

**С. Опахай\*, К.А. Кутербеков, С.А. Нұркенов**

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.,

\*e-mail: serikjan\_0707@mail.ru

## **МЕТАЛЛ ТІРЕУІШІ НЕГІЗІНДЕГІ ҚАТТЫ ОКСИДТІ ОТЫН ЭЛЕМЕНТТЕРІ ҮШІН NiAl ИНТЕРМЕТАЛДЫҚ ҚОСЫЛЫСЫНЫҢ СИНТЕЗІ**

Кеуекті металдарды қолданудың перспективті бағыттарының бірі металл тіреуіші негізіндегі қатты оксидті отын элементтері болып табылады. Қазіргі таңда металл тіреуішті құрылым тіреуіш міндетін керамикалық электрод немесе электролит атқаратын қатты оксидті отын элементтерімен салыстырғанда жылдам іске қосылу, зор сенімділік, механикалық тұрақтылық, термоциклденуге төзімділігіне байланысты үлкен қызығушылық тудыруда. Сонымен қатар, отын элементтерінің құнын кеуекті металл пластинасын тірек қызметін орындайтын құрылымға көшіру арқылы азайтуға болады, мұнда электролиттер мен электродтар жұқа пленка түрінде жабылады. Көп жағдайда тот баспайтын болаттар қатты оксидті отын элементтерінің металл тіреуіштерін дайындау үшін қолданылады, өйткені олардың жылулық кеңею коэффициенттері отын ұяшықтарының басқа компоненттерінікіне жақын болады және тотығу процесіне жоғары төзімділік көрсетеді. Алайда, жоғары температурада Fe, Cr металды негіз бен анодты Ni арасында реакция жүреді, бұл анодтың каталитикалық белсенділігінің төмендеуіне әкеледі. Осы мәселені шешудің тиімді жолы Ni немесе NiAl интерметаллидті қосылысы негізіндегі металл тіреуіштерін дайындау болып табылады. Сондықтан аталған шолу мақалада әлемдік ғалымдардың NiAl интерметалдық қосылыстарды синтездеу ерекшеліктері мен әдістері, синтез термодинамикасы, сипаттамалары, процесс параметрлері және реакцияның ерекшеліктері туралы жазған еңбектерін егжей-тегжейлі талқылаймыз.

**Түйін сөздер:** қатты оксидті отын элементтері (ҚООЭ), металл тіреуіші, интерметалды қосылыстар, жылулық жарылыс, адиабатикалық температура.

S. Opakhai\*, K.A. Kuterbekov, S.A. Nurkenov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan,

\*e-mail: serikjan\_0707@mail.ru

### **Synthesis of NiAl intermetallic compound as a metal support for solid oxide fuel cells**

One of the promising areas of application of porous metals are solid oxide fuel cells on a metal base. Structures with a metal base are of great interest due to the possibility of quick start, greater reliability, mechanical stability, resistance to thermal cycling in comparison with solid oxide fuel cells in which ceramic electrodes or electrolyte are used as the supporting base. In addition, the cost of fuel cells can be reduced by moving to a design in which a porous metal plate performs the supporting function, and the electrolyte and electrodes are deposited in the form of thin films. In most cases, stainless steel is used for the manufacture of supporting metal substrates for SOFCs because they have a coefficient of thermal expansion (CTE) close to that of other components of the fuel cell and high oxidation resistance. However, at high temperatures, a reaction occurs between Fe, Cr from the metal base and Ni from the anode, which leads to a decrease in the catalytic activity of the latter. To solve this problem, the interaction of Cr with Ni is the manufacture of metal bases based on Ni, Ni-Al intermetallic compounds. In this review, we discuss in detail the work of world scientists on the synthesis of Ni-Al intermetallic compounds, especially methods, synthesis thermodynamics, characteristics, process parameters, and reaction features.

**Key words:** solid oxide fuel cells (SOFC), metal substrate, intermetallic compounds, thermal explosion, adiabatic temperature.

С. Опахай\*, К.А. Кутербеков, С.А. Нуркенов

Евразийский национальный университет имени Л.Н Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан,

\*e-mail: serikjan\_0707@mail.ru

**Синтез NiAl интерметаллического соединения  
в качестве металлической основы  
для твердооксидных топливных элементов**

Одной из перспективных областей применения пористых металлов являются твердооксидные топливные элементы на металлической несущей основе. Конструкции с металлической основой представляют повышенный интерес, благодаря возможности быстрого запуска, большей надежности, механической стабильности, стойкости к термоциклированию по сравнению с твердооксидными топливными элементами у которых в качестве несущей основы используются керамические электроды или электролит. Кроме того, стоимость топливных элементов может быть снижена при переходе к конструкции, в которой несущую функцию выполняет пористая металлическая пластина, а электролит и электроды нанесены в виде тонких пленок. В большинстве случаев для изготовления несущих металлических основ твердооксидных топливных элементов используют нержавеющие стали вследствие того, что они имеют коэффициент термического расширения (КТР), близкий к КТР других компонентов топливного элемента, и высокую стойкость к окислению. Однако при высоких температурах происходит реакция между Fe, Cr из металлической основы и Ni из анода, что приводит к снижению каталитической активности последнего. Для решения этой проблемы взаимодействие Cr с Ni является изготовление металлических основ на базе Ni, интерметаллических соединений Ni-Al. В настоящем обзоре мы подробно обсуждаем работы мировых ученых по синтезу интерметаллических соединений Ni-Al, особенно методы, термодинамика синтеза, характеристики, параметры процесса и особенности реакции.

**Ключевые слова:** твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), металлическая подложка, интерметаллические соединения, тепловой взрыв, адиабатическая температура.

## Кіріспе

Қатты оксидті отын элементтерінің металл тіреуішіндегі кеуекті металл қорытпасы анодқа, электролитке және катодқа механикалық тіреу көрсетеді, сонымен қатар электрлік байланыстырушы қызметін де атқарады. Бұл тіреуіштің артықшылығы – механикалық беріктігі, жылу соққыларына төзімділіктің жақсаруы, өзіндік құнының төмен болуы және жинау үшін металды біріктірудің дәстүрлі әдістерін (мысалы, лазерлік дәнекерлеу) қолдану мүмкіндігі болып табылады [1]. Әдетте металл тіреуіші – бұл кеуектілігі 35-45% және кеуек мөлшері 100 мкм дейін металл ұнтақтарын синтездеу арқылы жасалған кеуекті өткізгіш материал болады [2].

Металл тіреуіші негізіндегі қатты оксидті отын элементтері Ni, FeNi, NiCrAlY және тот баспайтын болаттан жасалған ферритті металдарды қоса алғанда әртүрлі металл құрамы бар субстратта дайындалды [1]. Көптеген құрастырушылар құрамында 10,5-26% Cr бар тот баспайтын болатты құнының төмендігі, жемірілуге төзімділігі және жылулық кеңею коэффициенттері қатты электролит материалдарына жақын болғандықтан металл тіреуіші ретінде ұсынады [2,3]. Ферритті тот баспайтын болаттағы хром мөлшері 10,5% асқан кезде, ме-

талл тіреуішті оның әрі тотығуынан қорғау үшін жұқа және өткізгіш хром қабыршақтары пайда болады. Бірақ Cr құрамы 26% жоғары болған кезде сынғыш сигма фазасының пайда болуы мүмкін. Ферритті тот баспайтын болаттың бірнеше жақсы қасиеттері бар, алайда Fe және Cr сияқты улы катиондардың каталитикалық қабатқа тасымалдануы анодтың каталитикалық қызметін төмендетеді [4].

Интерметалдық қосылыстар – екі немесе одан да көп металл немесе жартылай металды элементтерден тұратын, құрылымы реттелген және жақсы үйлескен стехиометриядан тұратын қатты фазалар ретінде анықталады [5-6]. Олар жоғары балқу температурасына ие және қоршаған орта температурасында әдетте сынғыш болады. Интерметалдық қосылыстар олардың аралас (металл және ковалентті) байланыстары мен күшті ішкі тәртібі арқасында қажетті магнитті [7], өткізгіштігі жоғары [8] және ерекше химиялық қасиеттерін [9] көрсете алады. Интерметалдық қосылыстардың кейбір маңызды конструкциялық қосымшалары құрылымдық тұрақтылыққа және олардың икемділігінің жақсаруына байланысты қолданысқа енгізілді. Дәстүрлі кеуекті бейорганикалық материал әдетте екі санатқа жіктеледі: кеуекті керамика [10] және кеуекті металдар [11]. Жақында

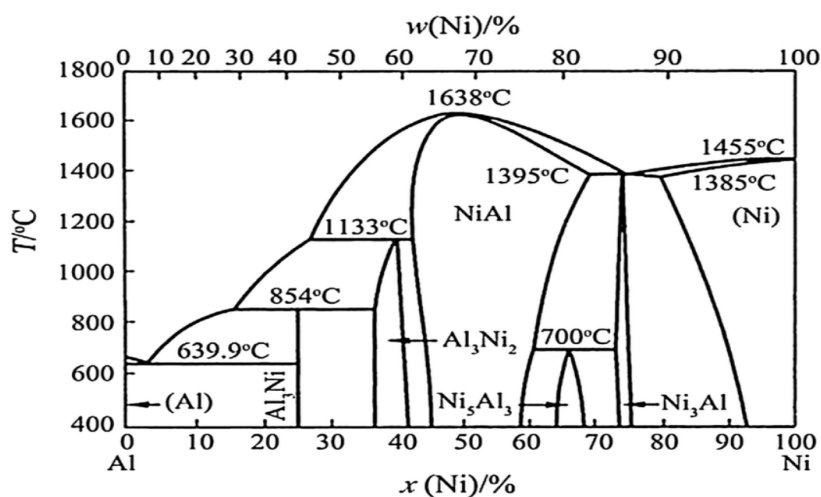
ғалымдар кеуекті материалдарды жасау технологиясына сүйеніп, металдар мен керамиканың үйлесімділігін ескере отырып әртүрлі заманауи маңызды материалдар ұсынды [12,13,14]. Атомды диффузия арқылы кеуекті интерметалдық қосылыстардың кеуек құрылымы қатаң заңдылықпен және өндірістік параметрлермен жақсы басқарылатындығын көрсетеді [13].

Кеуекті интерметалдық қосылыстарды жасау және пайдалану – бұл интерметалдық қосылыстардың материалы мен олардың сынғыштығына қарсы тұруға мүмкіндігін тудырады [12,13,14]. Қазіргі таңда кеуекті интерметалдық қосылыстар олардың құрылымдық және функционалды материал ретінде жылу соққыларына тамаша төзімділігі, бөлмедегі және жоғары температурадағы жақсы механикалық қасиеттері, жоғары құрылымдық тұрақтылық, жақсы жылу өткізгіштік, жемірілуге деген ерекше төзімділігі, жұмыс қабілеттілігі мен электр өткізгіштігі сияқты металдармен бірге керамиканың да артықшылықтарын біріктіретін көптеген қасиеттеріне негізделіп үлкен қызығушылық тудыруда [15].

NiAl интерметалдық қосылыстары ҚООЭ металл тіреуіші ретінде қолдануға үлкен мүмкіндіктер тудырады [16,17]. Өйткені ол жоғары механикалық беріктік, төмен тығыздық ( $5.86 \text{ г/см}^3$ ), жоғары балқу температурасы ( $1638^\circ\text{C}$ ), Янг модулінің жоғары деңгейі ( $294 \text{ ГПа}$ ), тотығуға төзімділігі ( $1000^\circ\text{C}$ ) сияқты маңызды құрылымдық қасиеттер жиынтығына ие болумен

қатар құнының төмендігі, қарапайым өндіру технологиясына ие болып табылады [18]. NiAl интерметалдық қосылыстары жоғары температурада Ni негізіндегі суперқорытпаларға потенциалды кандидат ретінде зерттелді, өйткені олардың коррозияға және тотығуға жоғары тұрақтылығы жоғары болады [19,20]. Металл тіреуіші негізіндегі қатты оксидті отын элементтері үшін кеуекті NiAl интерметалдық [21,22] қосылыстарының тағы бір тамаша қасиеттерінің бірі механикалық беріктігімен қатар химиялық және электрохимиялық әсерлерге төзімділігі болып табылады.

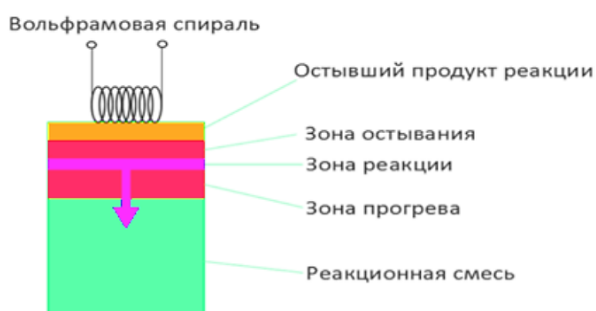
NiAl бинарлы фазалық диаграммасында бес түрлі интерметалдық қосылыс ( $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_5$ , NiAl,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) көрсетілген (сур. 1). Осы қосылыстардың ішінен NiAl әлі күнге дейін ғалымдардың ерекше қызығушылығын тудыруда, себебі ол жоғарыда айтқандай қатты оксидті отын элементтерінің металл тіреуіші ретінде тамаша кандидат болумен қатар бинарлы диаграммадан көріп тұрғанымыздай ең жоғары балқу температурасы, салыстырмалы түрде төмен тығыздығы, тамаша беріктігі және жоғары температурада коррозия мен тотығуға төзімділігі сияқты қасиеттерімен ерекшеленіп тұр. Сондықтан осы шолу мақалада NiAl интерметалдық қосылыстарын алу, синтездеу әдістері, процестің термодинамикасы мен реакциялардың жүру заңдылықтары жөніндегі әлемдік ғалымдардың еңбектерін егжей-тегжейлі талқылаймыз.



1-сурет – NiAl бинарлы фазалық диаграммасы

## NiAl синтездеу әдістері

Бүгінгі таңда NiAl интерметалдық қосылыстарын синтездеуде екі әдіс қолданылады: өздігінен жүретін жоғары температуралы синтез (ӨЖЖТС) және жылулық жарылыс әдісі (2-сурет). ӨЖЖТС әдісінің мәні мынада: бастапқы реагенттер қоспасының жұқа қабатындағы өзара әрекеттесу реакциясы жергілікті ауданда басталғаннан кейін жану реакциясы басталатын ыстық өнімдер есебінен жылытылатын бастапқы материалдарға жылу беру салдарынан бүкіл жүйеде өздігінен таралады. Мұнда жану процесі жүреді, онда өнімдердің пайда болуы жанудың себебі мен салдары болып табылады. Аталған синтез әдісі оны бейорганикалық қосылыстарды өндірудің қолданыстағы әдістерінен ерекшелетін бірқатар ерекшеліктерге ие болады. Оларға жоғары температура мен қысқа синтездеу уақыты, процесі басқару мүмкіндігі, энергияның төмен шығыны және жабдықтың қарапайымдылығы, өнімнің көп мөлшері мен оның тазалығы сияқты синтездеу мүмкіндігі т.б. кіреді [23-24].



2-сурет – Өздігінен жүретін жоғары температуралы синтез (<https://pikabu.ru/>)

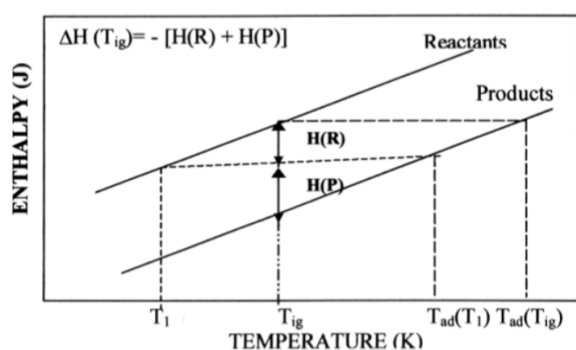
Жылулық жарылыс режимінде синтездеу кезінде реакциялық жүйенің бүкіл көлеміндегі температураның жоғарылауы уақыт өте келе оның өздігінен қызуына әкеледі [25]. Жылулық жарылыс режимінде ӨЖЖТС жасау үшін реакцияға қабілетті зат (көбіне гетерогенді ұнтақтар қоспасы) пешке орналастырылады, ол біркелкі қызады, яғни бүкіл көлем бойынша бірдей температураны алады. Егер осындай біркелкі жылыту кезінде химиялық реакцияның жылу бөлінуі байқалса, онда заттардың температурасы одан әрі көтеріледі (зат өздігінен қызады). Реакция жылдамдығының температураға экспоненциалды тәуелділігіне байланысты

зат көлеміндегі температураның жоғарылауы үдемелі өздігінен жүреді және температураның күрт секірісімен аяқталады, сондықтан бұл режим «өздігінен жану» немесе «жылулық жарылыс» деп аталады. Заттың бүкіл көлемінде бір мезгілде өзін-өзі жылыту салдарынан болған жылулық жарылыс кезінде заттың жоғары температурасы өнімнің синтезімен аяқталады [26].

## NiAl синтезінің термодинамикасы

Интерметалдық қосылыстарды синтездеу реакциясы экзотермиялық болып табылады [27]. Экзотермиялық түрленудің екі негізгі формасы бар: жылу жарылыс және қабаттық жану режимі [28]. Жылулық жарылыс режимі критикалық жағдайларға жеткенде реакция жүйесінің бүкіл көлеміндегі реакцияның жүруімен сипатталады. Жану режимінде химиялық реакция жылуы оның жергілікті аймағынан кейін тар аймақ түріне өздігінен қозғалады. Қазіргі таңда карбидтер, боридтер, нитридтер және басқалары сияқты бейорганикалық қосылыстардың түзілу процесінің термодинамикалық талдауда көптеген нәтижелерге қарамастан, интерметалдық қосылыстардың қалыптасу процесінің термодинамикалық талдау туралы деректер іс жүзінде жоқ. Кейбір қосылыстардың тек бағалау деректері ғана бар. Бұл аталған қосылыстардың анықтамалық әдебиетте тек жылулық түзілу мәндері ғана келтірілгенін, ал энтропия, жылу сыйымдылық, балқу жылуы сияқты мәндері жоқ екенін көрсетеді.

3-суретте ӨЖЖТС және жылулық жарылыс кезінде энергияның берілуі келтірілген. Егер бөлме температурасында реакция өздігінен жүрмесе, тұтану мүмкін болмас бұрын затты жоғары температураға дейін қыздыру керек (мысалы,  $T_1$  температурасына дейін). Егер сынама алдын-ала қыздырылса,  $H(R)$  жылу қабілетін тұтату температурасына дейін жоғарылату қажет (сәйкесінше  $T_1$  бастапқы жоғарырақ температурасында), бұл ӨЖЖТС реакциясына ықпал етеді. Алдын ала қыздыру температурасынан басқа, тұтану температурасына ( $T_{ig}$ ) жетпес бұрын көрші қабаттан жылу алынып тасталса, реакция өзін-өзі қамтамасыз ете алмайды. Бұл жылу өткізгіштігі мен жасыл тығыздығы жоғары компоненттердің ұнтақтарында пайда болуы мүмкін. Сондай-ақ, реагенттің үлкен бөлшектері реакцияның кинетикасы мен оның дәрежесін азайтады, осылайша адиабаталық температура ( $T_{ad}$ ) төмендейді.



3-сурет – Температура мен энтальпия диаграммасы

Реакция синтезіндегі маңызды параметр адиабатикалық температура болып табылады [30]. Реагенттерді өнімдерге айналдыратын реакция экзотермиялық болып табылады, ал реак-

ция жылдамдығы адиабатикалық жағдайларды қабылдау үшін жоғары болуы керек. Осылайша, қыздыру температурасы жылу жоғалтуымен адиабаттық температураның температурасына байланысты болады деп болжанады.  $T_{ad}$  реакция механизмдерін түсіну және жіктеу үшін пайдалы, сонымен қатар нақты реакция кезінде реагенттер мен өнімдерден күтілетін физикалық күйді көрсете алады. Егер  $T_{ad}$  реактивтердің де, өнімдердің де қайнау температурасынан төмен болса, онда реакция «газсыз» деп аталады (бу қысымы аз болған жағдайда). Егер  $T_{ad}$  реактивтер мен өнімдердің балку температурасынан төмен болса, онда реакция қатты күйде жүреді. Мұндай жағдайларда ұнтақтар алуға болатындығы туралы көптеген зерттеулерде айтылады [31]. Төменде 2-кестеде NiAl қосылыстары үшін адиабаталық температуралары көрсетілген.

1-кесте – ӨЖЖТС кезіндегі NiAl интерметалдық қосылыстардың түзілуінің адиабатикалық температуралары

Интерметалдық қосылыстар	$T_{балку}$ , К	$\Delta H_{298}^0$ , кДж/моль	$\Delta H_{ф.н.}^0$ , кДж/моль	$T_{ад}$ , К
Ni <sub>3</sub> Al	1668	153.35	34.94	1566
NiAl	1911	117.74	40.03	1911
Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	1405	170.95	29.43	1405
NiAl <sub>3</sub>	1127	114.39	23.61	1127

### Жұмыстарды талқылау

Ұшқын плазмасын пайдалану арқылы жылдам қосалқы агломерация немесе агломераттау технологиясы жоғары қыздыру мен тығыздаудың арқасында шоғырландырудың жаңа тәсілі ретінде қарастырылады. Қю техникасы импульсті электр тогын және металл ұнтақтарын тиімді сығымдау үшін қысымды қолдануды көздейді [32]. Ұшқын плазмасын қолдану кезінде қыздыру мен салқындату жылдамдығы өте жоғары болғандықтан, қажетті құрамдас бөліктері мен бөлшектерді, әртүрлі құрамдағы материалдарды агломерациялағанда оңай басқарылады. Ayodele O. және бірлескен авторлар [33] NiAl интерметалдық қосылысының механикалық қасиеттеріне синтез бен қыздыру жылдамдығының әсерін зерттеді. Бастапқы ұнтақтар ретінде TLS Technik GmbH (Германия) жеткізетін бөлшектердің орташа мөлшері 25 мкм (тазалығы 99,8%) болатын алюминий ұнтағы қолданылды. Стехиометриялық қатынастары

50% болатын никель мен алюминий ұнтақтарын құрғақ ортада ішкі диаметрі 100мм болатын тот баспайтын болаттан жасалған флаконға салды. Өлшемдері 3 мм және 7 мм болатын шарлар тегістеуіштер ретінде қолданылды.

Зерттеу нәтижесінде күйдірілген NiAl микроқұрылымдарының 50°C/мин және 150°C/мин қыздыру жылдамдығы кезінде микроқуыстардың бар екендігі анықталды. 100°C/мин кезінде күйдірілген NiAl үшін ең үлкен қуыстар анықталды. Күйдірілген NiAl рентгендік дифракциялық сызбасы оның шындырының үстемдік шыңы ретінде болатындығын көрсетеді, бірақ жылудың жоғарылауынан кейін шындырдың деңгейі минималды болды. Күйдірілген NiAl тығыздығы қыздыру жылдамдығы 50°C/минден 100°C/мин-қа дейін төмендейді, бұл қуаттың жеткілікті мөлшеріне және қуыстың пайда болу уақыты мен бөлшектердің төменгі қыздыру жылдамдығына үйлесуіне байланысты. Одан әрі жоғарылау 150°C/мин байқалды. Сонымен қатар, микроқаттылық қыздыру жылдамдығының жоға-

рылауымен артады. Синтезделген NiAl қыздыру жылдамдығы 1500°C/мин кезінде механикалық қасиеттерінің жақсарғанын көрсетті.

ӨЖЖТС – жоғарғы жылулық түзілу қасиетіне ие (118,4 кДж/моль) NiAl алудың тиімді әрі эффективті әдісі болып табылады [34]. A. Biswas және бірлескен авторлар [35] NiAl алуды термиялық жарылыс режимінде ӨЖЖТС әдісімен зерттеді. ӨЖЖТС жылулық жарылыс режиміндегі NiAl өңдеу 5-тен 60°C/мин аралығында әр түрлі қыздыру жылдамдығымен зерттелді. Үш түрлі мөлшердегі Ni бөлшектері қолданылды, ал эксперименттер вакуум мен аргон атмосферасында жүргізілді. Нәтижесінде жану кезіндегі үрдіс атмосфераға байланысты емес, бірақ қызу жылдамдығы мен сәйкесінше алдын-ала жану реакциясының дәрежесіне байланысты екенін көрсетті. Процесті модельдеу жылулық жарылыс жағдайындағы жану мен оның алдындағы реакцияға қыздыру жылдамдығының әсерін сипаттауға арналған. Авторлардың пікірінше, бұл модель тәжірибелік зерттеулер нәтижелерін ойдағыдай айқындай алады.

[36] жұмыста Ni<sub>3</sub>Al интерметалдық қосылысының ӨЖЖТС режимінде жануының синтезі зерттелді. Элементті ұнтақ қоспаларынан Ni<sub>3</sub>Al интерметалдық қосылыстарын өндіру ӨЖЖТС арқылы жүзеге асырылды. Сынаманың бастапқы тығыздығының, алдын-ала қыздыру температурасының және реагенттер бөлшектерінің мөлшерінің жану сипаттамаларына, сондай-ақ дайын өнімдердің құрамы мен морфологиясына әсері зерттелді. Жанудың процесінің сипаттамалары ғана емес, сонымен қатар өнімнің құрамы мен морфологиясы Ni және Al бөлшектерінің мөлшеріне, сынаманы алдын ала қыздыру температурасына және сынаманың бастапқы тығыздығына қатты тәуелді екені анықталды. Рентгендік дифракция анализі Ni<sub>3</sub>Al тұратын бір фазалы өнімдердің 200-ден 350°C дейінгі қыздыру температурасында жұқа Ni бөлшектерін қолдана отырып сынамалардан синтезделгенін көрсетті. Алдын ала қыздыру температурасының жоғарылауы Ni<sub>3</sub>Al түзілуін жақсартып қана қоймай, сонымен қатар дайын өнімдердің тығыздығын арттырды. Сонымен қатар, жанғыш өнімдердің тығыздығы жасыл үлгінің тығыздығын арттыру арқылы едәуір артқаны анықталды. Осы зерттеудің нәтижелері Ni<sub>3</sub>Al қосылысы түрлі салыстырмалы тығыздықтағы 50%-ден 93% дейінгі мөлшерде әртүрлі тәжірибелік жағдайларда ӨЖЖТС көмегімен сәтті алынғанын, соның ішінде сынаманың бастапқы тығыздығының,

реагенттің бөлшектерінің мөлшерін және алдын-ала қыздыру температурасының өзгеруін көрсетті.

Жоғары қуатты шар диірмендерінде механикалық легирлеу – бұл тепе-теңдік пен тепе-теңдіксіз металл фазаларының кең спектрін шығаруға қабілетті технологиялық процесс [37]. Сонымен қатар, Ni және Al ұнтақ қоспалары механикалық түрде араластырылған кезде олардың түзілуі ұнтақтау уақытында біртіндеп жүреді немесе кенеттен белгілі бір тегістеу уақытынан кейін пайда болатын механикалық қоздырылған реакцияның (МҚР) нәтижесінде пайда болады, ол тұтану уақыты деп аталады [38].

[39] жұмыста авторлар тегістеу параметрлерінің механикалық легирлеу арқылы NiAl интерметалдық қосылыстарының синтезіне әсерін зерттеді. NiAl интерметалдық қосылысы Spex диірменінде Ni және Al ұнтақтарының элементар қоспаларын механикалық легирлеу арқылы синтезделді. Қосылыстың түзілуі МҚР сәйкес болды, және тегістелетін айнымалылардың оның тұтану уақытына әсері факторлық конструкцияны қолдану арқылы анықталды. NiAl интерметалдық қосылысы Ni және Al ұнтақ қоспаларын механикалық легирлеуден кейін сәтті алынды. Сонымен қатар, қосылыстардың пайда болуы кезінде МҚР анықталды. Шарикті 7:1-ден 10:1-ге ауыстырған кезде оның ұнтаққа әсері басқаларға қарағанда едәуір жоғары екендігі және тұтанудың орташа уақыты 19 минут ішінде азайғандығы байқалды. Екінші жағынан, шарик және никель ұнтақтарын қолдану орташа тұтану уақытын сәйкесінше 5,7 және 4,6 минутқа арттырды. Сонымен қатар, қарастырылған механикалық легирлеу жағдайында шар-ұнтақ қатынасы, процесті басқарушы зат пен шарлар жиынтығы ұсақталған ұнтақтар бөлшектерінің орташа мөлшерін басқарады, бұл бір тегістеу параметрінің басқа айнымалылардың әсерін өзгерте алатындығын көрсетеді.

Енауәті және бірлескен авторлар [40] NiAl наноқұрылымды қосылысты планетарлық диірменде бастапқы элемент ұнтағынан механикалық легирлеу арқылы алды. Механикалық легирлеудің бұл жағдайында NiAl интерметалдық қосылысы Ni мен Al МҚР жағдайында емес, қабаттардың шекараларындағы тұрақты диффузиялық реакциясы нәтижесінде түзіледі.

Тұрақты химиялық, механикалық қасиеттері және металл мен керамикамен жақсы үйлесімділігін ескере отырып, интерметалдық қосылыстар атмосфералық плазмамен бүрку арқылы (АПБ) Mg қорытпасында жылулық

тосқауыл жабыны (ЖТЖ) ретінде дайындалады. Тұтқыр жабынның оңтайлы материалы мен қорғаныс сипаттамалары бар Mg қорытпасына арналған ЖТЖ әзірлеу үшін интерметалдық қосылыстардың байланыстырушы жабынының тұрақтылығы мен қорғалуын жүйелі түрде зерттеу керек.  $V_2$  құрылымы бар NiAl интерметалдық қосылысы оның төмен тығыздығы, жоғары балку температурасы, қоршаған ортаның деградациясына тамаша төзімділігі және жоғары температурада жақсы механикалық және химиялық тұрақтылығы сияқты керемет қасиеттерінің нәтижесінде үлкен қызығушылық тудыруда [41].

Х. Fan және бірлескен авторлар [42] NiAl интерметалдық қосылысын магний қорытпасындағы жылу тосқауылдары үшін байланыстырушы жабын ретінде зерттеді. Тұтқыр жабындар Mg қорытпасына жабылған 8YSZ ЖТЖ тұрақтылығын басқаруда маңызды рөл атқарады. Бұл зерттеуде Ni-Al қоспасынан металл реакциялық плазмалық бүрку (РПБ) көмегімен байланыстырушы жабын түрінде шашыратылды. Сонымен қатар, Ni-Al интерметалдық қосылысы ӨЖЖТС әдісімен алынды. Таза NiAl интерметалдық қосылысы байланыстырғыш жабын ретінде АПБ әдісі арқылы шашыратылды. Алынған байланыстырушы жабындардың микроқұрылымы, құрамы, адгезиялық тұрақтылығы және коррозияға төзімділігі Mg қорытпасы негізінде ЖТЖ үшін оңтайлы байланыстырушы жабынды табу негізінде зерттелді. Нәтижелер NiAl-дан тұратын байланыс қабаттары өте жақсы байланыс тұрақтылығын көрсететінін дәлелдеді. Жоғары Ni-Al РПБ әдісімен алынған жабындының беріктігі созылуға әкеледі. АПБ әдісі көмегімен алынған Ni-Al байланыстырғыш жабыны негізінен жылулық кеңею, жақсы механикалық және коррозияға төзімділік қасиеттерімен ерекшеленді.

ӨЖЖТС процестері сонымен қатар жүйенің динамикалық модельдері ретінде де белгілі. Іс жүзінде әртүрлі химиялық жүйелерде немесе әртүрлі өңдеу параметрлері бар тәжірибелер (мысалы, реагент ұнтақтарының сұйылту дәрежесі мен дән мөлшері) таралу режимдерінің кең спектрін көрсетті. Бұл динамикалық ерекшеліктер алынған өнімдердің табиғаты мен функционалды қасиеттеріне әсер етуіне байланысты қолданылу тұрғысынан эксперименталды түрде зерттелді [43].

[44] жұмыста интерметалдық қосылыстардың ӨЖЖТС динамикалық әрекетін зерттеді. ӨЖЖТС процестің әр түрлі гетерогенді химиялық кезеңдерін ескере отырып, сандық түрде

әртүрлі реакциялық энтальпиялармен қоса зерттелді. Реакцияға түсетін таблеткалардың бойлық осі бойымен және көлденең жазықтықта таралу тұрақсыздығы реакцияның энтальпиясымен байланысты болатыны анықталды. Бойлықтың тұрақты таралуы экзотермиялық жүйелердің көпшілігінде де, азында да байқалды. Көлденең және бойлық тұрақсыздықтардың өрістері өзара ерекше болып көрінеді. Экзотермиялықтың әртүрлі диапазондары  $H_0 = -53$  кДж/моль эталондық жағдайға қатысты қатты қосылыстың пайда болуының энтальпиясын өзгерту жолымен таза элементтерден жасалған интерметалдық қосылыстар ӨЖЖТС үшін зерттелді. Зерттелетін диапазон жойылу кезінен бастап энтальпия қалыптасуының маңызды мәндеріне дейінгі барлық маңызды жағдайларды қамтиды ( $-49$  кДж/моль  $\leq H_0 \leq -60$  кДж/моль). Жүйенің көлденең және бойлық тұрақсыздықтары анықталды, бірақ олардың таралу аумақтары өзара ерекше болып көрінді.

Жану синтезі (ЖС) интерметалдық қосылыстар, керамикалар, катализаторлар, композиттер мен қорытпалар сияқты заманауи материалдардың кең спектрін синтездеу мен өңдеудің маңызды әдісі ретінде жүзеге асырылады [45]. ЖС көбінесе компоненттер арасындағы химиялық реакцияның экзотермиялық сипатымен, жоғары температурамен, реакцияның қысқа уақытымен және процестің тәуелсіз жүруімен сипатталады [46]. ЖС материалдарды дайындаудың тартымды, тиімді және кең зерттелген әдісі болса да, реакция механизмдері мен процесс кинетикасына әсер ететін факторлар, әсіресе микроқұрылым деңгейінде әлі толық зерттелмеген әдіс болып табылады [47]. Процестің осы аспектілерін анықтау үшін әртүрлі зерттеушілер сандық моделдеуді қосымша талдау құралы ретінде пайдаланып келеді [48].

R. Nikbakht және бірлескен авторлар [49] NiAl ӨЖЖТС синтездеу процесін фаза-өрістік модельдеу әдісімен зерттеді. Фаза-өрістік модель интерметалдық қосылыстардың жоғары температуралы синтезін модельдеу үшін қолданылады. Модель термодинамикалық тұжырымға негізделген, оған химиялық реттелген фазалардың пайда болуы және сәйкес жылу шығарылуы кіреді. Бұл модельдің интерметалдық қосылыстардың жоғары температуралы синтезін модельдеудің алдыңғы тәсілдерінен айырмашылығы, микроқұрылым деңгейінде процестің кинетикасын талдауда қолданыла алады. Фазалық өріс моделі де

интерметалдық қосылыстардың жоғары температуралы синтезін модельдеу үшін сәтті қолданылып келеді. Ол микроқұрылымдық және жылу деңгейіндегі NiAl жоғары температуралық синтезінің негізгі ерекшеліктерін көрсетеді. Бір өлшемді және екі өлшемді моделдеу қатты никель мен сұйық алюминий арасындағы бөліну шекарасында химиялық реттелген интерметалды фазалардың тез түзілуін және оның қатты никель ядросы бағытында өсуін көрсетеді. Модель бөлшектер мөлшерінің ӨЖЖТС таралу жылдамдығына әсерін көрсету үшін де қолданылды.

Қазіргі таңда NiAl интерметалдық қосылыстарды синтездеу үшін ӨЖЖТС [50], жану синтезі мен ыстық престеу [51], шашырау [52] және лазерлік қаптау [53] сияқты перспективті әдістер кеңінен қолданылып келеді. Бұл әдістердің ішінде лазерлік қаптаудың ерекше маңызы бар, себебі ол шағын микроқұрылымға ие интерметалдық және интерметалдық композитті жабындыларды, сондай-ақ субстратпен металлургиялық қосылыстарды тиімді үйлестіре алады [54]. Сондықтан [55] жұмыста авторлар  $\text{Cr}_{18}\text{Ni}_9\text{Ti}$  тот баспайтын болаттан жасалған төсеніште NiAl интерметалдық қосылыстан жабын жасау үшін лазерлік қаптау әдісін пайдаланды.

Ni/Al 1:1 атомдық қатынасы бар коммерциялық қол жетімді Al (30-150 мкм, тазалығы 99,5%) және Ni (~75 мкм, тазалығы 99,0%) ұнтақтары лазермен қапталған NiAl интерметалдық жабынын жасау үшін бастапқы материалдар ретінде пайдаланылды. NiO,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ , сондай-ақ  $\text{Ni}_3\text{Al}$  фазаларынан тұратын глазурь қабаты жоғары температурада сырғудан кейін NiAl жабынының тозған бетінде қалыптасты. Бұдан басқа, ол NiAl интерметалл жабындарында 500°C төмен температурада керамикалық шариктен сырғанаған кезде абразивті тозу басым болды. NiAl интерметалдық жабындарда температура 500-ден 700°C-ге дейін көтерілген кезде пластикалық деформация және адгезивтік тозу басым болды. Температураның 900°C және одан әрі жоғарылауы NiAl интерметалдық жабыны трибохимиялық реакциялар арқылы жаңа оксид фазаларының пайда болуына байланысты тотығулық тозуға айналды. Сонымен қатар, жоғары температуралы трибологияда қолдану тұрғысынан NiAl интерметаллдық лазермен қапталған жабынның үйкелісті азайту қабілеті мен тозуға төзімділігі арасында ымыраға келу маңызды болуы мүмкін екені болжанды.

Бұл мақалада [56] реакция эволюциясы мен NiAl жану синтезіндегі аралық фазалар температураны дәл өлшеу және жылдам өшіру арқылы зерттелді. Реакция жүйесі ретінде әдеттегі Ni және Al ұнтақтарының орнына Ni және Al көп қабатты пленкалары қолданылды. Жану реакциясы адиабаттық жағдайға жақын жылулық жарылыс режимінде жүргізілді. Температура мен реакция жолдарын бақылау үшін бірнеше термодаралар қолданылды. Микроқұрылымның эволюциясын зерттеу үшін температураны орнында тіркеумен қатар жылдам өшіру әдісі қолданылды. Аралық фазаларды анықтауға көмектесу үшін реакция кезінде адиабатикалық температура құрамның функциясы ретінде есептелді. Тәжірибелік зерттеулер NiAl жану жүйесінің реакциясы алюминийдің үштен бірі балқытылғаннан кейін басталатынын көрсетті. Басынан аяғына дейін реакция үш сатыдан өтеді: бірінші кезеңде жүйенің температурасы алюминийдің балқу нүктесінен  $\text{NiAl}_3$  аралық фазасының ыдырау температурасына, яғни 854°C дейін артады.

Реакция механизмі бөліну шекарасында  $\text{NiAl}_3$  және  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  аралық фазаларының пайда болуымен сұйық алюминийде қатты никельді еріту болып табылады. Екінші сатыда температура 854°C-ден 1300°C дейін артады. Реакция әлі де алюминийдің сұйық ерітіндісінде никельді еріту болып табылады.  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  бастапқы стадияда бөліну шекарасында бола алады, бірақ бұл кезеңде жүйе тек екінші кезеңнің кейінгі бөлігінде никель мен сұйық алюминийдің қатты ерітіндісінен тұрады. Үшінші кезеңде температура шамамен 1300°C-тан 1810°C-қа реакция температурасына дейін көтеріледі. Бұл кезеңде реакция жылдамдығы алғашқы екі кезеңге қарағанда әлдеқайда жоғары. Ең жоғары температураға қол жеткізбес бұрын, үшінші сатыда Al (Ni) ерітіндісінде Ni үздіксіз ерітуге қосымша кем дегенде үш жағдай орын алады. Бұл қатты NiAl қаныққан Al (Ni) ерітіндісінен тұнуы, ал қалғаны Ni мен NiAl балқуы немесе ыдырауы болып табылады. Сондықтан бұл жағдайда жалғыз экзотермиялық реакция бірінші болғандықтан, ол осы кезең үшін басым механизм болуы керек.

### Қорытынды

Металл тіреуіші негізіндегі қатты оксидті отын элементтері отын элементтерінің келесі ұрпағы ретінде қарастырылады. Бұл қатты оксидті отын элементтері үшін металл тіреуіштерді пайдала-



ну отын ұяшығын өндірудің құнын төмендетеді және беріктігін арттырады. Сондықтан металл тіреуіші негізіндегі қатты оксидті отын элементтері үшін металл тіреуіштерін дұрыс таңдау маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Осы қысқаша шолу мақалада әртүрлі авторлардың NiAl интерметалдық қосылыстарының өндірісі мен синтезіне қатысты зерттеулерінің нәтижелерін егжей-тегжейлі талқыладық. Олар NiAl синтезінде әртүрлі әдістерді қолданды. Осы әдістердің ішінен көптеген авторлар өз зерттеулерінде ӨЖЖТС және жылулық жарылыс әдістерін кеңінен

пайдаланды. Зерттеулердің нәтижесі бойынша екі әдіс де перспективалы және ең жақсы сипаттамаларға ие, олар: жоғары температура мен қысқа синтез уақыттары, процесті басқару мүмкіндігі, энергияның төмен шығыны және құрал-жабдықтың қарапайымдылығы, өнімнің көп мөлшері және оның тазалығы сияқты синтездеу мүмкіндіктері болып табылады. Шолу мақалада сонымен қатар синтездің термодинамикасы да қысқаша талқыланды, нәтижесінде адиабатикалық температура интерметалдық қосылыстар синтезінде маңызды параметр болатындығы анықталды.

### Әдебиеттер

- 1 Tucker M.C. Progress in metal-supported solid oxide fuel cells: a review. *J Power Sources*. – 2010. – Vol.195. – P.4570-4582
- 2 Mahato N., Banerjee A., Gupta A., Omar S., Balani K. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review // *Progress in Materials Sci.* – 2015. – Vol.72. – P.141-337.
- 3 Franco T, Brandner M, Ru'ttinger M, Kunschert G, Venskutonis A, Sigl L.S. Recent development aspects of metal supported thin-film SOFC // *ECS Trans.* – 2009. – Vol.25. – P.681-688.
- 4 Rose L., Kesler O., Decès-Petit C., Troczynski T., Maric R. Characterization of porous stainless steel 430 for low and intermediate-temperature solid oxide fuel cell (SOFC) substrates // *Int J Green Energy*. – 2009. – Vol.6. – P.638-645
- 5 Horton J.A., Liu, C.T., George E.P. Shape memory properties of a two-phase NiAl plus Fe alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 1995. – Vol.192-193. – P.873-880.
- 6 H.Z. Cui, L.L. Cao, J. Wu. Unique microstructure of porous NiAl intermetallic compound prepared by combustion synthesis // *J. Porous Mater.* – 2012. – Vol.19. – P.415-422
- 7 Deluque Toro C.E., Ramos de Debiaggi S., Monti A.M. Study of cohesive, electronic and magnetic properties of the Ni–In intermetallic system // *Physica B: Condensed Matter*. – 2012. – Vol.407(16). – P.3236-3239.
- 8 H.X. Dong, Y.H. He, Y. Jiang, L. Wu, J. Zou, N.P. Xu, B.Y. Huang, C.T. Liu. Effect of Al content on porous Ni-Al alloys, materials science and engineering: structural materials, properties // *Microstructure Process*. – 2011. – Vol.528. – P.13-14
- 9 Alizadeh Mostafa, Mohammadi Gha□ar. Effect of Intrapulmonary Inhalation of Honey, Nigella Sativa and Curcumin on Liver Function in Patients with Chronic Liver Disease // *Mater. Lett.* – 2012. – Vol.67. – P.148-154
- 10 Hammel E.C, Iyhodaro L.R, Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review // *Ceramics International*. – 2014. – Vol.40. – P.15351-15370.
- 11 Медведев А.Б, Трунин Р.Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // *УФН*. – 2012. – Vol.182. – P.829-846
- 12 He Y.H., Jiang Y., Xu N.P., Zou J., Huang B.Y., Liu C.T., Liaw P.K. Fabrication of Ti-Al Micro/ Nanometer-Sized Porous Alloys through the Kirkendall Effect // *Advanced Materials*. – 2007. – Vol.19(16). – P.2102-2106.
- 13 Jiang Y., He Y.H., Xu N.P., Zou J., Huang B.Y., Liu C.T. Effects of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys // *Intermetallics*. – 2008. – Vol.16(2). – P.327-332.
- 14 Nakajima H. (2010). Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores // *Proc. of the Japan Academy, Series B*. – 2010. – Vol.86(9). – P.884-899.
- 15 Dong H.X., Jiang Y., He Y.H., Zou J., Xu N.P., Huang B.Y., Liaw P.K. Oxidation behavior of porous NiAl prepared through reactive synthesis // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – Vol.122(2-3). – P.417-423.
- 16 Han Y. Mechanical and tribological properties of NiAl/muscovite composites // *J. Alloy. Comp.* – 2018. – Vol.741. – P.765-774.
- 17 M.B. Rahaei, D. Jia. Processing behavior of nanocrystalline NiAl during milling, sintering and mechanical loading and interpretation of its intergranular fracture // *Eng. Fract. Mech.* – 2014. – Vol.132. – P.136-146.
- 18 Pike L.M., Chang Y.A., Liu C.T. Solid-solution hardening and softening by Fe additions to NiAl // *Intermetallics*. – 1997. – Vol.5(8). – P.601-608.
- 19 K. Matsuura, K. Ohsasa, N. Sueoka, M. Kudoh. Nickel monoaluminide coating on ultralow-carbon steel by reactive sintering // *Met. Mater. Trans A*. – 1999. – Vol.30(6). – P.1605-1612
- 20 J. Subrahmanyam, M. Vijayakumar. Self-propagating high-temperature synthesis // *J. Mater. Sci.* – 1992. – Vol.27. – P.6249-6273
- 21 Saraiva J.C., Santos D.B. Synthesis and Characterization of Ni-Al Intermetallics Compounds with Grain Refinement Em-

- phases // *Materials Science Forum*. – 2003. – Vol.426-432. – P.1619–1624. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.426-432.1619
- 22 Ren W.L., Guo J.T., Li G.S., Wu J.S. (2004). The critical temperature for brittle-to-ductile transition of intermetallic compound based on NiAl // *Materials Letters*. – 2004. – Vol.58(7-8). – P.1272-1276.
- 23 Найбороденко Ю.С., Итин В.И., Савицкий К.В. Экзотермические эффекты при спекании смеси порошков никеля и алюминия // *Изв.вузов.Физика*. – 1968. – №10. – С.27-35
- 24 Мержанов А.Г., Боровиная И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез неорганических соединений // *Докл.АН СССР*. – 1972. – Т.204. – № 2. – С.366-369.
- 25 Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез // *Физическая химия. Современные проблемы*. – М.: Химия – 1983. – С.6-45.
- 26 Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие // Под научной редакцией В.Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007.
- 27 Самсонов Г.В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия. – 1976. – 560 с.
- 28 Франк-Камснецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука. – 1967. – 491 с.
- 29 Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 1989. – 214 с
- 30 Barzykin V.V. Initiation of SHS processes // *of Pure Appl.Chem*. – 1992. – Vol.64(7). – P.909-918
- 31 Morsi K. Review: reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials // *Materials Science and Engineering*. – 2001. – Vol.A299. – P.1-15
- 32 Suarez M., Fernandez A., Menendez J.L., Torrecillas R.U., Hennicke J., Kessel T. Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials // *Sintering Applications*. – 2013. – P.320-342.
- 33 Ayodele O.O., Awotunde M.A., Adegbenjo A.O., Shongwe M.B., Obadele B.A., Olubambi P.A. Synthesis and heating rate effect on the mechanical properties of NiAl intermetallic compound // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – P.1-4.
- 34 Kubaschewski O, Alcock C.B, Spencer P.J. *Materials thermochemistry* 6th ed. – Oxford: Pergamon. – 1993.
- 35 Biswas A., Roy S.K., Gurumurthy K.R., Prabhu N., Banerjee S. (2002). A study of self-propagating high-temperature synthesis of NiAl in thermal explosion mode // *Acta Materialia*. – 2002. – Vol.50(4). – P.757-773. DOI:10.1016/s1359-6454(01)00387-1
- 36 Yeh C.L., Sung W.Y. Combustion synthesis of Ni3Al intermetallic compound in self-propagating mode // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2004. – Vol.384(1-2). – P.181-191. DOI:10.1016/j.jallcom.2004.04.116
- 37 Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // *Prog.Mater.Sci*. – 2001. – Vol.46. – P.1-184.
- 38 Takacs L. Self-sustaining reactions induced by ball milling // *Prog. Mater. Sci*. – 2002. – Vol.47. – P.355-414.
- 39 Kubaski E. T., Cintho O.M., Capocchi J.D. Effect of milling variables on the synthesis of NiAl intermetallic compound by mechanical alloying // *Powder Technology*. – 2011. Vol.214(1). – P.77-82.
- 40 Enayati M.H., Karimzadeh F., Anvari S.Z. Synthesis of nanocrystalline NiAl by mechanical alloying // *J. Mater. Process. Technol*. – 2008. – Vol.200. – P.312-315.
- 41 Wang Y., Wang Z., Yang Y., Chen W. The effects of ceria on the mechanical properties and thermal shock resistance of thermal sprayed NiAl intermetallic coatings // *Intermetallics*. – 2008. – Vol.16. – P.682-688.
- 42 Fan X., Zhu L., Huang W. Investigation of NiAl intermetallic compound as bond coat for thermal barrier coatings on Mg alloy // *J of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol.729. – P.617-626.
- 43 Varma A., Lebrat J.P. Combustion synthesis of advanced materials. *Chemical Engineering Science*. – 1992. – Vol.47(9-11). – P.2179-2194.
- 44 Gennari S., Maglia F., Anselmi-Tamburini U., Spinolo G. Dynamic behavior in self-propagating high-temperature synthesis of intermetallic compounds // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol.413(1-2). – P.232-238.
- 45 Patil K.C., Aruna S.T., Mimani T. Combustion Synthesis: An Update Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2002. – Vol.6. – P.507-512.
- 46 Karen S. Martirosyan. Carbon Combustion Synthesis of Ceramic Oxide Nanopowders // *Advances in Science and Technology*. – 2010. – Vol.63. – P.236-245.
- 47 McCauley J.W., Puszynski J.A. Historical perspective and contribution of US researchers into the field of self-propagating high-temperature synthesis (SHS)/combustion synthesis (CS): Personal reflections // *Intern. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. – 2008. – Vol.17(1).
- 48 Gunduz I.E., Fadenberger K., Kokonou M., Rebholz C., Doumanidis C.C. Investigations on the self propagating reactions of nickel and aluminum multilayered foils // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol.93(13). – P. 134-141.
- 49 Nikbakht R., Assadi H. Phase-field modelling of self-propagating high-temperature synthesis of NiAl // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol.60(10). – P.4041-4053.
- 50 Zhu S.Y., Bi Q.L., Niu M.Y., Yang J., Liu W.M. Tribological behavior of NiAl matrix composites with addition of oxides at high temperatures // *Wear*. – 2012. – Vol.274–275. – P.423-434.
- 51 Kurbatkina V.V., Patsera E.I., Levashov E.A., Timofeev A.N. Self-propagating high-temperature synthesis of single-phase binary tantalum-hafnium carbide (Ta,Hf) C and its consolidation by hot pressing and spark plasma sintering // *Ceramics Interna-*

tional. – 2018. – Vol.44(4). – P.4320-4329.

52 Singrathai S., Rachpech V., Niyomwas S. A Thermal Coating Process Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating Process // *Energy Procedia*. – 2011. – Vol.9. – P.398-403.

53 Zhang Y.L., Li J., Zhang Y.Y., Kang D.N. Evolution in microstructure and high-temperature oxidation behaviors of the laser-cladding coatings with the Si addition contents // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol.827. – P.154131.

54 Yu Y.J., Zhou J.S., Chen J.M., Zhou H.D., Guo C., Wang L.Q., Yang L.B. Preparation, microstructure and tribological behavior of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings // *Wear*. – 2012. Vol.274-275. – P.298-305.

55 Yu Y., Zhou J., Ren S., Wang L., Xin B., Cao S. Tribological properties of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings at elevated temperatures // *Tribology International*. – 2016. – Vol.104. – P.321-327.

56 P. Zhu, J.C. Li, C.T. Liu. Reaction mechanism of combustion synthesis of NiAl // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – Vol.A329-331. – P.57-68

## References

- 1 M.C. Tucker, *J. Power Sources*, 195, 4570-4582 (2010).
- 2 N. Mahato, A. Banerjee, et al, *Progress in Materials Science*, 72, 141-337 (2015).
- 3 T. Franco, M. Brandner, et al, *ECS Trans*, 25, 681-688 (2009).
- 4 L. Rose, O. Kesler, et al, *Int J Green Energy*, 6, 638-645 (2009).
- 5 J.A. Horton, C.T. Liu, and E.P. George *Materials Science and Engineering: A.*, 192-193, 873-880 (1995).
- 6 H.Z. Cui, L.L. Cao and J. Wu, *J. Porous Mater*, 19, 415-422 (2012).
- 7 Deluque Toro C.E., Ramos de Debiaggi S. and Monti A.M. *Physica B: Condensed Matter*, 407(16), 3236-3239 (2012).
- 8 H.X. Dong, Y.H. He, et al, *Microstructure Process*, 528, 13-14 (2011).
- 9 Alizadeh Mostafa, Mohammadi Ghaḡar. *Mater. Lett.*, 67, 148-154 (2012).
- 10 Hammel E.C, Ighodaro L.R and Okoli O.I. *Ceramics International*, 40, 15351-15370 (2014).
- 11 A.B. Medvedev, R.F. Trunin *UFN*, 182, 829-846 (2012). (in Russ)
- 12 Y.H. He, Y. Jiang, et al, *Advanced Materials*, 19(16), 2102-2106 (2007).
- 13 Y. Jiang, Y.H. He, et al, *Intermetallics*, 16(2), 327-332 (2008).
- 14 H. Nakajima, Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores, *Proc.. of the Japan Academy, Series B*. – 2010. – Vol.86(9). – P.884-899 (2010).
- 15 H.X. Dong, Y. Jiang, et al, *Materials Chemistry and Physics*, 122(2-3), 417-423 (2010).
- 16 Y. Han, *J. Alloy. Comp.*, 741, 765-774 (2018).
- 17 M.B. Rahaei, D. Jia, *Eng. Fract. Mech.*, 132, 136-146 (2014).
- 18 L.M. Pike, Y.A. Chang, and C.T. Liu, *Intermetallics*, 5(8), 601-608 (1997).
- 19 K. Matsuura, K. Ohsasa, et al, *Met. Mater. Trans A.*, 30(6), 1605-1612 (1999).
- 20 J. Subrahmanyam, M. Vijayakumar, *J. Mater. Sci.*, 27, 6249-6273 (1992).
- 21 J.C. Saraiva, D.B. Santos *Materials Science Forum*, 426-432, P.1619–1624 (2003).
- 22 W.L. Ren, J.T. Guo, et al, *Materials Letters*, 58(7-8), 1272-1276 (2004).
- 23 Yu.S. Nayborodenko, V.I. Itin, and K.V. Savitsky, *Izv.vuzov. Physics*, 10, 27-35 (1968). (in Russ)
- 24 A.G. Merzhanov, I.P. Borovinskaya, *Dokl. AN SSSR*, 204, 2, 366-369 (1972). (in Russ)
- 25 A.G. Merzhanov *Physical chemistry. Contemporary issues*, (Moscow, Chemistry, 1983), pp.6-45. (in Russ)
- 26 A.P. Amosov, I.P. Borovinskaya, and A.G. Merzhanov *Poroshkovaya tekhnologiya samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza materialov: Ucheb. posobiye*, (Moscow, Mechanical Engineering, 1, 2007). (in Russ)
- 27 G.V. Samsonov, I.M.Vinitzky, *Tugoplavkiye soyedineniya* (Moscow, Metallurgy, 1976), 560p. (in Russ)
- 28 D.A. Frank-Kamsnetskiy, *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike*, (Moscow, Science, 1967), 491p. (in Russ)
- 29 V.I. Itin, Yu.S. Nayborodenko, *Vysokotemperaturnyy sintez intermetallicheskih soyedineniy*, (Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 1989), 214p. (in Russ)
- 30 V.V. Barzykin, *Pure Appl.Chem.*, 64(7), 909-918 (1992).
- 31 K. Morsi, *Materials Science and Engineering*, A299, 1-15 (2001).
- 32 M. Suarez, A. Fernandez, et al, *Sintering Applications*, 320-342 (2013).
- 33 O.O. Ayodele, M.A. Awotunde, et al, *Materials Today: Proceedings*, 1-4 (2020).
- 34 O. Kubaschewski, C.B. Alcock, and P.J. Spencer *Materials thermochemistry* 6th ed., (Oxford: Pergamon, 1993).
- 35 A. Biswas, S.K. Roy, et al, *Acta Materialia*, 50(4), 757-773 (2002).
- 36 C.L. Yeh, W.Y. Sung, *Journal of Alloys and Compounds*, 384(1-2), 181-191 (2004).
- 37 C. Suryanarayana, *Prog.Mater.Sci.*, 46, 1-184 (2001).
- 38 L. Takacs, *Prog. Mater. Sci*, 47, 355-414 (2002).
- 39 E.T. Kubaski, O.M. Cintho and J.D. Capocchi *Powder Technology*, 214(1), 77-82 (2011).
- 40 M.H. Enayati, F. Karimzadeh, and S.Z. Anvari, *J. Mater. Process. Technol*, 200, 312-315 (2008).
- 41 Y. Wang, Z. Wang, et al, *Intermetallics*, 16, 682-688 (2008).

- 42 X. Fan, L. Zhu and W. Huang, *Journal of Alloys and Compounds*, 729, 617-626 (2017).
- 43 A. Varma, J.P. Lebrat, *Chemical Engineering Science*, 47(9-11), 2179-2194 (1992).
- 44 S. Gennari, F. Maglia, *Journal of Alloys and Compounds*, 413(1-2), 232-238 (2006).
- 45 K.C. Patil, S.T. Aruna and T. Mimani. *Combustion Synthesis: An Update Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6, 507-512 (2002).
- 46 K.S. Martirosyan, *Advances in Science and Technology*, 63, 236-245 (2010).
- 47 J.W. McCauley, J.A. Puszynski. *Int.J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 17(1), 58-75 (2008).
- 48 I.E. Gunduz, K. Fadenberger, et al, *Applied Physics Letters*, 93(13), 134-141 (2008).
- 49 R. Nikbakht, H. Assadi, *Acta Materialia*, 60(10), 4041-4053 (2012).
- 50 S.Y. Zhu, Q.L. Bi, et al, *Wear*, 274-275, 423-434 (2012).
- 51 V.V. Kurbatkina, E.I. Patsera, et al, *Ceramics International*, 44(4), 4320-4329 (2018).
- 52 S. Singrathai, V. Rachpech and S. Niyomwas, *Energy Procedia*, 9, 398-403 (2011).
- 53 Y.L. Zhang, J. Li, Y.Y. Zhang and D.N. Kang, *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 154131 (2020).
- 54 Y.J. Yu, J.S. Zhou, et al, *Wear*, 274-275, 298-305 (2012).
- 55 Yu Y., Zhou J., *Tribology International*, 104, 321-327 (2016).
- 56 P. Zhu, J.C. Li and C.T. Liu. *Materials Science and Engineering*, A329-331, 57-68 (2002).