаюць ад 30 да 100 нм.

З мікрафатаграфіі ўзору, апрацаванага ў магнітным полі (мал. 4, *б*) бачна, што НЧ выглядаюць як тонкія плоскія дыскі, якія сабраны ў буйныя агрэгаты. Памеры дыскаў вагаюцца ад сарака да сотняў нм, а іх таўшчыня не перавышае 20 нм.

Апрацоўка ўзору ў віхравым пласце (мал. 4, *в*) прыводзіць да флакуляцыі матэрыяла, фармуючы вялікія круглыя пласцінкі памерам да 1 мкм, на паверхні якіх размешчаны дробнадысперсныя часціцы памерам парадку некалькі нм.

Такім чынам, пры тэрмолізе магнітнае поле, крыху павялічваючы сярэдні памер часціц, спрыяе акругленню іх граніц. Віхравое поле актывуе працэс каагуляцыі НЧ. Гэта пацвярджаюць даныя па вымярэнні ўдзельнай паверхні, якая максімальная ва ўзоры, атрыманым у нерухомым пласце без поля, крыху менш ва ўзоры, атрыманым у магнітным полі, і ў некалькі разоў менш ва ўзоры, атрыманым у віхравым пласце.

Выснова

Даследаваны кінэтычныя заканамернасці працэса тэрмолізу НП Ni(OH)₂ у апарце з віхравым пластом. Устаноўлена, што магнітнае поле фактычна не ўплывае на хуткасць гэтага працэса.

Паказана, што працэсы ў віхравым пласце працякаюць значна больш інтэнсіўна, чым у нерухомых (у 5–10 разоў).

Выяўлена, што пры тэрмолізе магнітнае поле спрыяе акругленню граніц наначасціц, а віхравы пласт актывуе працэс іх каагуляцыі.

Літаратура

1. Bhushan, B. (Ed.). Springer Handbook of Nanotechnology. 4th edition / B. Bhushan. – Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 2017. – 1500 p.
2. Dahman, Y. Nanotechnology and Functional Materials for Engineers. 1st edition / Y. Dahman. – Elsevier : Health Sciences Division, 2017. – 282 p.

3. Garba, D. S. Nickel Oxide (NiO) Devices and Applications: A Review / D. S. Garba, Y. Abubakar, S. Suleiman // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2019. – Vol. 8 (4). – P. 461–467.
4. El-Kemary, M. Nickel oxide nanoparticles: Synthesis and spectral studies of interactions with glucose / M. El-Kemary, N. Nagy, I. El-Mehasseb // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2013. – Vol. 16. – P. 1747–1752.
5. Ruscello, M. Nanocomposite of nickel oxide nanoparticles and polyethylene oxide as printable hole transport layer for organic solar cells / M. Ruscello, T. Sarkar, A. Levitsky // Sustainable Energy & Fuels. – 2019. – Vol. 3. – P. 1418–1426.
6. Application of nickel oxide nanoparticles in electrochromic materials / D. L. Sun [et al.] // Ionics. – 2017. – Vol. 23. – P. 1509–1515.
7. Изучение факторов, влияющих на процесс восстановления NiO / О. В. Большакова [и др.] // Цветные металлы. – 2018. – № 6. – С. 71–77.
8. Волков, Л. В. Механизм растворения оксидов никеля растворами серной кислоты в окислительных условиях / Л. В. Волков, М. И. Калашникова // Цветные металлы. – 2011. – № 8/9. – С. 101–104.
9. Price tag in nanomaterials? / D. A. Gkika [et al.] // Journal of Nanoparticle Research. – 2017. – Vol. 19. – P. 177.
10. Нгуен, Т. Х. Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля / Т. Х. Нгуен, В. М. Нгуен // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функционал. покрытия. – 2020. – № 1. – С. 22–28.
11. Кинетика процесса получения нанопорошка кобальта методом водородного восстановления при неизотермических условиях / Т. Х. Нгуен [и др.] // Вестн. Моск. авиац. ин-та. – 2020. – № 27 (4). – С. 241–249.
12. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология / Н. П. Вершинин. – Ростов н/Д, 2004. – 314 с.
13. Нгуен, В. М. Разработка эффективных способов получения нанопорошков триады железа водородным восстановлением из оксидных соединений в вихревом поле и тонких слоях : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.08 / В. М. Нгуен. – М. : МИСиС, 2018. – 165 с.
14. Рыжонков, Д. И. Теория металлургических процессов / Д. И. Рыжонков, П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев. – М. : Металлургия, 1989. – 392 с.
15. McKewan, W. M. Kinetics of iron oxide reduction / W. M. McKewan // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. – 1960. – Vol. 218. – P. 2–6.

Поступила 22.09.2022