https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-64-71
УДК: 621.762.4

МАГНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚ ҚОСПАСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА МЕХАНОСИНТЕЗ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Н. М. Мухамедова, А. Ж. Миниязов, О. Өкен*, Ж. Н. Оспанова, А. А. Сабыртаева, К. С. Шайкиева, Т. Д. Ахмеди

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* *Байланыс үшін E-mail: oken@nnc.kz*

Бұл мақалада Mg-Ni-Ce жүйесінің ұнтақ құрамындағы фазалық және морфологиялық өзгерістердің механикалық синтез параметрлеріне тәуелділігі талданады. Механосинтез процесі барысында материалдың құрылымдық сипаттамаларына үдеу мен ұзақтық параметрлерінен бөлек, ұнтақ пен ұсатқыш шарлардың қатынасы да айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Микроскопиялық талдау нәтижелері көрсеткендей, ұнтақ пен шарлардың 1:10 қатынасында синтезделген қоспалардағы бөлшектердің орташа мөлшері 13,76 мкм құрайды. Ал 1:30 қатынасы қолданылған жағдайда бөлшектердің мөлшері 7,59 мкм-ге дейін кішірейеді. Барлық үлгілерде негізгі фаза магний болып табылатыны анықталды. Алайда 1:30 қатынасында MgNi фазасының гексагоналды кристалдық торының қалыптасуы және CeNi фазасының түзілуі байқалады.

Түйін сөздер: *механосинтез, механикалық белсендіру, ұнтақ қоспасы, сутегі, магний.*

КІРІСПЕ

Басқа баламалы энергия көздерімен қатар, сутегі энергиясын қолдану перспективалары жоғары. Сутегі энергиясын дамыту парниктік газдардың шығарындыларын азайтуға, сондай-ақ энергетикалық және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету бойынша негізгі міндеттерді шешуге ықпал етеді [1]. Осы салада құзыреті мен инфрақұрылымы бар елдер үшін сутегі энергетикасы энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізі бола алады. Сутегі энергетикасының белсенді дамуы энергетика саласында жаңа әлемдік нарықты қалыптастырады .

ҚР Президенті Қасым-Жомарт Тоқаев өз сөзінде жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың басымдығын атап өтті. Оның айтуынша, Қазақстанда «жасыл» сутектің өнеркәсіптік кластерін құруға үлкен мүмкіндіктер бар. Елімізде бұл үшін қажетті ғылыми әлеует пен білікті мамандар бар [2–4]. Бұл сутегі технологияларын дамытудың жол картасы құрыла бастаған Қазақстандағы сутегі технологиялары мен сутегі нарығының дамуына жаңа серпін берді.

Сутегі жер бетіндегі ең кең таралған элемент болғанымен, оның еркін күйде болуы өте шектеулі [5]. Кез келген басқа тауар сияқты, сутегі де түпкілікті тұтынушының пайдалануы үшін өндірілуі, сақталуы және тасымалдануы керек [6]. Сутегіні сақтау және тасымалдау бүгінгі күннің ең өзекті мәселелерінің бірі болып табылады.

Қазіргі уақытта сутекті тиімді сақтаудың ең үлкен әлеуеті металл гидридтеріне негізделген қатты күйдегі сақтау жүйелерінде шоғырланған. Бұл жүйелер сутекті жоғары көлемдік және массалық тығыздықта сақтаумен қатар, салыстырмалы түрде төмен температура мен орташа қысымда сіңіру және десорбция процестерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, металл гидридтері химиялық тұрақтылықты, қайталама пайдалану мүмкіндігін және циклдік тұрақтылықты қамтамасыз ете отырып, сутектің қауіпсіз сақталуын қамтамасыз етеді. Осы себепті, металл гидридтері сутекті энергия тасымалдаушысы ретінде кеңінен қолданудың перспективалы шешімі ретінде қарастырылады. Алайда, сутекті сақтау жүйелерінің техникалық-экономикалық тиімділігі әлі жүзеге асқан жоқ, себебі қолданыстағы металл гидридтерінің ешқайсысы практикалық қолданудың негізгі критерийлерін қанағаттандырмайды [7–8].

Сутегі құрамының жоғары тығыздығына байланысты сутекті химиялық байланысқан түрде сақтауға арналған материалдар бүгінгі күнге дейін кеңінен зерттелуде. Осындай материалдардың қатарына $NaAlH_4$, AlH_3, $LiBH_4$, $Mg(BH_4)_2$, аммиакоборан (NH_3BH_3), амидтік жүйелер, Li_2NH, Li_3NH, $LiAlH_4$, MgH_2 және $NaBH_4$ сияқты шамамен 6–8% (масс.) мөлшеріне дейін жетуге қабілетті металл гидридтері жатады [9–16].

Бүгінгі таңда сутекті сақтаудың келешегі зор әдістерінің бірі – магний (Mg) негізіндегі қосылыстар. Бұл қосылыстар 7,6%-ға дейінгі жоғары сыйымдылыққа, қайта пайдалану мүмкіндігіне, қоршаған ортаға қауіпсіздігіне және Кларк санының жоғары сипаттамаларына ие [17]. Алайда, оның практикалық қолданылуы екі негізгі фактормен шектеледі: біріншіден, гидридтік фазаның жоғары термодинамикалық тұрақтылығы, бұл сутектің сіңірілу және десорбциялану кинетикасының жеткілікті жылдамдығын қамтамасыз ету үшін жоғары температураны талап етеді; екіншіден, атмосфералық ластаушы заттардың әсеріне төзімділігінің төмендігі, бұл материалдың сорбциялық қасиеттерінің тез нашарлауына әкеледі [18–21].

Бірқатар зерттеулерде [22–24] никель (Ni) Mg негізіндегі қорытпаларда тиімді каталитикалық элемент екені атап өтілген. Mg–Ni қорытпаларын сутекпен қанықтыру кезінде әртүрлі сутеккұрамды фаза-

лар, соның ішінде MgH_2 және Mg_2NiH_4 гидридтік қосылыстары түзіледі. Mg_2NiH_4 таза Mg_2Ni-мен салыстырғанда сутекті сіңіру және десорбциялау кинетикасы жағынан айтарлықтай тиімді екені анықталған.

Сонымен қатар, сирек жер металдарын (RE) Mg-Ni жүйесіне енгізу (Mg-Ni-RE) сутекті сақтау қасиеттерін жақсартады. Бұл әсер материалдың жоғары дисперстік құрылымымен және никель мен сирек жер элементтері арасындағы синергетикалық өзара әрекеттесумен түсіндіріледі. Нанокұрылымдандыру осы процесте маңызды рөл атқарады: меншікті беттің ұлғаюы және кристалдық шекаралар тығыздығының артуы магний мен сутек арасындағы байланыс энергиясын тұрақсыздандырады. Соның нәтижесінде MgH_2 десорбция температурасы төмендеп, сутекті сақтау кинетикасы жақсарады [25–26].

Осындай материалдарды алудың кең таралған әдістерінің бірі – механикалық синтез (механосинтез) әдісі. Бұл процес жоғары энергиялы планетарлық диірмендерде бастапқы ұнтақтарды легирлеуші элементтермен белгілі уақыт бойы араластыру арқылы жүзеге асады. Механосинтез нәтижесінде берілген химиялық құрамы мен микроқұрылымы бар наноөлшемді бөлшектер түзіледі [27–29].

Сутегі жинақталу кинетикасын жақсарту мақсатында механикалық ұнтақтаудың негізгі параметрлері (ұнтақтау уақыты, айналу жылдамдығы, шар-ұнтақ қатынасы, атмосфера) оңтайландырылуы маңызды рөл атқарады. Оптималды ұнтақтау режимі сутегі десорбциясының белсендіру энергиясын айтарлықтай төмендетіп, сутегі жинақтау процестерін айтарлықтай жылдамдата алады. Осылайша,механикалық өңдеу арқылы Mg негізіндегі сутегі жинақтаушы материалдардың құрылымы мен фазалық күйін өзгерту олардың сутегіні сақтау қабілетін жақсартады [33].

Осы зерттеудің мақсаты – сутекті сақтау және тасымалдауға арналған функционалдық материалдарды әзірлеу үшін перспективалы Mg-Ni-Ce жүйесін механосинтездеудің оңтайлы параметрлерін қарастырып, ұнтақ құрылымына тигізетін әсерін зерттеу. Бұл өз кезегінде интерметалл қосылыстарын әрі қарай тереңірек зерттеуге және оларды тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ ӘДІСІ

Зерттеу объектісі Mg, Ni және Ce металл ұнтақтары (жеткізуші: Суойи, Қытай).Ұнтақ қоспаларының құрамын таңдау интерметаллидтердің түзілуіне легирлеуші элементтердің әсерін зерттеуге арналған бұрын жүргізілген теориялық талдауға негізделді. Бастапқы ұнтақтардың сипаттамалары №1 кестеде көрсетілген.

Бірінші кезеңде ұнтақтарды механикалық белсендіру жеке орындалды. Бұл процес ұнтақ бөлшектерінің меншікті беттік ауданын ұлғайту мақсатында жүзеге асырылды. Екінші кезеңде ұнтақ қоспаларын планетарлық диірменде әртүрлі параметрлермен механосинтездеу бойынша тәжірибелер жүргізілді. Механикалық белсендіру және механосинтез процесі Retsch PM100 планетарлық диірменінде жүзеге асырылды.

Тәжірибелер кезінде 1.4034 / AISI 420 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған диаметрі 5 мм ұнтақтау шарлары, көлемі 250 мл ұнтақтау ыдысы пайдаланылды. Қажетті ұсақтыққа жетуге оңтайлы шар өлшемін таңдау үшін әдетте шамамен 1000 көбейткіші пайдаланылады. Бұл көбейткіш бастапқы бөлшек өлшемі мен соңғы қажетті бөлшек өлшемі арасындағы қатынасты көрсетеді және ұнтақтау тиімділігін қамтамасыз етеді. Осыған байланысты, қолданылған планетарлық диірмен үлгісінде ұнтақтаудың максималды қол жеткізу дәрежесі 5 мкм дейін болғандықтан, ең қолайлы шар өлшемі 5 мм болып табылады. Ұнтақтау гарнитурасының сипаттамалары 2-кестеде келтірілген.

Тәжірибелер барысында ұнтақ массасы мен ұнтақтау шарларының массалық қатынасы 1:10 және 1:30, ал ұнтақтау уақыты 5 және 10 сағат аралығында таңдалды. Диірменнің айналу жылдамдығы 350 және 450 айн/мин деңгейінде белгіленді. Әрбір ұнтақтау кезеңінде бөлшектердің біркелкі дисперсиясын қамтамасыз ету және олардың агломерациясын болдырмау мақсатында айналу бағыты әр сағат сайын өзгертілді. Бұл тәсіл ұнтақ қоспаларының біркелкі ұнтақталуын қамтамасыз етіп, механосинтез процесінің тиімділігін арттырды.

1-кесте. Бастапқы ұнтақтардың сипаттамасы

№ р/н	Атауы	Маркасы	Тазалығы, %	Бөлшектердің мөлшері, мкм
1	Магний ұнтағы	МПФ-3	99	120–180
2	Церий металл ұнтағы	–	99,99	70
3	Никель карбонил ұнтағы	ПНК-УТ3	99,9	20

2-кесте. Ұнтақтау гарнитурасының сипаттамалары

Позициялар атауы	Сипаттамасы	Материалдың қаттылығы	Химиялық құрамы, %
Ұнтақтау ыдысы	көлемі – 250 мл	48–50 HRC	Fe (82,925), Cr (14,5), C (0,5), Mn (1), Si (1), P (0,045), S (0,03)
Ұнтақтаушы шарлар	диаметр – 5 мм		

3-кесте. Тәжірибе параметрлері

Құрамдық мөлшері (масс.%)	Ұнтақтаушы шарлардың ұнтақ қоспасына қатынасы	Тәжірибе өткізу уақыты, сағ	Үдеу, айн/мин	Ұнтақ массасы, г	Ортасы	Қысым, кПа	Стеарин қышқылы, г
Механикалық белсендіру							
Mg	1:20	1	200	19,25	аргон	5	0,57
Ni				19,25			
Ce				19,25			
Механикалық синтез							
Mg-3%Ni-2%Ce	1:10	5	350	38,5	аргон	5	0,57
			450				
		10	350				
			450				
	1:30	5	350	12,8			0,57
			450				
		10	350				
			450				

Ұнтақтарды дайындау және өлшеу, сондай-ақ ұнтақ пен шарлар қоспасын ұнтақтау ыдысына салу вакуумдық қолғап қорабында (GVB-3C), аргон атмосферасында жүргізілді. Ұнтақ мөлшері планетарлық диірменнің сипаттамалары мен мүмкіндіктерін ескере отырып есептелді: Ұнтақтау ыдыс көлемінің 1/3 бөлігін толтыру, ұнтақтың массасы қолданылатын ұнтақтау шарларының санын ескере отырып анықталды. Барлық жүргізілген эксперименттерде ұнтақтау шарларының бірдей мөлшері – салмағы 385 грамм, ал көлемі 80–83 мл, бұл шамамен диірмен ыдысының 1/3 бөлігіне сәйкес келді. Ұнтақ қоспасының мөлшері ұнтақтау шарлары мен қоспаның таңдалған қатынасына байланысты анықталды. Жүргізілген тәжірибелердің параметрлері 3-кестеде сипатталған.

Механикалық белсендіру ден кейін Fritsch ANALYSETTE 3 PRO вибрациялық електің көмегімен бөлшектердің өлшемдік құрамына талдау жүргізілді. Бұл зерттеу барысында құрылғының үздіксіз (тұрақты) елеу режимі қолданылды, бұл бөлшектердің өлшемдік таралуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді. Электеу процесі кезінде амплитуда 1,5 мм деңгейінде орнатылды, бұл бөлшектердің тиімді еленуін қамтамасыз етті және олардың фракциялық құрамын нақты бағалауға септігін тигізді. Талдау жалпы 30 минут бойы жүргізілді, бұл бөлшектердің өлшемдері бойынша сенімді және қайталанатын нәтижелер алуға мүмкіндік берді.

Бұдан кейін ұнтақтар механосинтез процесі 3-кестеде көрсетілген режимдерге сәйкес жүргізілді.

Ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың 1:10 және 1:30 қатынасында алынған 8 ұнтақ қоспасы энергия-дисперсиялық спектрлік талдау қосымшасы бар Hitachi TM4000plus сканерлеуші электрондық микроскоптың көмегімен топографиялық контраст (Topographical contrast) режимінде зерттелді.

Механосинтезден кейін алынған үлгілердің рентгендік дифракциялық талдауы X'Pert PRO дифрактометрінің көмегімен жүргізілді. Талдау барысында Cu-Kα сәулеленуі қолданылды, генератор параметрлері 40 кВ кернеу және 30 мА ток мәндерінде орнатылды. Өлшеу кезінде бекітілген ені 0,75 мм және бұрыштық алшақтауы 0,478° болатын саңылау пайдаланылды. Дифрактограммаларды тіркеу 20–90° 2θ бұрыштық диапазонында жүзеге асырылды, сканерлеу қадамының өлшемі 0,020° 2θ, ал әрбір қадамдағы экспозиция уақыты 0,5 с құрады. Алынған рентгендік дифрактограммаларды фазалық сәйкестендіру үшін Crystallography Open Database (COD) және PDF-2 ICDD Release 2004 дерекқорлары қолданылды. Кристаллиттердің өлшемі Шеррер теңдеуін пайдалана отырып, математикалық есептеу әдісімен анықталды:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (1)$$

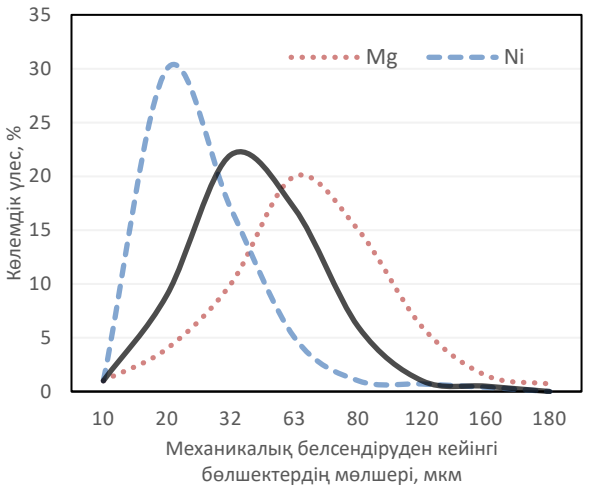
Мұнда D – кристаллит өлшемі; K – пішін коэффициенті; λ – рентген сәулесінің толқын ұзындығы; β – шыңның жартылай биіктіктегі толық ені (FWHM); ал θ – дифракция бұрышы. Мұндағы пиктердің ені «HighScore» бағдарламалық жасақтамасында Гаусс функциясын аппроксимациялау арқылы анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР

1-суретте механикалық белсендіруден кейін Fritsch ANALYSETTE 3 PRO вибрациялық електеу әдісі арқылы бөлшектердің өлшемдік құрамының таралуына жүргізілген талдау нәтижелері гистограмма түрінде көрсетілген.

Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде бастапқы ұнтақ қоспасының бөлшектері кең диапазонда таралғанымен, механикалық белсендіру процесі олардың дисперсиясын едәуір арттырғаны анықталды. Бұл өз кезегінде бөлшектердің орташа мөлшерін азайтып, олардың таралуының біркелкілігіне оң әсер етті. Әртүрлі элементтердің (Mg, Ni, Ce) бөлшектері әртүрлі мөлшерлік таралу сипаттамаларына ие болғанымен,

механикалық белсендіру нәтижесінде олардың мөлшерлері жақындай түсті. Бұл процестің ұнтақ материалдарының микроструктурасына тигізетін әсерін көрсетеді және болашақта олардың функционалдық қасиеттерін жақсарту үшін маңызды фактор болып табылады.

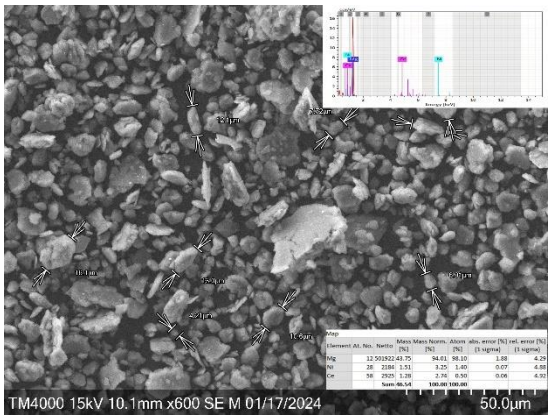


1-сурет. Механикалық белсендіруден кейінгі ұнтақ композициясының гранулометриялық құрамы

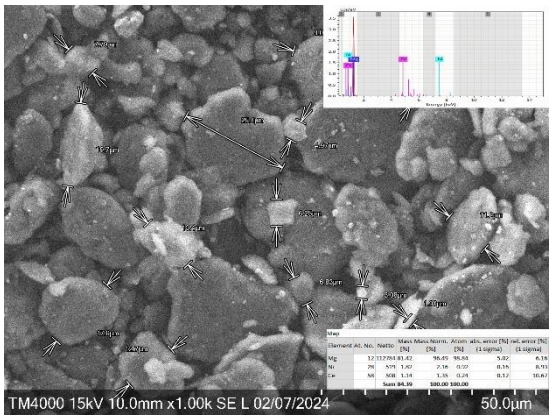
Сканерлеуші электронды микроскопиямен механосинтезден кейін ұнтақ қоспаларын бірдей жағдайларда (екінші реттік электрондар детекторын қолдана отырып, топографиялық контраст Topographical contrast) режимінде талдағанда ұнтақтың ұнтақтау шарларына қатынасы процестің нәтижесіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. 2-суретте механосинтезден кейін ұнтақ қоспаларының топографиялық контраст режимінде алынған СЭМ кескіндері көрсетілген.

Синтез нәтижесінде алынған қоспалардың бөлшектерінің өлшемдерін бағалау кезінде ұнтақ мөлшеріне қатысты ұнтақтау шарларының санын көбейту неғұрлым ұсақ дисперсті қоспаның түзілуіне әкелетіні анықталды. Ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың массалық арақатынасы 1:30 болғанда алынған тамшы тәрізді бөлшектер «дұрыс емес» шар тәрізді: сопақ немесе тегістелген. Қоспа бөлшектердің біркелкі орналасуымен сипатталады.

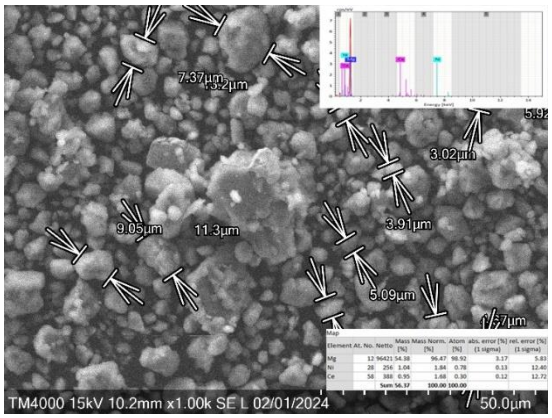
Ұнтақтың ұнтақтаушы шарларға 1:10 қатынасын пайдалану арқылы алынған үлгілер дендритті (қабыршақты) пішінге ие. Мұндай бөлшектері бар ұнтақтар шығыңқы жерлер мен тармақтары арқасында жақсы тығыздалған және берік байланыс қамтамасыз етеді. Бұл ұнтақтардағы бөлшектердің әртекті таралуымен сипатталады. ЭДС (элементтік талдау) Талдау барысында алынған спектрлік деректер бастапқыда белгіленген стехиометриялық арақатынастардың сақталғанын растады.



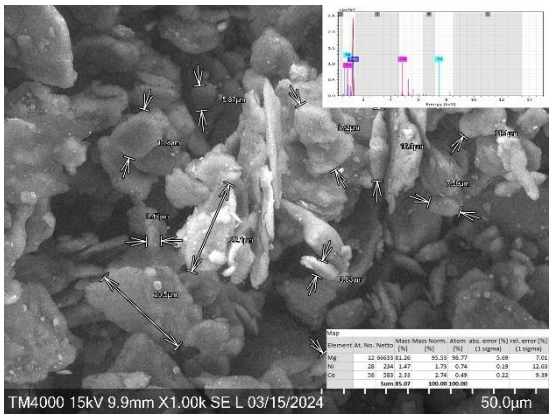
а) №1 қоспа (арақат.1:30, 350 айн., 5 сағ.)



б) №5 қоспа (арақат. 1:10, 350 айн., 5 сағ.)

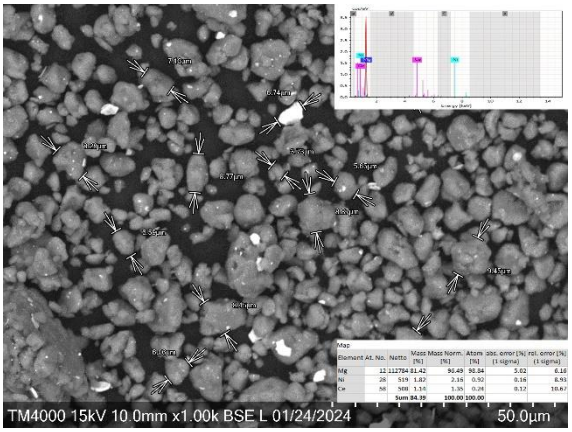


в) №2 қоспа (арақат. 1:30, 450 айн., 5 сағ.)

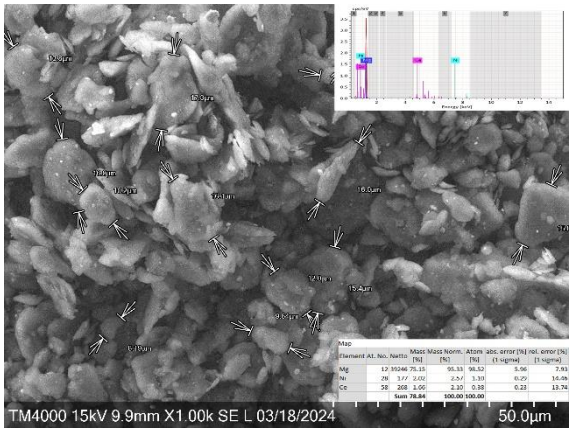


г) №6 қоспа (арақат.1:10, 450 айн., 5 сағ.)

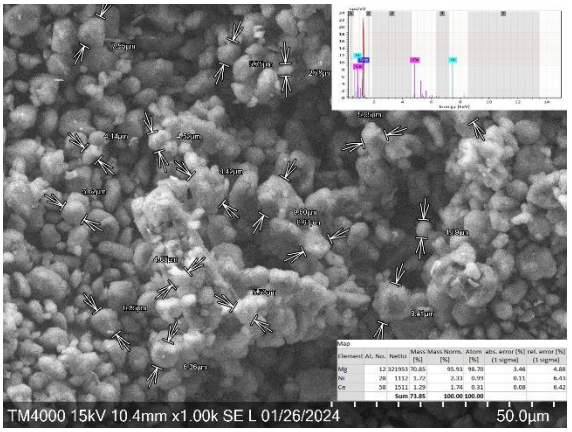
2-сурет. МС кейін ұнтақ қоспаларының топографиялық контраст режимінде алынған СЭМ кескіндері



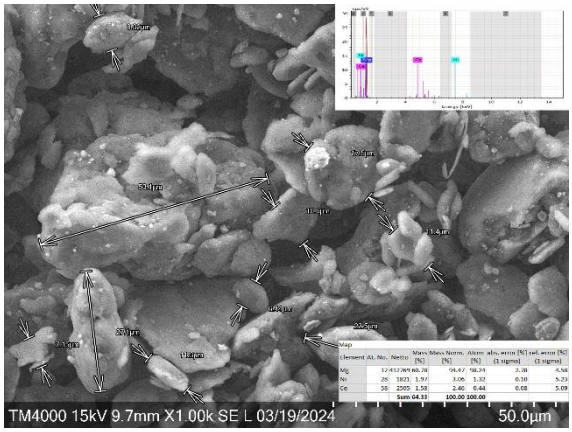
д) №3 қоспа (арақат. 1:30, 350 айн.,10 сағ.)



е) №7 қоспа (арақат.1:10, 350 айн., 5 сағ.)



ж) №4 қоспа (арақат. 1:30, 450 айн., 10 сағ.)



з) №8 қоспа (арақат. 1:10, 450 айн., 10 сағ.)

2-сурет (жалғасы). МС кейін ұнтақ қоспаларының топографиялық контраст режимінде алынған СЭМ кескіндері

Әртүрлі арақатынастарда алынған қоспалардағы ұнтақ бөлшектерінің пішіні бойынша өлшемдеріне жүргізілген салыстырмалы талдау ұнтақтардың ең үлкен дисперсиясына шарлар мен қоспалардың үлкен қатынасы бар (1:30) үлгілерде қол жеткізілетінін көрсетеді.

Механосинтез Mg-Ni-Ce жүйесінің үлгілерінің фазалық құрамында елеулі өзгерістерге қол жеткізуге мүмкіндік берді. 4-суретте ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың 1:10 (а) және 1:30 (б) қатынасында алынған қоспалардан түсірілген дифрактограммалары көрсетілген.



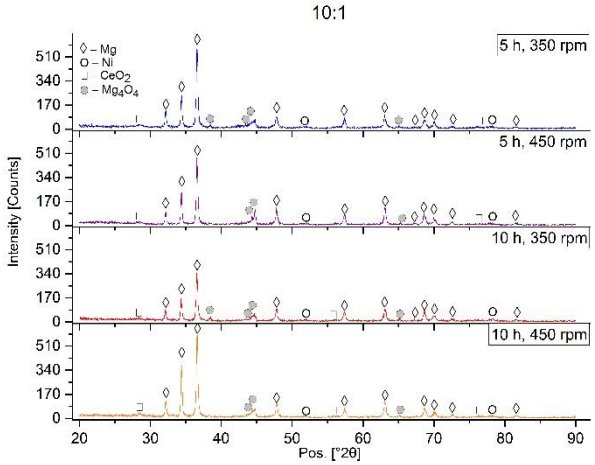
3-сурет. Алынған ұнтақ қоспаларының бөлшектерінің орташа мөлшері (мкм)

Рентгендік дифрактограммалардың талдау нәтижелері бойынша барлық қоспалардың фазалық құрамының негізі алтыбұрышты кристалдық тормен сипатталатын, кеңістік тобы P-63/mmc, тор параметрлері a = b = 3,212 Å, c = 5,215 Å болатын Mg фазасы болып табылады.

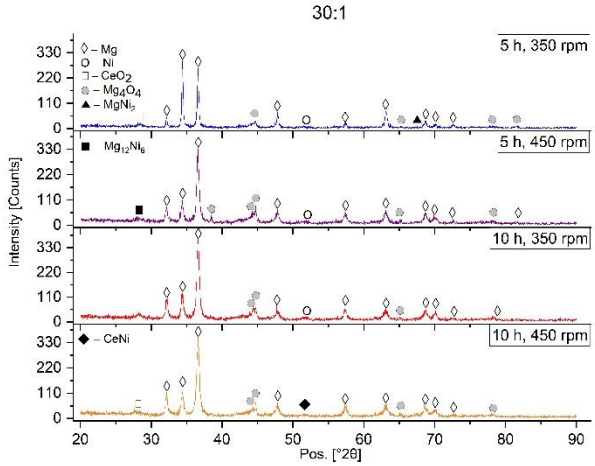
Ұнтақтау шарларының 1:10 қатынасында бастапқы Mg және Ni фазалары сақталып, жаңа интерметалдық қосылыстардың түзілуі байқалмайды. Бұл ұнтақтау шарларының саны аз болғандықтан, механосинтез процесі кезінде жүйеге берілетін механикалық энергия жеткіліксіз болғанын көрсетеді.

Ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:30 қатынасында алынған қоспаларда интерметалдық фазалардың ($MgNi_2$, $Mg_{12}Ni_6$, CeNi) қарқынды түзілуі байқалады. Яғни, ұнтақтау шарларының көп мөлшері процестің белсенді жүруіне және жаңа фазалардың қалыптасуына ықпал еткен. Бұл жоғары механикалық әсердің арқасында фазалық өзгерістердің күшеюін көрсетеді.

Шеррердің математикалық есептеу әдісін қолдана отырып (1), негізгі фазалардың барлық кристаллиттерінің орташа өлшемі 60 нм құрайтыны анықталды.



а) ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:10 қатынасында алынған қоспалар



б) ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:30 қатынасында алынған қоспалар

4-сурет. Алынған қоспалардың дифрактограммалары

Механосинтез кезіндегі айналу жылдамдығының өзгеруі шыңдардың қарқындылығының төмендеуіне және олардың кеңеюіне айтарлықтай әсер етеді. Бұл құбылыс ұнтақ бөлшектеріне берілетін механикалық энергияның ұлғаюымен және синтез процесі кезіндегі үйкеліс әсерінің күшеюімен түсіндіріледі.

Сонымен қатар, Се оксидтерінің болуы, әдеби деректерге сәйкес [34], Mg оксидтерінің беткі концентрациясын төмендетуі тиіс және бұл микроструктуралық өзгерістер арқылы ауадағы оттегімен әрекеттесу кезінде материалдың тотығуға төзімділігінің жақсарғанын көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Mg-Ni-Ce ұнтақ қоспасының морфологиясына механосинтез параметрлерінің әсерін бағалау мақсатында негізгі факторларға талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде механосинтездің басты параметрлері – үдеу мен ұзақтығы анықталды. Сонымен қатар, ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың қатынасының жаңа интерметалл фазаларының түзілуіне айтарлықтай ықпал ететіні көрсетті.

Микроскопиялық талдау нәтижелері ұнтақтау шарларының 1:30 қатынасында синтезделген қоспалардағы бөлшектердің орташа өлшемі 7,59 мкм, ал 1:10 қатынасында алынған қоспаларда 13,76 мкм екенін анықтады.

Жүргізілген морфологиялық талдау ең жоғары дисперсияға қол жеткізу үшін оңтайлы параметрлер № 4 қоспа параметрлері екенін көрсетті. Жалпы зерттеу нәтижелері бойынша ұнтақтау үшін ең тиімді қатынас 1:30 екені анықталды.

Алғыс

Бұл жұмыс AP19574566 «Mg-Ni-Ce негізіндегі сутегі сақтау материалдарын жасау» тақырыбы бойынша, 2023–2025 жылдарға арналған ғылыми және ғылыми-техникалық жобалар бойынша жас ғалымдарға гранттық қаржыландыру жобасы шеңберінде жүзеге асырылды.

Авторлар Сутегі энергетикасы саласындағы технологиялық құзыреттер орталығының ұжымына зерттеуді жүргізуге көрсеткен қолдаулары мен көмектері үшін шынайы алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

1. Arto I., Capellán-Pérez I., Lago R., Bueno G., Bermejo R. The energy requirements of a developed world // Energy Sustain Dev. – 2016. – Vol. 33. – P. 1–13.
2. Развитие водородной энергетики в Казахстане: встреча Токаева с главами немецкой Svevind Group // https://kazpravda.kz/n/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-kazahstane-tokaev-vstretilsya-s-glavoy-nemetskoy-svevind-group/ (дата обращения 17.10.2022). [Development of Hydrogen Energy in Kazakhstan: Tokayev Meets with Head of German Svevind Group // https://kazpravda.kz/n/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-kazahstane-tokaev-vstretilsya-s-glavoy-nemetskoy-svevind-group/]
3. Предложение Токаева лидерам тюркских стран о создании международного консорциума по развитию водородной энергетики // https://informburo.kz/novosti/tokaev-vystupil-na-sammite-soveta-sotrudnichestva-tyurkskih-gosudarstv (дата обращения 17.10.2022). [Predlozhenie Tokaeva lideram tyurkskikh stran o sozdanii mezhdunarodnogo konsortsiuma po razvitiyu vodorodnoy energetiki (In Russ.)]
4. Совещание главы государства по вопросам развития электроэнергетической отрасли // https://akorda.kz/ru/glava-gosudarstva-provel-soveshchanie-po-voprosam-razvitiya-elektroenergeticheskoy-otrasli-2641240 (дата обращения 17.10.2022). [The Head of State held a meeting on the development of the electric power industry // https://akorda.kz/en/the-head-of-state-held-a-meeting-on-the-development-of-the-electric-power-industry-2641630]
5. Wiedenhofer D., Lenzen M., Steinberger J. K. Energy requirements of consumption: Urban form, climatic and socio-economic factors, rebounds and their policy

implications // Energy policy. – 2013. – Vol. 63. – P. 696–707.
6. Mesarić P., Krajcar S. Home demand side management integrated with electric vehicles and renewable energy sources // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 108. – P. 1–9.
7. Jacobson M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security // Energy & Environmental Science. – 2009. – Vol. 2. – No. 2. – Vol. 148–173.
8. Acar C., Dincer I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment // Journal of cleaner production. – 2019. – Vol. 218. – P. 835–849.
9. Niaz S., Manzoor T., Pandith A. H. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 50. – P. 457–469.
10. Ley, M. B., Jepsen, L. H., Lee, Y.-S., Cho, Y. W., Bellosta von Colbe, J. M., Dornheim, M., et al. Complex hydrides for hydrogen storage – new perspectives // Materials Today. – 2014.– Vol. 17(3). – P. 122–128.
11. Shin-ichi Orimo, Yuko Nakamori, Jennifer R. Eliseo, Andreas Züttel, and Craig M. Jensen. Complex Hydrides for Hydrogen Storage // Chemical reviews. – 2007. – Vol. 107. – P. 4111–4132.
12. Jiuyi Zhu, Yuchen Mao, Hui Wang, Jiangwen Liu, Liuzhang Ouyang, and Min Zhu. Reaction Route Optimized LiBH4 for High Reversible Capacity Hydrogen Storage by Tunable Surface-Modified AlN // ACS Appl. Energy Mater. – 2020. – Vol. 3(12). – P. 1964–11973.
13. Zhenglong Li, et al. Catalyzed LiBH4 Hydrogen Storage System with In Situ Introduced Li3BO3 and V for Enhanced Dehydrogenation and Hydrogenation Kinetics as Well as High Cycling Stability // ACS Appl. Energy Mater. – 2022. – Vol. 5(1). – P. 1226–1234.
14. Haizhen Liu et al. Aluminum hydride for solid-state hydrogen storage: Structure, synthesis, thermodynamics, kinetics, and regeneration // Journal of Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 52. – P. 428–440.
15. Лукашев Р.В. Водород-аккумулирующие и водород-генерирующие системы MgH_2–C и AlH_3–C // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 2(58). – С. 39-46. [Lukashev R.V. Vodorod-akkumuliruyushchie i vodorod-generiruyushchie sistemy MgH_2–C i AlH_3–S // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. – 2008. – No. 2(58). – P. 39–46. (In Russ.]
16. Kojima, Y. Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – P. 18179–18192.
17. J. Song, J. She, D. Chen, F. Pan. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide // Journal of Magnesium and Alloys. – 2020. Vol. 8. – P. 1–41.
18. Huang, C., Feng, Y., Wang, J., Liu, C., & Li, D. Effects of noble metal modification on the performance of $LaNiO_3$ catalyst for hydrogen production from ethanol steam reforming // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44(22). – P. 11326–11337.
19. Wang H., Lin, H. J., Cai, W. T., Ouyang, L. Z., Zhu, M. Tuning kinetics and thermodynamics of hydrogen storage in light metal element based systems – A review of recent progress // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. Vol. 658. – P. 280–300. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.090
20. Ding, Z., Li, Y., Lu, Y., et al. Tailoring MgH_2 for hydrogen storage through nanoengineering and catalysis // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – Vol. 10, Issue 11. – P. 2946–2967. https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.028
21. Li, Q., Lu, Y., Luo, Q., et. al. Thermodynamics and kinetics of hydriding and dehydriding reactions in Mg-based hydrogen storage materials // Journal of Magnesium and Alloys. – 2021. – Vol. 9, Issue 6. – P. 1922–1941. https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.10.002
22. Cong Peng, Yongtao Li, Qingan Zhang. Enhanced hydrogen desorption properties of MgH_2 by highly dispersed Ni: The role of in-situ hydrogenolysis of nickelocene in ball milling process // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 900. – P. 163547. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163547
23. Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang, Hongchao Kou, De/hydrogenation kinetics against air exposure and microstructure evolution during hydrogen absorption/desorption of Mg-Ni-Ce alloys // Renewable Energy. – 2017. – Vol. 113. – P. 1399–1407. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.102
24. Lin, H.-J., Zhang, C., Wang, H., Ouyang, L., Zhu, Y., Li, L., et al. Controlling nanocrystallization and hydrogen storage property of Mg-based amorphous alloy via a gas-solid reaction // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 685. – P. 272–277. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.286
25. Varin R.A, Zbroniec L, Polanski M, Bystrzycki J. A review of recent advances on the effects of microstructural refinement and nano-catalytic additives on the hydrogen storage properties of metal and complex hydrides // Energies. – 2011. – Vol. 4. – P. 1–25.
26. Huot, J., Ravnsbæk, D. B., Zhang, J., Cuevas, F., Latroche, M., & Jensen, T. R. Mechanochemical synthesis of hydrogen storage materials // Progress in Materials Science. – 2013. – Vol. 58(1). – P. 30–75. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.07.001
27. Kozhakhmetov, Y., Skakov, M., Wieleba, W., Sherzod, K., Mukhamedova, N. Evolution of intermetallic compounds in Ti-Al-Nb system by the action of mechanoactivation and spark plasma sintering // AIMS Materials Science. – 2020. – Vol. 7 (2). – No. 182. – P. 182–191.
28. Floriano R. et al. Cold rolling of MgH_2 powders containing different additives // Int. J. Hydrogen Energy. Elsevier Ltd. – 2013. – Vol. 38 (36). – P. 16193–16198.
29. Zhou C., Peng Y., Zhang Q. Growth kinetics of MgH_2 nanocrystallites prepared by ball milling // Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – Vol. 50. – P. 178–183.
30. Pukazhselvan D., Capurso G., Maddalena A., Lo Russo S., Fagg D.P. Hydrogen storage characteristics of magnesium impregnated on the porous channels of activated charcoal scaffold // International journal of hydrogen energy. – 2014. – Vol. 39. – No. 35. – P. 20045–20053.
31. Rahmalina D. et al. The recent development on MgH2 system by 16 wt% nickel addition and particle size reduction through ball milling: a noticeable hydrogen capacity up to 5 wt% at low temperature and pressure // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – No. 53. – P. 29046–29058.
32. Dornheim M. et al. Hydrogen storage in magnesium-based hydrides and hydride composites // Scripta Materialia. – 2007. – Vol. 56. – No. 10. – P. 841–846.

33. Xu, Y.; Li, Y.; Hou, Q.; Hao, Y.; Ding, Z. Ball Milling Innovations Advance Mg-Based Hydrogen Storage Materials Towards Practical Applications // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 2510. https://doi.org/10.3390/ma17112510

34. Chen X, Xie FQ, Ma TJ, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded Ti_2AlNb alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 646. – P. 490–496.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНОСИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

Н. М. Мухамедова, А. Ж. Миниязов, О. Өкен*, Ж. Н. Оспанова, А. А. Сабыртаева, К. С. Шайкиева, Т. Д. Ахмеди

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: oken@nnc.kz*

В настоящей статье представлен анализ зависимости фазовых и морфологических изменений в порошковом составе системы Mg-Ni-Ce от парметров механосинтеза. В процессе проведения механосинтеза, выявлено, что на изменения структурных характеристик материала, помимо параметров ускорения и продолжительности, значительное влияние оказывает соотношение порошка и измельчающих шаров. Результаты микроскопического анализа показали, что при соотношении порошка и шаров 1:10 средний размер частиц в синтезированных смесях составляет 13,76 мкм. В то же время, при применении соотношения 1:30 размер частиц уменьшается до 7,59 мкм. Установлено, что основной фазой во всех образцах является магний. Однако при соотношений 1:30 наблюдается формирование гексагональной кристаллической решетки фазы MgNi и образование фазы CeNi.

Ключевые слова: *механосинтез, механическая активация, порошковая смесь, водород, магний.*

EVALUATION OF THE EFFECT OF MECHANOSYNTHESIS PARAMETERS ON THE MORPHOLOGY OF A MAGNESIUM-BASED POWDER COMPOSITION

N. M. Mukhamedova, A. Zh. Miniyazov, O. Oken*, Zh. N. Ospanova, A. A. Sabyrtayeva, K. S. Shaikieva, T. D. Akhmedi

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: oken@nnc.kz*

This article presents an analysis of the dependence of phase and morphological changes in the powder composition of the Mg-Ni-Ce system on the parameters of mechanical synthesis. During the mechanical synthesis process, it was found that, in addition to acceleration and duration parameters, the ratio of powder to milling balls has a significant influence on changes in the structural characteristics of the material. The results of the microscopic analysis showed that with a powder-to-ball ratio of 1:10, the average particle size in the synthesized mixtures is 13.76 μm. At the same time, when applying a ratio of 1:30, the particle size decreases to 7.59 μm. It was established that magnesium is the primary phase in all samples. However, at a ratio of 1:30, the formation of the hexagonal crystal lattice of the MgNi phase and the emergence of the CeNi phase are identified.

Keywords: *mechanofusion, mechanical activation, powder mixture, hydrogen, magnesium.*