

Қатты оксидті отын элементтеріне арналған анодтық материалдар: қысқаша шолу

С. Опахай*, К.А. Кутербеков, К.Ж. Бекмырза, А.М. Кабышев,
М.М. Кубенова, Ж.С. Зейнулла, Н.К. Айдарбеков

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев к., 2, Астана, Қазақстан

МАҚАЛА ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Алынған
30.05.2025

Түзетілген түрде алынды
22.07.2025

Қабылданды
25.08.2025

Түйін сөздер:

қатты оксидті отын элементтері;
анод қабатының материалдары;
перовскит құрылымдары;
Ni-YSZ композиттері;
электркаталитикалық белсенділік;
кокстауға төзімділік;
магнетрондық бүрку

АҢДАТПА

Бұл шолу қатты оксидті отын элементтеріне (ҚООЭ) арналған анодтық материалдардың құрылымы, қасиеттері және дамуына бағытталған. Шолуда дәстүрлі анодтар ретінде қолданылатын никель – иттрий тотығымен тұрақтандырылған цирконий диоксиді (Ni-YSZ) композиттерімен қатар, перовскитті және қос перовскитті құрылымдар, титан мен ванадий негізіндегі керамикалық материалдар сияқты озық баламалар қарастырылды. Әртүрлі синтез әдістері – золь-гель, қатты фазалық реакция, инфильтрация, магнетрондық бүрку – жаңа анодтық материалдарды әзірлеу жолында маңызды рөл атқаратыны толық баяндалды. Сонымен қатар, анод құрылымына өтпелі металдарды (мысалы, Mo, Ni, Co, Pd) енгізу арқылы легирлеудің материалдың электрөткізгіштігі мен каталитикалық белсенділігін едәуір арттыратыны көрсетілді. Мақалада сондай-ақ анодтық қабаттардың микроқұрылымдық сипаттамалары мен үштік фазалық шекаралар аймағы (ҮФС) арқылы электрхимиялық белсенділіктің артуына байланысты тұжырымдар жасалады. Нанобөлшектермен модификациялау және жұқа қабатты самариймен легирленген церий диоксиді (SDC) немесе гадолиниймен легирленген церий диоксиді (GDC) жаппаларымен қаптау арқылы анод бетінің белсенділігін күшейту және көміртектің шөгуді болдырмау жолдары бойынша әлемдік озық зерттеу жұмыстар талданып қарастырылды. Әдеби деректер мен олардың салыстырмалы талдау нәтижелері әртүрлі температура мен отын атмосфераларында тиімді жұмыс істей алатын, жоғары өнімді және ұзақмерзімді тұрақты анодтық материалдарды жобалау мен әзірлеуге негіз бола алатыны айтылды. Шолуда талданған зерттеу жұмыстары болашақта ҚООЭ технологияларын кең ауқымда қолдануға және олардың сенімділігін арттыруға зор ықпал етуі мүмкін.

1. Кіріспе

Отын элементтері – отынның химиялық энергиясын тікелей электр энергиясына айналдыратын жоғары тиімді электрхимиялық құрылғылар. Отын элементтері қолданылатын электролит түрлеріне байланысты бірнеше түрге бөлінеді: протоналмасу мембранасы бар отын элементтері, фосфор қышқылы негізіндегі отын элементтері, сілтілік отын элементтері және қатты оксидті отын элементтері. Солардың ішінде ҚООЭ ерекше орын алады, себебі олар бірегей артықшылықтарға ие. Бұл элементтер жоғары температурада (450-ден 1000 °C-қа дейін) жұмыс істейді және көмірсутектерді алдын ала өңдеусіз әртүрлі отын түрлерін пайдалануға мүмкіндік береді [1-3].

ҚООЭ жұмысының принципі отынды электрхимиялық түрлендіруге негізделген, мұнда иондық өткізгіштікке ие қатты оксидті электролит қолданылады. Элементтің негізгі құрамдас бөліктері – анод, катод және электролит. Анод тотықтыру электродының рөлін атқарады, катод тотықсыздандырушы электрод болып табылады, ал электролит O^{2-} иондарын катодтан анодқа тасымалдайды. Анод пен катодта жүретін электрхимиялық реакциялар электрон ағынын қалыптастырады, олар сыртқы тізбек арқылы өтіп, сыртқы тізбек арқылы электр тогының өтуін қамтамасыз етеді. Бұл процестер ҚООЭ стационарлық және мобильдік қолданулар үшін перспективті энергия көзіне айналдырады [4, 5].

*Corresponding author: S. Opakhai; E-mail address: serikjan_0707@mail.ru

Анод ҚООЭ негізгі элементтерінің бірі болып табылады, өйткені ол отынның электрохимиялық тотығуын қамтамасыз етеді және жоғары өнімділікті сақтау үшін бірнеше сипаттамаларға ие болуы тиіс. Оңтайлы анодтық материалдар жоғары өткізгіштікке (электрондық және иондық), кокстауға, күкіртке төзімділікке және жоғары температура мен химиялық реакциялар жағдайларында тұрақтылыққа ие болуы қажет. Сонымен қатар анодтың дамыған микроқұрылымы өте маңызды, себебі ол ҮФШ максималды аумағын қамтамасыз етеді, мұнда анодтық және катодтық реакциялар жүзеге асады [6].

ҚООЭ үшін классикалық анодтық материалдар никель-цирконий композиттері (Ni-YSZ) болып табылады, олар жоғары электрохимиялық белсенділік пен тұрақтылықпен сипатталады. Алайда, мұндай материалдар көмірсутекті жанармайда жұмыс істеген кезде кокстауға бейім және күкіртқұрамды қосылыстарға сезімтал болады. Осыған байланысты, перовскиттер, қос перовскиттер, хромиттер, титан қосылыстары және қабатты перовскиттер сияқты балама анодтық материалдарды әзірлеу белсенді жүргізілуде. Бұл материалдар жақсартылған тұрақтылыққа және жанармай ластағыштарына жоғары төзімділікке ие, бұл оларды әртүрлі жағдайларда қолдануға мүмкіндік береді [7, 8].

Отындық элементтердің жұмыс істеу тиімділігін шектейтін негізгі факторлардың бірі ретінде поляризациялық кедергі ерекше атап өтіледі. Осыған байланысты өтпелі металдардың (Ni, Co, Fe, Mn және т.б.) каталитикалық белсенділігін арттырудағы рөліне назар аударылды. Бұл металдардың оттегі иондарын тасымалдауды жеделдету, электрон өткізгіштікті күшейту және жанама реакцияларды азайтудағы маңызы нақты сипатталды. Әдебиеттерге сүйене отырып, қазіргі таңда ашық тұрған бірқатар ғылыми мәселелер көрсетілді: өтпелі металдардың каталитикалық белсенділігінің механизмі әлі толық ашылмағаны, олардың күкірт ұлануына төзімділігі мен ұзақ мерзімді тұрақтылығы жеткілікті деңгейде зерттелмегені, сондай-ақ поляризация шығындарын азайтуға бағытталған жаңа композициялық шешімдер қажеттілігі талданды [9].

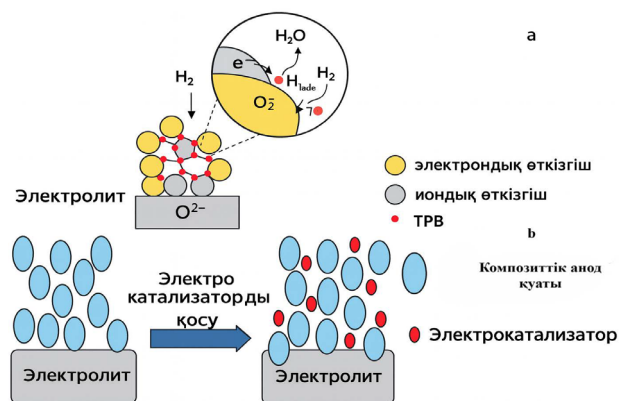
Бұл шолуда ҚООЭ үшін анодтық материалдар саласындағы заманауи жетістіктер, оның ішінде олардың синтезі, микроқұрылымы, электрохимиялық қасиеттері және тұрақтылығы қарастырылады. Сонымен қатар шолуда жаңа материалдарды әзірлеуге ерекше назар аударылған, олар сутегі, метан және басқа көмірсутектерде сенімді жұмыс

істеуді қамтамасыз етіп қана қоймай электролиттер мен катодтармен үйлесімді болуын қамтамасыз етуі керек.

2. Анодтық материалдар

Анод материалын таңдау ҚООЭ технологиясы үшін шешуші фактор болып табылады, өйткені ол электрохимиялық сипаттамаларға, микроқұрылымға және элементтерді дайындау тәсілдеріне байланысты. Анод материалының қажетті өнімділік деңгейі екі негізгі факторға негізделуі тиіс. Біріншіден, фазалардың ҮФШ үлкен ауданы анодтық реакцияларды барынша арттыруға көмектеседі. Электрохимиялық реакция фазалардың үштік шекарасында жүреді, мысалы, электрондық және оттегі ионын өткізетін материалдардың және газдың жанасу нүктесінде (1-сурет, а). Екіншіден, айтарлықтай дамыған кеуекті микроқұрылымы газдардың жылдам тасымалдануына және жанама өнімдердің реакциясына ықпал етеді. Сонымен қатар, анодтық материалдар тұрақты болуы, жоғары деңгейде электрондық өткізгіштікке ие болуы, элементтің басқа компоненттерімен термиялық үйлесімділігі және жоғары электрокаталитикалық белсенділігімен ерекшеленуі тиіс. Асыл металдарды қолдану фазалардың үштік шекарасының ұзындығын арттырып, заряд тасымалын айтарлықтай жеделдететінін және поляризация кедергісін төмендететінін көрсетті (1-сурет, б). Барлық осы факторлар поляризацияға байланысты шығындарды азайту арқылы жоғары өнімділікті анод жасауға ықпал етеді [10, 11].

Төмендегі кестеде әртүрлі модификацияланған анодтық материалдар мен оларды синтездеу әдістерінің нәтижелері бойынша әдебиеттер талданып, нәтижелері көрсетілген (1-кесте).



Сурет 1. (а) Анодтық материалдағы ҮФШ, (б) Металдық электрокатализатордың композиттік анод негізіндегі сызбасыю.

Кесте 1. Лантан-стронций-хром-марганец оксиді (LSCM) негізіндегі анод материалдары

№	Зерттелген материал/жүйе	Әдіс/тәсіл	Негізгі нәтижелер	Ғылыми мәселе/кемшілік	Тізімі
1	LSCM–LDC композиттік аноды	Модификацияланған золь-гель	LSCM – жоғары тотығу-тотықсыздану тұрақтылығы; LDC – кедергіні төмендетіп, өнімділікті арттырды. Оптималды құрам: LSCM 50% / LDC 50%. 800 °C-та H_2 : 0,081 Ом·см ² ; CH_4 : 0,130 Ом·см ²	LDC үлесі көбейгенде көміртек шөгуді жылдамдайды	Hanif және т.б. [12]
2	LSCM/YSZ + инфильтрацияланған LFC, LFCP	Инфильтрация, EIS	LFC нанобөлшектері енгізілгенде электрод белсенділігі айтарлықтай артты	Бастапқы LSCM/YSZ поляризациялық кедергісі жоғары	Rostaghi Chalaki және т.б. [13]
3	Мо-легирленген LSFN (LSFNM)	Золь-гель, XRD	Мо легирлеу кубтық құрылымды сақтады, өткізгіштік 0,75 → 2,8 См·см ⁻¹ ; қуат тығыздығы 740 → 975 мВт·см ⁻²	Жоғары температурада бастапқы LSFN ыдырайды	Li және т.б. [14]
4	Ni-легирленген LSCM	Синтез, сынақ	Қуат тығыздығы 114 → 153 мВт·см ⁻² ; Ni легирлеу оттегі вакансиясын арттырды, электр белсенділігін күшейтті	Легирленбеген LSCM төмен өнімділікті көрсетті	Cai және т.б. [15]

Кесте 2. Ni-GDC және хромит негізіндегі жеке перовскиттер

№	Зерттелген материал/жүйе	Әдіс/тәсіл	Негізгі нәтижелер	Ғылыми мәселе/кемшілік	Тізімі
1	Ni-GDC аноды	Бұрку әдісі	500 °C-та өнімділік 494,9 мВт/см ² ; жалпы тиімділік 40,1%-ға артты	Төмен температурада жеткіліксіз тұрақтылық мәселесі	Ryu және т.б. [16]
2	Ni-GDC + Au легирленген	Легирлеу, қабаттау	Жоғары тасымалдау қасиеттері; YSZ электролитімен үйлесімділік; Au қосылуы Se^{3+} тұрақтандырады; метан тотығуы жақсарды; Ni-Au қорытпасы карбонизацияны азайтты	Легирлеу күрделілігі, құнды металл қолдану қажеттілігі	Zaravelis және т.б. [17]
3	LSCr (Sr-легирленген LaCrO ₃)	Синтез, құрылымдық талдау	Cr оттегі тапшылығын және жақсы координацияны көрсетті	Таза LSCr каталитикалық белсенділігі төмен	Wei және т.б. [18]
4	LSCr + Ni, Mn, Fe, Co (LSCrM)	Легирлеу	Өткізгіштік артты, көміртек шөгінділері байқалмады	Қуат тығыздығы төмен (~50 мВт·см ²)	Meng және т.б. [19]
5	LSCrF(La _{0,75} Sr _{0,25} Cr _{0,5} Fe _{0,5} O _{3-δ})	Синтез, сынақ	Қуат тығыздығы 125 мВт·см ² ; 800 °C-та өткізгіштік 6,45 См·см ⁻¹	Ni-YSZ-ге қарағанда өнімділігі әлдеқайда төмен	Tu және т.б. [20]
6	LSCrM	Салыстыру	Электрөткізгіштік 0,222 См·см ⁻¹ ; қуат тығыздығы төмен	Жоғары температура талап етіледі, төмен реакциялық белсенділік	Li және т.б. [21]

Әдебиеттерге талдау нәтижесінде әртүрлі легирлеу және композиттеу тәсілдерінің анодтық материалдардың құрылымдық тұрақтылығы мен электрокаталитикалық белсенділігіне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Дегенмен, көміртек түзілуі, жоғары температурадағы ыдырау және бастапқы материалдардың жоғары поляризациялық кедергісі сияқты мәселелер өзекті

болып қала береді. Бұл кемшіліктерді жою жаңа композициялық шешімдерді іздеуді қажет етеді.

Төмендегі кестеде әртүрлі анодтық материалдардың синтез тәсілдері, құрылымдық ерекшеліктері мен электрохимиялық қасиеттеріне байланысты әдебиеттер талданып, нәтижелері көрсетілген (2-кесте).

Зерттеулер Ni-GDC негізіндегі анодтардың жоғары өнімділігін айқындағанымен, олардың төмен температурада тұрақтылығы шектеулі екені анықталды. Ау легирленуі тасымалдау қасиеттерін жақсартып, көміртек шөгуін азайтса да, қымбат металл қолдану қажеттілігі өндірістік тұрғыдан қиындық тудырады. LSCr және оның легирленген туындылары көміртекке төзімділік пен өткізгіштікті арттырғанымен, қуат тығыздығы мен каталитикалық белсенділігі Ni-YSZ жүйелерімен салыстырғанда төмен болып отыр.

3. Sr_2TiO_3 негізіндегі жеке перовскиттер

Zhou және әріптестері [22] La элементімен легирленген SrTiO_3 -ті ҚООЭ үшін анодтық материал ретінде қатты фазалық реакция әдісімен синтездеді. А-орындағы тапшылыққа байланысты материалдың иондық өткізгіштігі артады, бірақ электрондық өткізгіштігі төмендейді. $(\text{La}_{0,3}\text{Sr}_{0,7})_{0,93}\text{TiO}_{3-\delta}$ шамамен $0,2-1,6 \times 10^{-2}$ См/см иондық өткізгіштігін 500-950 °C диапазонында және $1,0 \times 10^{-2}$ См/см иондық өткізгіштігін 800 °C-та көрсетеді. Электрондық өткізгіштігі 50-950 °C аралығында шамамен 83-299 См/см құрап, 800 °C-та 145 См/см деңгейінде болады.

Ма және әріптестері [23] ҚООЭ үшін анодтық материал ретінде SrTiO_3 негізіндегі керамикалық материалдарды зерттеді. $\text{Sr}_{0,89}\text{Y}_{0,07}\text{TiO}_{3-\delta}$ (SYT) тамаша электрөткізгіштікті және тотығу-тотықсыздану тұрақтылығын көрсетеді. Синтезделген материалдар электролитпен термиялық және химиялық үйлесімді болып табылады. SYT материалының электрөткізгіштігі 800 °C-та шамамен 136 См/см, ал 600 °C-та 200 См/см құрайды. TiO_2 элементімен легирлеу электрөткізгіштікті одан әрі арттырады.

Escudero және әріптестері [24] марганец немесе галлий элементтерімен легирленген La-алмастырылған SrTiO_3 негізінде ҚООЭ үшін анодтық материал дайындады. Үлгі қатты фазалық реакция әдісімен дайындалып, әртүрлі сипаттамалары зерттелді. Материалдың электрөткізгіштігі 900 °C-та сәйкесінше 7,9 және 6,8 См/см құрады. Сондай-ақ, материалдың барлық қасиеттері, соның ішінде электрөткізгіштік, тор параметрлері және жылулық кеңею коэффициенті, Ga элементін Mn элементіне алмастырғанда нашарлайтыны байқалды.

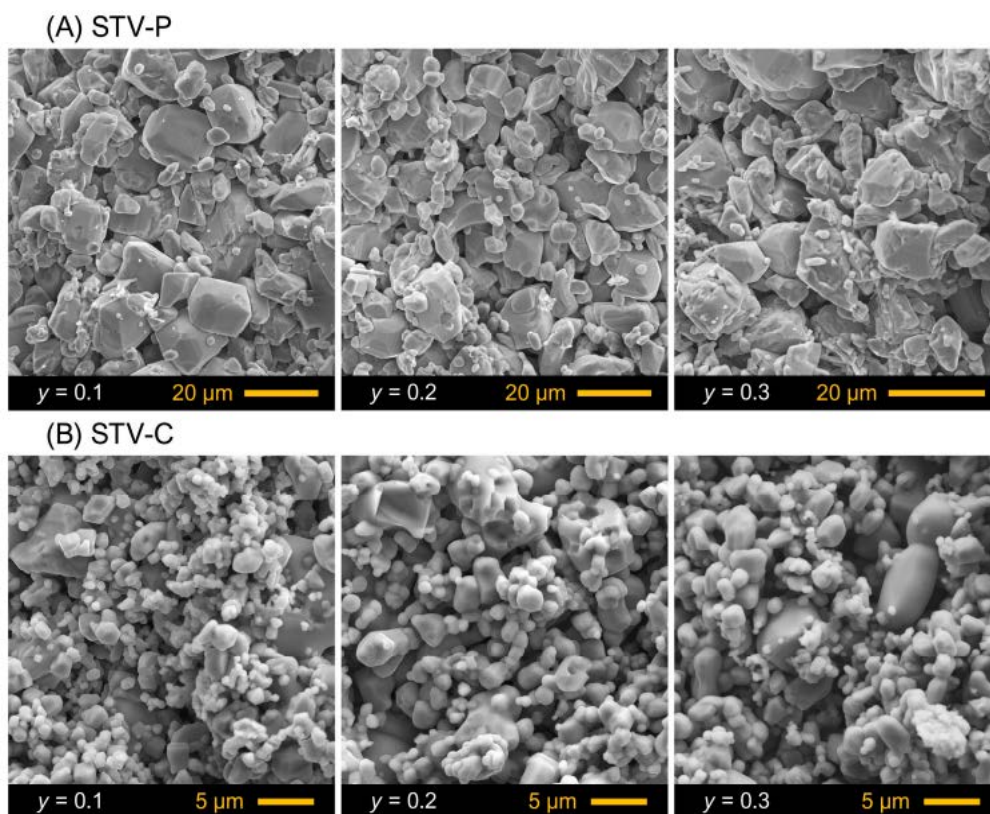
Перовскитке ұқсас $\text{Sr}(\text{Ti},\text{V})\text{O}_{3-\delta}$ керамикалық материалдары табиғи газ бен биогазда жұмыс істейтін қатты оксидтік отын элементтері (ҚООЭ) үшін болашағы зор анодтық материалдар болып табылады, алайда осы фазалардың тотығу орта-

сындағы тұрақсыздығы олардың практикалық қолданылуын қиындатады [25]. Бұл жұмыста [26] тотығу прекурсорларынан стронций титан-ванадатына негізделген электродтарды дайындау тәсілдерін зерттейді. $\text{SrTi}_{1-y}\text{V}_y\text{O}_3$ ($y = 0.1-0.3$) номиналдық құрамына ие кеуекті керамика ауада қатты фазалық реакция әдісімен алынды. 1100 °C-тан жоғары емес температураларда термиялық өңдеу SrTiO_3 перовскитке ұқсас фазаларын, $\text{Sr}_2\text{V}_2\text{O}_7$ пированадатын және $\text{Sr}_3(\text{VO}_4)_2$ ортованадатын қамтитын композициялық керамиканы қалыптастырды, ал күйдіру температурасының 1250-1440 °C-қа дейін жоғарылауы $\text{SrTi}_{1-y}\text{V}_y\text{O}_3$ перовскиттерінің түзілуіне мүмкіндік берді.

2-суретте екі түрлі синтез әдісімен дайындалған керамикалық үлгілердің – $\text{SrTi}_{0,6}\text{V}_{0,4}\text{O}_3$ пресстеу арқылы алынған (STV-P, А) және $\text{SrTi}_{0,6}\text{V}_{0,4}\text{O}_3$ күйдіру арқылы алынған (STV-C, В) – үзік қималарының сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) бейнелері көрсетілген. $\text{SrTi}_{0,6}\text{V}_{0,4}\text{O}_3$ -STV-P үлгісінде түйіршіктердің бір-бірімен байланысы жеткіліксіз екені және олардың арасында айтарлықтай бос кеңістіктердің сақталғаны байқалады, бұл үлгінің кеуектілігінің жоғары екенін, сондықтан механикалық беріктігінің төмендеуін және ион өткізгіштігінің әлсіреуін туындататынын көрсетеді. Үлгінің үзік қимасында бос орындардың айқын көрінуі технологиялық процестің толық тығыздалмауын дәлелдейді. Ал $\text{SrTi}_{0,6}\text{V}_{0,4}\text{O}_3$ -STV-C үлгісінде түйіршіктердің бір-бірімен тығыз байланысқаны, дән шекараларының анықталғаны және құрылымның біртекті тығыздалғаны көрінеді [26].

4. Қорытынды

Бұл шолуда авторлардың озық зерттеулері негізінде анодтық материалдарға қойылатын негізгі талаптар, олардың құрылымдық ерекшеліктері, синтез әдістері, электрокаталитикалық қасиеттері мен термохимиялық тұрақтылығы жан-жақты талданып қарастырылды. Дәстүрлі Ni-YSZ анодтары жоғары өткізгіштік пен механикалық беріктікке ие болғанымен, олардың кокстау мен күкіртпен улануына бейімділігі баламалы материалдарды іздеуге түрткі болуда. Тиімді баламалар ретінде перовскит және қос перовскит құрылымдары, хромиттер, титан және ванадий негізіндегі анодтар қарастырылып, олардың әрқайсысының артықшылықтары мен шектеулері талданды. Сонымен қатар, легирлеу (Ni, Mo, Co, Pd), инфильтрация және жұқа қабатты модификациялау әдістері арқылы анодтық материал-



Сурет 2. STV-P (A) және STV-C (B) керамикаларының үзік қималарының СЭМ-суреттері. Көшірілген [26], CC BY 4.0 лицензиясы бойынша жарияланған.

дардың қасиеттерін едәуір жақсартуға болатындығы көрсетілді. Қарастырылған жұмыстарда анықталғандай анод материалдарының тиімділігі олардың синтез тәсіліне, микроқұрылымдық ұйымдасуына және көп фазалы композиттер құра білу қабілетіне тығыз байланысты екені көрсетілген. Әсіресе наноқұрылымды модификациялау, оттегі вакансияларын басқару және фазалық шекараларды кеңейту арқылы электрокаталитикалық белсенділікті арттыру мүмкіндіктеріне ерекше назар аудартады. Талданған еңбектер ғылыми қауымдастыққа әрі қарайғы зерттеулер мен технологиялық трансфертке бағытталған жаңа идеялар ұсына отырып, ҚООЭ жүйелерінің сенімділігін арттыруға негіз болады деп ойлаймыз.

Келешек зерттеулердің негізгі бағыттары анод материалдарының күкірт улануына және кокстауға төзімділігін арттыруға, перовскит және қос перовскит құрылымдарында оттегі вакансияларын оңтайландыруға, хромит, титанат және ванадат негізіндегі композиттердің электрон өткізгіштігі мен термиялық тұрақтылығын жетілдіруге бағытталуы тиіс. Инфильтрация және жұқа қабатты модификациялау әдістерін қолдану арқылы каталитикалық белсенділікті күшейту және поляризация шығындарын төмендету маңызды. Сонымен қатар наноқұрылымды басқару, фазалық интер-

фейстерді кеңейту және дән шекараларын оңтайландыру арқылы материалдардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын арттыру қажет. Практикалық тұрғыда әзірленген материалдарды әртүрлі отын түрлерінде ұзақ мерзімді сынақтан өткізу және өнеркәсіптік синтез әдістеріне бейімдеу келешек зерттеулердің өзекті бағыты болып табылады.

Қаржыландыру көзі

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № BR21882359).

Әдебиеттер тізімі (ГОСТ)

- [1]. Abdelkareem M.A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E.T., Olabi A. Environmental aspects of fuel cells: A review // *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 752. – С. 141803.
- [2]. Sazali N., Wan Salleh W.N., Jamaludin A.S., Mhd Razali M.N. New perspectives on fuel cell technology: A brief review // *Membranes.* – 2020. – Vol. 10. – № 5. – P. 99.
- [3]. Luo Y., Wu Y., Li B., Mo T., Li Y., Feng S.P., Chu P.K. Development and application of fuel cells in the automobile industry // *J. Energy Storage.* – 2021. – Vol. 42. – P. 103124.

- [4]. Singh M., Zappa D., Comini E. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2021. – Vol. 46. – № 54. – P. 27643–27674.
- [5]. Xu Q., Guo Z., Xia L., He Q., Li Z., Bello I.T., Ni M. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels // *Energy Convers. Manag.* – 2022. – Vol. 253. – P. 115175.
- [6]. Dwivedi S. Solid oxide fuel cell: Materials for anode, cathode and electrolyte // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2020. – Vol. 45. – № 44. – P. 23988–24013.
- [7]. Hussain S., Yangping L. Review of solid oxide fuel cell materials: Cathode, anode, and electrolyte // *Energy Trans.* – 2020. – Vol. 4. – № 2. – P. 113–126.
- [8]. Liu Y., Shao Z., Mori T. Development of nickel based cermet anode materials in solid oxide fuel cells – Now and future // *Mater. Rep. Energy*. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 100003.
- [9]. Omeiza L.A., Kabyshev A., Bekmyrza K., Kuterbekov K.A., Kubenova M., Zhumadilova Z.A., Azad A.K. Constraints in sustainable electrode materials development for solid oxide fuel cell: A brief review // *Mater. Sci. Energy Technol.* – 2025. – Vol. 8. – P. 32–43.
- [10]. Shabri H.A., Othman M.H.D., Mohamed M.A., Kurniawan T.A., Jamil S.M. Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization: A review // *Fuel Process. Technol.* – 2021. – Vol. 212. – P. 106626.
- [11]. Ahmed N., Devi S., Dar M.A., Ibrahim S.K.M., Sharma A., Sharma N., Ahamed S.R. Anode material for solid oxide fuel cell: A review // *Indian J. Phys.* – 2024. – Vol. 98. – № 3. – P. 877–888.
- [12]. Hanif M.B., Motola M., Rauf S., Li C.J., Li C.X. Recent advancements, doping strategies and the future perspective of perovskite-based solid oxide fuel cells for energy conversion // *Chem. Eng. J.* – 2022. – Vol. 428. – P. 132603.
- [13]. Rostaghi Chalaki H., Babaei A., Ataie A., Seyed-Vakili S.V. $\text{LaFe}_{0.6}\text{Co}_{0.4}\text{O}_3$ promoted LSCM/YSZ anode for direct utilization of methanol in solid oxide fuel cells // *Ionics*. – 2020. – Vol. 26. – P. 1011–1018.
- [14]. Li H., Wang W., Lin J., Park K.Y., Lee T., Heyden A., Chen F. Improved cell performance and sulphur tolerance using A-site substituted $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1.4}\text{Ni}_{0.1}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_{6-\delta}$ anodes for solid-oxide fuel cells // *Clean Energy*. – 2023. – Vol. 7. – № 1. – P. 70–83.
- [15]. Cai W., Zhou M., Cao D., Yan X., Li Q., Lü S., Wang H. Ni-doped A-site-deficient $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite as anode of direct carbon solid oxide fuel cells // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2020. – Vol. 45. – № 41. – P. 21873–21880.
- [16]. Ryu S., Hwang J., Jeong W., Yu W., Lee S., Kim K., Cha S.W. A self-crystallized nanofibrous Ni-GDC anode by magnetron sputtering for low-temperature solid oxide fuel cells // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2023. – Vol. 15. – № 9. – P. 11845–11852.
- [17]. Zaravelis F., Sygellou L., Souvalioti A., Niakolas D.K. Transition metals in Ni/GDC for the reversible solid oxide cell operation: Optimization of the Mo-Au-Ni synergy and further enhancement via substitution of Mo with Fe // *Electrochim. Acta*. – 2023. – Vol. 453. – P. 142343.
- [18]. Wei T., Qiu P., Yang J., Jia L., Chi B., Pu J., Li J. High-performance direct carbon dioxide-methane solid oxide fuel cell with a structure-engineered double-layer anode // *J. Power Sources*. – 2021. – Vol. 484. – P. 229199.
- [19]. Meng Y., Akbar M., Gao J., Singh M., Chiu T.W., Wang B., Fan L. Superionic conduction of self-assembled heterostructural LSCrF-CeO_2 electrolyte for solid oxide fuel cell at 375–550 °C // *Appl. Surf. Sci.* – 2024. – Vol. 645. – P. 158832.
- [20]. Tu B., Su X., Yin Y., Zhang F., Lv X., Cheng M. Methane conversion reactions over LaNi-YSZ and Ni-YSZ anodes of solid oxide fuel cell // *Fuel*. – 2020. – Vol. 278. – P. 118273.
- [21]. Li M., Li X., Chen Z., Qian X., Liu H., Dong J., Ling Y. Hydrogen enriched natural gas-fueled solid oxide fuel cells supported by Ni-Cu co-doping $\text{CeO}_2-\delta$ catalyst-modified finger-like pore anode // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381. – P. 133428.
- [22]. Zhou X., Yan N., Chuang K.T., Luo J. Progress in La-doped SrTiO_3 (LST)-based anode materials for solid oxide fuel cells // *RSC Adv.* – 2020. – Vol. 4. – № 1. – P. 118–131.
- [23]. Ma Q., Tietz F., Sebold D., Stöver D. Y-substituted SrTiO_3 -YSZ composites as anode materials for solid oxide fuel cells: Interaction between SYT and YSZ // *J. Power Sources*. – 2021. – Vol. 195. – № 7. – P. 1920–1925.
- [24]. Escudero M.J., Irvine J.T.S., Daza L. Development of anode material based on La-substituted SrTiO_3 perovskites doped with manganese and/or gallium for SOFC // *J. Power Sources*. – 2020. – Vol. 192. – № 1. – P. 43–50.
- [25]. Tariq U., Khan M.Z., Gohar O., Babar Z.U.D., Ali F., Malik R.A., Hanif M.B. Bridging the gap between fundamentals and efficient devices: Advances in proton-conducting oxides for low-temperature solid oxide fuel cells // *J. Power Sources*. – 2024. – Vol. 613. – P. 234910.
- [26]. Macías J., Frade J.R., Yaremchenko A.A. SrTiO_3 - SrVO_3 ceramics for solid oxide fuel cell anodes: A route from oxidized precursors // *Mater.* – 2023. – Vol. 16. – № 24. – P. 7638.

References

- [1]. M.A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, et al. Environmental aspects of fuel cells: A review.

- Sci. Total Environ. 752 (2021) 141803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>.
- [2]. N. Sazali, W.N. Wan Salleh, A.S. Jamaludin, et al. New perspectives on fuel cell technology: A brief review. *Membranes* 10 (2020) 99. <https://doi.org/10.3390/membranes10050099>.
 - [3]. Y. Luo, Y. Wu, B. Li, et al. Development and application of fuel cells in the automobile industry. *J. Energy Storage* 42 (2021) 103124. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103124>.
 - [4]. M. Singh, D. Zappa, E. Comini. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *Int. J. Hydrog. Energy* 46 (2021) 27643-27674. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.020>.
 - [5]. Q. Xu, Z. Guo, L. Xia, et al. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels. *Energy Convers. Manag.* 253 (2022) 115175. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115175>.
 - [6]. S. Dwivedi. Solid oxide fuel cell: Materials for anode, cathode and electrolyte. *Int. J. Hydrog. Energy* 45 (2020) 23988-24013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.234>.
 - [7]. S. Hussain, L. Yangping. Review of solid oxide fuel cell materials: Cathode, anode, and electrolyte. *Energy Trans.* 4 (2020) 113-126. <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00029-8>.
 - [8]. Y. Liu, Z. Shao, T. Mori. Development of nickel based cermet anode materials in solid oxide fuel cells - Now and future. *Mater. Rep. Energy* 1 (2021) 100003. <https://doi.org/10.1016/j.matre.2020.11.002>.
 - [9]. L.A. Omeiza, A. Kabyshev, K. Bekmyrza, et al. Constraints in sustainable electrode materials development for solid oxide fuel cell: A brief review. *Mater. Sci. Energy Technol.* 8 (2024) 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.07.001>.
 - [10]. H.A. Shabri, M.H.D. Othman, M.A. Mohamed, et al. Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization: A review. *Fuel Process. Technol.* 212 (2021) 106626. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106626>.
 - [11]. N. Ahmed, S. Devi, M.A. Dar, et al. Anode material for solid oxide fuel cell: A review. *Indian J. Phys.* 98 (2024) 877-888. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02860-3>.
 - [12]. M.B. Hanif, M. Motola, S. Rauf, et al. Recent advancements, doping strategies and the future perspective of perovskite-based solid oxide fuel cells for energy conversion. *Chem. Eng. J.* 428 (2022) 132603. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132603>.
 - [13]. H.R. Chalaki, A. Babaei, A. Ataie, et al. LaFe_{0.6}Co_{0.4}O₃ promoted LSCM/YSZ anode for direct utilization of methanol in solid oxide fuel cells. *Ionics* 26 (2020) 1011-1018. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03248-2>.
 - [14]. H. Li, W. Wang, J. Lin, et al. Improved cell performance and sulphur tolerance using A-site substituted Sr₂Fe_{1.4}Ni_{0.1}Mo_{0.5}O_{6-δ} anodes for solid-oxide fuel cells. *Clean Energy* 7 (2023) 70-83. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac089>.
 - [15]. W. Cai, M. Zhou, D. Cao, et al. Ni-doped A-site-deficient La_{0.7}Sr_{0.3}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O_{3-δ} perovskite as anode of direct carbon solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy* 45 (2020) 21873-21880. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.266>.
 - [16]. S. Ryu, J. Hwang, W. Jeong, et al. A self-crystallized nanofibrous Ni-GDC anode by magnetron sputtering for low-temperature solid oxide fuel cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 15 (2023) 11845-11852. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c22795>.
 - [17]. F. Zaravelis, L. Sygellou, A. Souvalioti, et al. Transition metals in Ni/GDC for the reversible solid oxide cell operation: Optimization of the Mo-Au-Ni synergy and further enhancement via substitution of Mo with Fe. *Electrochim. Acta* 453 (2023) 142343. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142343>.
 - [18]. T. Wei, P. Qiu, J. Yang, et al. High-performance direct carbon dioxide-methane solid oxide fuel cell with a structure-engineered double-layer anode. *J. Power Sources* 484 (2021) 229199. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229199>.
 - [19]. Y. Meng, M. Akbar, J. Gao, et al. Superionic conduction of self-assembled heterostructural LSCrF-CeO₂ electrolyte for solid oxide fuel cell at 375-550 °C. *Appl. Surf. Sci.* 645 (2024) 158832. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158832>.
 - [20]. B. Tu, X. Su, Y. Yin, et al. Methane conversion reactions over LaNi-YSZ and Ni-YSZ anodes of solid oxide fuel cell. *Fuel* 278 (2020) 118273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118273>.
 - [21]. M. Li, X. Li, Z. Chen, et al. Hydrogen enriched natural gas-fueled solid oxide fuel cells supported by Ni-Cu co-doping CeO₂-δ catalyst-modified finger-like pore anode. *Fuel* 381 (2025) 133428. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133428>.
 - [22]. X. Zhou, N. Yan, K.T. Chuang, et al. Progress in La-doped SrTiO₃ (LST)-based anode materials for solid oxide fuel cells. *RSC Adv.* 4 (2020) 118-131. <https://doi.org/10.1039/C3RA42666A>.
 - [23]. Q. Ma, F. Tietz, D. Sebold, et al. Y-substituted SrTiO₃-YSZ composites as anode materials for solid oxide fuel cells: Interaction between SYT and YSZ. *J. Power Sources* 195 (2021) 1920-1925. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.09.075>.
 - [24]. M.J. Escudero, J.T.S. Irvine, L. Daza. Development

- of anode material based on La-substituted SrTiO₃ perovskites doped with manganese and/or gallium for SOFC. J. Power Sources 192 (2020) 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.132>.
- [25]. U. Tariq, M.Z. Khan, O. Gohar, et al. Bridging the gap between fundamentals and efficient devices: Advances in proton-conducting oxides for low-temperature solid oxide fuel cells. J. Power Sources 613 (2024) 234910. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234910>.
- [26]. J. Macías, J.R. Frade, A.A. Yaremchenko. SrTiO₃-SrVO₃ ceramics for solid oxide fuel cell anodes: A route from oxidized precursors. Materials 16 (2023) 7638. <https://doi.org/10.3390/ma16247638>.

Сведения об авторах

С. Опахай – PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: serikjan_0707@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6789-4844

К.А. Кутербек – доктор физико-математических наук, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: kkuterbekov@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5421-271X

К.Ж. Бекмырза – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: kbekmyrza@yandex.kz
ORCID: 0000-0001-8902-8736

А.М. Кабышев – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: assetenu@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1472-4045

М.М. Кубенова – PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: kubenova.m@yandex.kz
ORCID: 0000-0003-2012-2702

Ж.С. Зейнулла – докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: zeizhaser@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5339-3165

Н.К. Айдарбеков – PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: nursultan02_22.10.92@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1981-5416

Anode Materials for Solid Oxide Fuel Cells: Short Review

S. Opakhai*, K.A. Kuterbekov, K.Zh. Bekmyrza, A.M. Kabyshev, M.M. Kubenova, Zh.S. Zeinulla, N.K. Aidarbekov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev st., 2, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

This review paper is dedicated to the structure, properties, and development of anode materials for solid oxide fuel cells (SOFCs). In addition to traditional anodes based on Ni-YSZ composites, the review discusses advanced alternatives such as perovskite and double perovskite structures, chromites, and ceramic materials based on titanium and vanadium. It is noted that various synthesis methods – sol-gel, solid-state reaction, infiltration, and magnetron sputtering – play a crucial role in the development of new anode materials. Furthermore, it is shown that doping the anode structure with transition metals (e.g., Mo, Ni, Co, Pd) significantly enhances the electrical conductivity and catalytic activity of the material. The article also draws conclusions regarding the enhancement of electrochemical activity through the microstructural characteristics of anode layers and the expansion of the triple-phase boundary (TPB) region. Approaches to increasing the surface activity of the anode and preventing carbon deposition via nanoparticle modification and thin-layer coatings of SDC or GDC are explored. The consolidated scientific data and comparative analysis provide a foundation for designing and developing high-performance and stable anode materials capable of operating under various temperature and fuel conditions. These studies make a significant contribution to the large-scale implementation of SOFC technologies in the future and to enhancing their reliability.

Keywords: solid oxide fuel cells, anode materials, perovskite structures, Ni-YSZ composites, electrocatalytic activity, coking resistance, magnetron sputtering.

Анодные материалы для твердооксидных топливных элементов: краткий обзор

С. Опахай*, К.А. Кутербеков, К.Ж. Бекмырза, А.М. Кабышев, М.М. Кубенова, Ж.С. Зейнулла, Н.К. Айдарбеков

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обзор посвящен структуре, свойствам и развитию анодных материалов для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). В обзоре, наряду с традиционными анодами на основе композита Ni-YSZ, рассматриваются также прогрессивные альтернативы, такие как перовскитные и двойные перовскитные структуры, хромиты, а также керамические материалы на основе титана и ванадия. Отмечается, что различные методы синтеза – золь-гель, твердофазная реакция, инфильтрация, магнетронное распыление – играют важную роль в разработке новых анодных материалов. Кроме того, показано, что легирование структуры анода переходными металлами (например, Mo, Ni, Co, Pd) значительно повышает электрическую проводимость и каталитическую активность материала. В статье также представлены выводы о повышении электрохимической активности за счет микроструктурных характеристик анодных слоев и расширения области тройной фазной границы (ТФГ). Рассматриваются подходы к увеличению активности поверхности анода и предотвращению осаждения углерода путем модификации наночастицами и покрытиями из тонких слоев SDC или GDC. Обобщенные научные данные и сравнительный анализ служат основой для проектирования и разработки высокоэффективных и стабильных анодных материалов, способных работать в различных температурных и топливных условиях. Эти исследования вносят значительный вклад в широкомасштабное применение технологий ТОТЭ в будущем и повышение их надежности.

Ключевые слова: твердооксидные топливные элементы, анодные материалы, перовскитные структуры, композиты Ni-YSZ, электрокаталитическая активность, устойчивость к коксованию, магнетронное распыление.