

Ю.О.Амангельдиева^{1*}, М.Т.Айдарова², Ш.Р.Курбанбеков³, Д.Э.Балтабаева⁴, Н.С.Эртаев⁵

¹ магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), Email: yulduz.amangeliyeva12345@mail.ru*

² докторант, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
(Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: maidarova@ektu.kz

³ PhD, қауымдастырылған профессор Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

⁴ магистр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: baltabaeva-d@bk.ru

⁵ магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: nurs.ertaev@gmail.com

ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПАЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ СУТЕК ЭНЕРГИЯСЫНДА ҚОЛДАНУ

HIGH-ENTROPY ALLOYS AND THEIR APPLICATION IN HYDROGEN ENERGY ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Аңдатпа. Жоғары энтропиялық қорытпалар (ЖЭҚ) ерекше физика-химиялық қасиеттеріне байланысты заманауи материалдардың дамуындағы маңызды бағытқа айналды және сутегі энергетикасында қолдану үшін перспективалы болып табылады. Бұл мақалада сутегіні сақтау үшін ЖЭҚ қолдану бойынша соңғы зерттеулер қарастырылып, олардың микроструктурасына, синтез және жобалау әдістеріне, сақтау қасиеттеріне баса назар аударылады; ЖЭҚ-тың әртүрлі температура мен қысымда жоғары тұрақтылық, механикалық беріктік және сутегін сіңіру қабілеті сияқты артықшылықтары талқыланады; бір компонентті және көп компонентті қорытпалардың мысалдары келтірілген. ОЦК және Лавес фазаларын қамтитын бір және көп компонентті құрылымдары бар қорытпалардың сутегіні тиімді абсорбциялау және десорбциялау қабілеті қарастырылады. ЖЭҚ-тың жоғары сақтау тығыздығы мен коррозияға төзімділігін растайтын зерттеу нәтижелері келтірілген, бұл олардың ұзақ қызмет етуін және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, пластикалық пен фазалық құрылымдардың тұрақтылығын арттыру қажеттілігі сияқты ағымдағы шектеулер талқыланады. Мақалада құрамы мен құрылымдық модификациясын оңтайландыру әдістерін әзірлеу, термодинамикалық қасиеттерін жақсарту және сутегіні өнеркәсіптік жағдайларда сақтау үшін ЖЭҚ бейімдеу бойынша болашақ зерттеулер бағыттары ұсынылады. Бұл материалдарды әрі қарай зерттеудің маңыздылығы сутегі технологияларын ілгерілетуге және тұрақты энергия көздерін дамытуға ықпал етіп, экологиялық таза энергетикаға көшуді қамтамасыз етеді деп атап өтілген.

Негізгі сөздер: жоғары энтропиялық қорытпалар, қатты ерітінді фазалары, микроқұрылым, сутегі энергиясы, абсорбция, десорбция, сутегінің жинақталуы.

Abstract. High-entropy alloys (HEAs) have become an important area of modern materials development due to their unique physicochemical properties and are promising for application in hydrogen energy. This paper reviews the latest research on the application of HEAs for hydrogen storage with an emphasis on their microstructure, synthesis and design methods, and storage properties. The advantages of HEAs are discussed, including high stability at various temperatures and pressures, mechanical strength, and hydrogen absorption capacity; examples of single-component and multicomponent alloys are given. Examples of alloys with single- and multicomponent phases, including BCC and Laves phases, and their ability to efficiently absorb and desorb hydrogen are considered. The results of studies confirming the high storage density and corrosion resistance of HEAs, which contributes to their long-term operation and reduced maintenance costs, are presented. Current limitations, such as the need to improve the ductility and stability of phase structures, are also discussed. The paper suggests directions for further research, including the development of methods for composition optimization and structural modification, which will improve the thermodynamic properties of HEAs and adapt them for hydrogen storage in industrial conditions. The importance of further study of these materials for the advancement of hydrogen technologies and the development of sustainable energy sources, which will facilitate the transition to environmentally friendly energy, is emphasized.

Keywords: high-entropy alloys, solid-soluble phases, microstructure, hydrogen energy, absorption, desorption, hydrogen storage.

Аннотация. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) стали важным направлением развития современных материалов благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и являются перспективными для применения в водородной энергетике. В данной статье рассматриваются последние исследования по применению ВЭС для хранения водорода с акцентом на их микроструктуру, методы синтеза и проектирования, свойства хранения; обсуждаются преимущества ВЭС, включая высокую стабильность при различных температурах и давлениях, механическую прочность и способность поглощать водород; приводятся примеры однокомпонентных и многокомпонентных сплавов. Рассмотрены примеры сплавов с одно- и многокомпонентными фазами, включая ОЦК и Лавес фазы, и их способность эффективно абсорбции и десорбции водорода. Приведены результаты исследований, подтверждающие высокую плотность хранения и коррозионную стойкость ВЭС, что способствует их длительную эксплуатацию и снижение затрат на обслуживание. Также обсуждаются текущие ограничения, такие как необходимость повышения пластичности и стабильности фазовых структур. В статье предлагаются направления для дальнейших исследований, включая разработку методов для оптимизации состава и структурной модификации, что позволит улучшить термодинамические свойства ВЭС и адаптировать их для хранения водорода в промышленных условиях. Подчеркивается значимость дальнейшего изучения этих материалов для продвижения водородных технологий и развития устойчивых источников энергии, что будет способствовать переходу к экологически чистой энергетике.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, твердорастворные фазы, микроструктура, водородная энергетика, абсорбция, десорбция, хранение водорода.

Кіріспе

Жаңа құрылымдық материалдарды жасаудың әдеттегі әдісі негіз ретінде бір элементті таңдау болып табылады, содан кейін ол қажетті механикалық немесе технологиялық қасиеттерге қол жеткізу үшін легіріледі [1,2]. Нәтижесінде темір, мыс, алюминий, титан, никель және басқа да көптеген кеңінен қолданылатын қорытпалар алынады. Әсіресе, Hastelloy, VT20, 015X14N19C6B және басқа да көптеген элементтермен легіріленген көпкомпонентті қорытпалар қызығушылық тудырады. Олардың тартымдылығы әртүрлі беріктендіру механизмдерін, соның ішінде қатты ерітіндімен, дисперсиялық, деформациялық және басқа әдістермен құрылымдарды қалыптастыру мүмкіндігіне байланысты.

Жоғары энтропиялық қорытпалар (ЖЭҚ) концепциясы небәрі 15 жыл бұрын, 2000 жылдардың басында пайда болған, бұл металлургия тарихы тұрғысынан өте қысқа мерзім болып табылады [3,4]. Қазіргі уақытта ЖЭҚ кеңінен зерттелуде. Мысалы, Web of Science және Scopus базаларында 5000-нан астам жұмыс жарияланған. Олардың көпшілігінде ЖЭҚ металл қорытпаларын дамытудың елеулі жетістігі ретінде сипатталады. Мұндай эквимолярлық қорытпалар қарапайым қатты ерітінділер құрылымын қалыптастыра алатыны анықталды. Сонымен қатар, көпкомпонентті қорытпалар жоғары қаттылық, тозуға төзімділік, жоғары температураларда беріктік, коррозияға төзімділік, төмен температураларда жақсы пластикалық және аса пластикалық сияқты тартымды қасиеттерге ие екені белгілі болды [5-8].

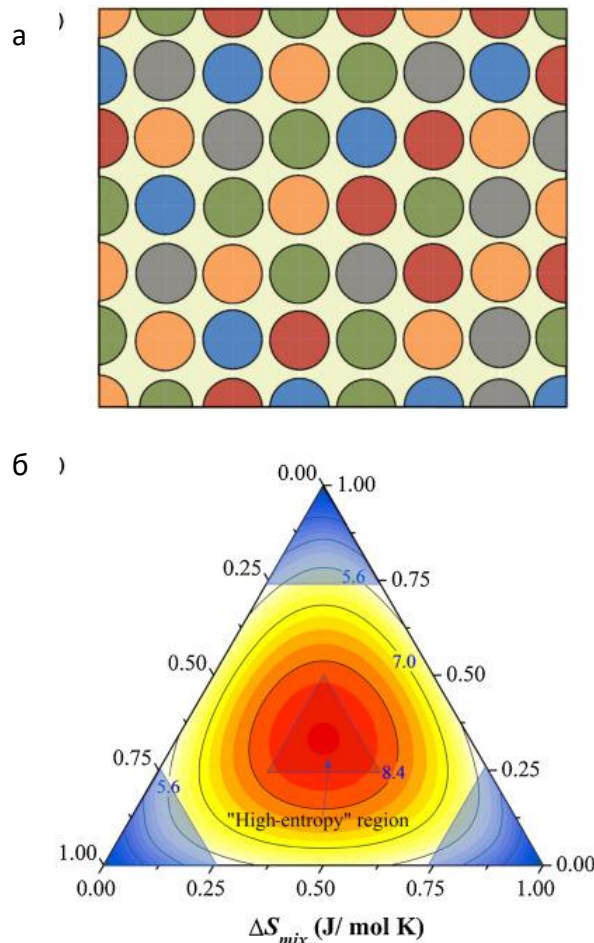
ЖЭҚ сипаттамалары мен қасиеттері

ЖЭҚ концепциясы қорытпадағы компоненттер санын көбейту оның тұрақтылығын арттырады деген идеяға негізделген, өйткені жоғары араластыру энтропиясы интерметаллидтік фазалардың түзілуін тежейді және қарапайым қатты ерітінділердің түзілуіне ықпал етеді деп болжанған. Осыған байланысты шамамен тең эквимолярлық концентрацияда 5 және одан да көп элементтерді қамтитын қорытпаларды ЖЭҚ деп атау ұсынылды. Алайда әртүрлі қорытпа жүйелеріне жүргізілген кейінгі зерттеулер көптеген ЖЭҚ құрамында реттелген қатты ерітінділер және/немесе интерметаллидтік фазалар, тіпті аморфты фазалар түзілетінін көрсетті [9-11].

Қазіргі ЖЭҚ зерттеулерінің негізгі тақырыптарының бірі – ЖЭҚ фазасын таңдауда араластыру энтропиясының ықтимал әсерін түсіну болып табылады. Осыған байланысты келесі сұрақ туындайды: ЖЭҚ-та араластыру энтропиясы дегеніміз не? Алдыңғы

зерттеулерде [12,13] «жоғары энтропиялық қорытпа» термині қолданылған, өйткені қорытпаны 1a суретінде көрсетілгендей идеалды ерітінді ретінде моделдеуге болады.

Демек, бір мольге араластырудың конфигурациялық энтропиясын мына түрде көрсетуге болады $\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i$, мұндағы R – газ тұрақтысы, c_i – i -ші элементтің мольдік үлесі, ал n – құрамдас элементтердің жалпы саны [12,14]. Мысалы, 1b суретінде үштік қорытпа моделі үшін ΔS_{mix} контурлық картасы көрсетілген. Бұл суреттен көрініп тұрғандай, қорытпаның құрамы орталық аймаққа неғұрлым жақын болса, соғұрлым ΔS_{mix} мәні үлкен болады, ол дәл ортасында максимум 9,15 Дж/моль К жетеді. Балқу температурасы $T_m \sim 2000$ К болатын типтік қорытпа үшін жалпы энергияның $T_m \Delta S_{mix}$ қоспасының ~ 20 кДж/моль артуы байқалады.



Сурет 1. (а) Әртүрлі түстермен бейнеленген шеңберлер арқылы көрсетілген элементтердің кездейсоқ араласу концепциясы көп компонентті қорытпада бейнеленген.

Атомдардың тең өлшемі және олардың бос орналасуы деп болжанғанда, қорытпаның конфигурациялық араластыру энтропиясы идеалды газдың энтропиясына баламалы, сондықтан эквиатомдық құрам арқылы максималданады. (b) Қорытпаның схемалық үш компонентті жүйесінде ΔS_{mix} (Дж/моль·К) контурлық графигі. Көк түсті бұрыштық аймақтар бір немесе екі негізгі элементке негізделген кәдімгі қорытпаларды білдірсе, ал орталықтағы қызыл аймақ «жоғары энтропия» аймағын көрсетеді [15].

Әдетте, бинарлық металл қорытпаларында үздіксіз қатты ерітінділердің түзілуін болжау үшін Юм-Розери ережелері қолданылады. Алайда, тек осы ережелерге сүйене отырып, көп компонентті жоғары энтропиялық қорытпаларда белгілі бір құрылымның түзілуін сенімді түрде болжау қиын. Мысалы, CoCrFeNi жүйесінің қорытпасы [16] атомдық

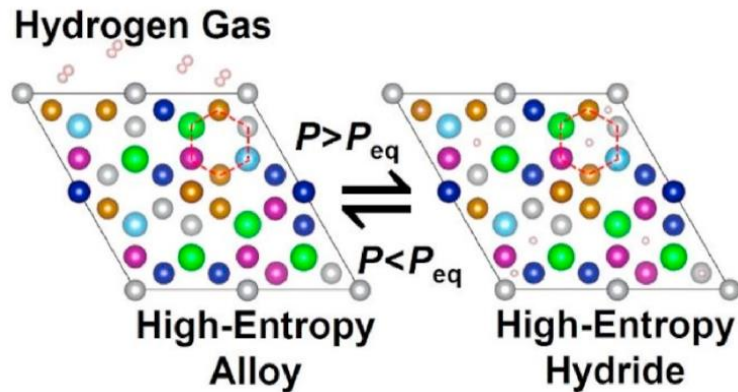
радиустары ұқсас болғанымен, олардың кристалл торлары, валенттік электрондар концентрациясы (ВЭК) және электртерістілігі әртүрлі болса да, қатты ерітінді құрылымына ие. Қорытпаға Mn қосылған кезде қатты ерітінді сақталады, бірақ Mn-ды Al-мен алмастыру [17] қабаттану мен көп фазалы құрылымның түзілуіне әкеледі. Бұл айырмашылық, мүмкін, Mn радиусы қорытпадағы басқа элементтердің радиустарына жақын болғандықтан, ал Al радиусы айтарлықтай ерекшеленетіндіктен болуы мүмкін. Жүйедегі элементтерге радиусы жақын тағы бір элемент – V. V қосудың Mn сияқты CoCrFeNi көп компонентті қорытпасының бастапқы құрылымын өзгертпеуі мүмкін деп болжауға болады, бірақ әдебиеттерде мұндай қорытпалар туралы мәлімет жоқ. Сонымен қатар, CoFeNiMnV және CoCrNiMnV қорытпаларында [18] көп фазалы құрылымдар анықталған, бұл V-дың қорытпа құрылымына Mn-мен салыстырғанда күрделірек әсер ететінін көрсетеді. Осыған байланысты, Юм-Розери ережелеріне негізделген ЖЭҚ құрылымын болжау критерийлерін әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Қатты ерітінділер түзетін жоғары энтропиялық қорытпалардан басқа, үлкен көлемдік үлеске ие бірнеше фазадан тұратын құрылымдарды түзетін ЖЭҚ зерттеулері де қызығушылық тудырады. Мұндай құрылымы бар ең көп зерттелген қорытпалардың бірі — Al және Cu элементтерімен қосымша легірілген CoCrFeNi жүйесінің қорытпасы [19]. Бұл қорытпаның құрылымы туралы әдебиеттерде қарама-қайшы ақпарат бар. Бастапқыда қорытпа қатты ерітіндіге негізделген екі ГЦК және ОЦК фазадан тұрады деп болжанған, алайда кейінірек қорытпада интерметаллидтерді қоса алғанда басқа фазалардың да бар екені анықталды. Бұл қорытпа жоғары қаттылықты, қысу беріктігін, тозуға және коррозияға төзімділікті үйлестіре отырып, ерекшеленеді [20], бірақ төмен пластикалық және морт сынғыштық қасиеттерге ие болғандықтан, оның қолданылуын шектейді. Қорытпаның механикалық қасиеттерін деформациялық өңдеу арқылы жақсартуға болады, алайда оның қолданылуы туралы деректер әзірге жоқ.

Осылайша, қажетті қасиеттердің үйлесіміне ие ЖЭҚ алу көбіне қорытпаның құрамы мен микроструктурасына байланысты. Қажетті құрылымды болжау тәсілдері әлі де жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сондай-ақ, деформациялық өңдеудің құрылымға және ЖЭҚ механикалық қасиеттеріне әсері де зерттелмеген күйде қалып отыр. Сондықтан, оңтайлы беріктік, пластикалық және серпімді қасиеттерге ие қарапайым немесе күрделі көпфазалы құрылым жасау үшін әртүрлі элементтермен легірту мен деформациялық өңдеудің құрылымға және механикалық қасиеттерге әсерін зерттеуге бағытталған қосымша зерттеулер қажет.

ЖЭҚ сутегін сақтау қабілеті

ЖЭҚ тек механикалық қасиеттерімен ғана емес, сонымен қатар сутегін сақтау әлеуетімен де қызығушылық тудырады. Сутегін сақтау үшін гидридтердің термодинамикалық тұрақтылығын реттеуге арналған соңғы тәсіл ЖЭҚ алынған көп компонентті жоғары энтропиялық гидридтерді пайдалануды қамтиды, бұл сурет 2-де схемалық түрде көрсетілген. Сутегі сіңірілгенде, ол жоғары энтропиялық қорытпа матрицасында гидридтер түзеді. Жүйенің тепе-теңдік қысымы сутегін белгілі бір температураларда сіңіру және шығару қысымын көрсететін негізгі параметр болып табылады [21]. Жоғары энтропиялық қорытпалар гидридтеріндегі тепе-теңдік қысымын дұрыс реттеу сутегін тиімді сіңіру және десорбциялауды қамтамасыз етеді, бұл оларды сақтау жүйелерінде пайдалануға тиімді етеді.



Сурет 2. Сутегінің ЖЭҚ және олардың сәйкес гидридтерінде сіңірілуі және бөлінуі бейнеленген [22]

ЖЭҚ конфигурациялық энтропия бар, ол $\Delta S_{\text{conf}} \geq 1,5R$ құрайды. Осы қасиетінің арқасында олардың кристалдық деформациялары ерекше, бұл сутегін сақтау үшін қолайлы фазаларға артықшылық береді [23]. Бір фазалы ОЦК құрылымы бар ЖЭҚ сутегін сақтау сыйымдылығы жоғары екені белгілі [24-26]. ОЦК және Лавес фазалары бар қорытпалар сутегімен бөлме температурасында жоғары реакциялық қабілеттілікті көрсетеді және болашақта сутегін сақтау үшін перспективті материалдар болып табылады [27, 28].

Жоғары энтропиялық қорытпалардың әсері С14 типті Лавес бір фазалы құрылымының түзілуіне ықпал етеді, ал сутегін сақтау үшін максималды сыйымдылық сутегі мен қорытпаның түзілу энтальпиясымен тығыз байланысты. Демек, ОЦК және Лавес фазалары бар көп компонентті жоғары энтропиялық қорытпалар сутегін сақтау үшін тамаша мүмкіндіктер ұсынады.

Айқын болғандай, қорытпадағы элементтер гидрлеу кезінде сутегі атомдарымен коваленттік байланысу энергиясына байланысты әртүрлі рөл атқарады [29,30]. Сутегін сақтау үшін пайдаланылатын қорытпалар үшін шамамен 95 масс. % тұрақты С14 Лавес құрылымы бар жоғары энтропиялық қорытпалар аса қажет [31, 32].

Сутегін сақтау қасиеттерін эксперименттік өлшеу өте қиын процесс болғандықтан, көп компонентті қорытпалардың кең ауқымын зерттеу үшін есептеу құралдары қажет. Ерте зерттеулердің бірінде Зепон және т.б. көп компонентті ОЦК-құрылымды қорытпалар үшін қысым-құрамы-температурасы (ҚҚТ) диаграммаларын есептеуге арналған термодинамикалық модель ұсынды [33]. Қорытпаларды жобалауда модельді қолдану үшін олар ашық бастапқы коды бар бағдарлама әзірлеп, оны $\text{Ti}_{0,3}\text{V}_{0,3}\text{Nb}_{0,3}\text{M}_{0,1}$ қорытпаларының ҚҚТ-диаграммаларына әртүрлі металдардың әсерін зерттеу үшін қолданды [34]. $\text{Ti}_{0,3}\text{V}_{0,3}\text{Nb}_{0,3}\text{Sc}_{0,1}$ қорытпасы базалық қорытпадан үш ретті төмен тепе-теңдік қысымды көрсетті. Бұл нәтижелер модель мен кодты көптеген қорытпаларды жылдам скрининг жасау және болжау үшін тиімді пайдалануға болатынын, қорытпаларды жобалау үшін құнды құрал екенін көрсетеді.

Белгілі болғандай, практикалық қолдану үшін сутегінің десорбциясы қоршаған ортаға жақын жағдайларда, яғни температура 1-ден 100 °С дейін және қысым 1-ден 10 атм аралығында болуы керек. Као және т.б. [35] С14 Лавес типті бір фазалы құрылымы бар $\text{CoFeMnTi}_x\text{V}_y\text{Zr}_z$ қорытпасының сутегін сақтау қасиеттерін зерттеді. $\text{CoFeMnTi}_2\text{VZr}$ қорытпасы бөлме температурасында сутегін сақтау бойынша максималды сыйымдылығы 1,8 масс. % дейін екенін көрсетті.

$\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ қорытпаларында алюминийдің (Al) атомдық пайызын өзгерткен кезде металды тікелей тұндыру технологияларын қолдану арқылы үш түрлі микроструктура

алынды [36-38]. Al мөлшері артқан сайын микроструктура бастапқы ГЦК (гранеорталықтандырылған кубтық) құрылымнан ГЦК/ОЦК (көлемдік-орталықтандырылған кубтық) қоспасына өзгеріп, кейіннен толығымен ОЦК фазаға өтті [39,40]. Боркар және т.б. [41] $AlCo_xCr_{1-x}FeNi$ қорытпасындағы кобальт (Co) пен хромның (Cr) рөлін жүйелі түрде зерттеді. Нәтижелер көрсеткендей, $x = 1$ кезінде $AlCoFeNi$ қорытпасы B2 фазасының эквивакиалды түйірлеріне ие болды, бұл B2 фазасының ішінде никель және алюминийге бай аймақтар мен темір және кобальтқа бай аймақтардың ерте сатыдағы бөлінуін көрсетеді. $x = 0$ кезінде $AlCrFeNi$ қорытпасының түйірлері айқын спинодальды ыдырауды көрсетті, бұл ОЦК + B2 микроструктурасының түзілуіне әкелді. $Al_xCoCrFeNi$ үшін $x = 0,15-0,37$ кезінде ГЦК фаза түзілді, содан кейін $x=0,41$ кезінде ГЦК фазасында ВСС/В2 преципитациясы болды. Al құрамын одан әрі арттыру ВСС/В2 басымдылығына әкелді, ал $x = 0,69$ кезінде түйірлер шекараларында ГЦК преципитациясы басталды [42,43].

Кунце және т.б. сутегін сақтау қасиеттерін лазерлік балқыту (LMD) процесі арқылы алынған $ZrTiVCrFeNi$ қорытпасында зерттеді, ал сіңіру-десорбциялау қисықтары сурет 3а-да көрсетілген. Синтезден кейін материалды химиялық құрамын жақсарту үшін 1000 °С температурада 24 сағат бойы күйдірді. Қорытпа негізінен лазерлік синтезден және қосымша күйдіруден кейін алынған аздаған α -Ti қатты ерітіндісімен бірге С14 Лавес фазасынан тұрды. Сутегін сақтау сыйымдылығын өлшеу 50 °С температурада және 100 бар қысымда жүргізілді, ал үлгі 500 °С температурада 2 сағат бойы белсендірілді. Сурет 3а-да көрсетілгендей, синтезден кейін сутегін сақтау бойынша максималды сыйымдылық 1,81 масс. %, ал күйдіргеннен кейін 1,56 масс. % жетті. Алайда сутегінің десорбциясының тепе-теңдік қысымы толық десорбция үшін тым төмен болды.

$TiZrVCrFeNi$ вакуумдық доғалық балқыту процесін пайдалану арқылы синтезделген материалмен салыстыру қызықты, ол бөлме температурасында белсендірілген сутегіні қайтымды сақтауды қамтамасыз ете алады [44]. Бұл материалдың сутегі сыйымдылығы бірінші циклде 1,6 масс. % және үшінші циклде 1,7 масс. % болды.

$Al_xCoCrFeNi$ және $Al_xCuFeNiCoCr$ ЖЭҚ тек микроструктуралық, коррозиялық және механикалық қасиеттерімен ғана емес, сондай-ақ сутегі сақтау жүйелерінде қолдану үшін қажетті ГЦК және ОЦК фазаларының күшті бір фазалы құрылымдарын көрсетеді [45,46]. Трансмиссиялық электрондық микроскопты пайдаланып $AlCoCrCuFeNi$ терең зерттеу нәтижелері бойынша қорытпа бірнеше нанометр өлшемдегі домен тәрізді құрылымы бар реттелген ОЦК фазасын қамтитынын көрсетті, ал оның ыдырауы бинарлық жүйелердің араласу энтальпиясына байланысты болды [47,48].

$HfNbTiVZr$ жоғары энтропиялы отқа төзімді қорытпасы вакуумдық доғалық балқыту әдісі арқылы жасалды, ал гидрлеу өлшемдері 289 °С, 317 °С және 341 °С жоғары температураларда жүргізілді [49]. 10 барда қол жеткізілген максималды сыйымдылық, бағалау үшін қолданылған температураға қарамастан, 1,9 Н/М құрады.

Сутегі энергетикасындағы ЖЭҚ қолданудың негізгі артықшылықтары:

- Жоғары сақтау тығыздығы: ЖЭҚ жоғары сутегі тығыздығы бар гидридтерді жасауға қабілетті, бұл сақтау жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін өте маңызды.

- Коррозияға төзімділік: Жоғары энтропиялы қорытпалар коррозияға жоғары төзімділікті көрсетеді, бұл сақтау жүйелерінің қызмет ету мерзімін ұзартып, техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтады.

- Механикалық беріктік: ЖЭҚ-тың жоғары беріктігі сутегіні сақтау үшін ықшам әрі жеңіл конструкциялар жасауға мүмкіндік береді.

- Термодинамикалық қасиеттерді оңтайландыру: ЖЭҚ негізіндегі көп компонентті гидридтер жүйе өнімділігін арттыратын оңтайлы термодинамикалық қасиеттерге жету үшін реттелуі мүмкін.

Қорытынды

Жоғары энтропиялы қорытпалар сутегіні сақтау саласындағы төңкерістік қадам болып табылады, олар сутегі энергетикасына қатысты көптеген мәселелерді шешуге мүмкіндік беретін ерекше қасиеттерге ие. Бұл саладағы зерттеулер жалғасуда және ЖЭҚ-ты түсіну мен қолданудағы алдағы жетістіктер сутегіні сақтау жүйелерін тиімдірек, қауіпсіз және тұрақтырақ дамытуға ықпал етеді деп күтілуде. Бұл материалдар сутегі энергетикасының болашағында маңызды рөл атқарып, энергияның таза көздеріне көшуді қамтамасыз етеді және адамзаттың көміртегі ізіне оң әсер етеді.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (№ BR24992854 «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия саласының тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін бәсекеге қабілетті ғылыми негізделген технологияларды әзірлеу және іске асыру» гранты).

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Babanli, M. B., & et al. (2019). Material selection methods: A review. *In 13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018* (pp. 929–936). Springer International Publishing.
2. Wendt, U. (2021). Engineering materials and their properties. *In Springer Handbook of Mechanical Engineering* (pp. 233–292).
3. Rogachev, A. S. (2020). Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*, 121(8), 807–841.
4. Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Gan, J.-Y., Chin, T.-S., Shun, T.-T., Tsau, C.-H., & Chang, S.-Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(8), 299–303.
5. Wang, Y. P., Li, B. S., & Heng, Z. F. (2009). Solid solution or intermetallics in a high entropy alloy. *Advanced Engineering Materials*, 11(8), 641–644.
6. Singh, S., Wanderka, N., Murty, B. S., Glatzel, U., & Banhart, J. (2011). Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 59, 182–190.
7. Senkov, O. N., Wilks, G. B., Scott, J. M., & Miracle, D. B. (2011). Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 11, 698–706.
8. Chou, H.-P., Chang, Y.-S., Chen, S.-K., & Yeh, J.-W. (2009). Microstructure, thermophysical and electrical properties in Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering B*, 163, 184–189.
9. Zhang, Y., & Zhou, Y. J. (2007). Solid solution formation criteria for high entropy alloys. *Materials Science Forum*, 561–565, 1337–1339.
10. Yeh, J. W., & et al. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303.
11. Cantor, B., & et al. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213–218.
12. Swalin, R. A. (1972). *Thermodynamics of solids*.
13. Ye, Y. F., & et al. (2016). High-entropy alloy: Challenges and prospects. *Materials Today*, 19(6), 349–362.
14. Manzoni, A., Daoud, H., Volk, R., Glatzel, U., & Wanderka, N. (2013). Phase separation in inequatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*, 132, 212–215.
15. Otto, F., Yang, Y., Bei, H., & George, E. P. (2013). Relative effect of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61, 2628–2638.
16. Kuznetsov, V. A., Shaysultanov, D. G., Stepanov, N. D., Salishchev, G. A., & Senkov, O. N. (2013). Superplasticity of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy. *Material Science Forum*, 735, 146–151.
17. Kuznetsov, V. A., Shaysultanov, D. G., Stepanov, N. D., Salishchev, G. A., & Senkov, O. N. (2012). Tensile properties of an AlCrCuFeNiCo high-entropy alloy in as-cast and wrought conditions. *Material Science and Engineering A*, 533, 107–118.
18. Cheng, B., Li, Y., Li, X., Ke, H., Wang, L., Cao, T., Wan, D., & Wang, B. (2023). Solid-state hydrogen storage properties of Ti–V–Nb–Cr high-entropy alloys and the associated effects of transitional metals (M = Mn, Fe, Ni). *Acta Metallurgica Sinica*, 36, 1113–1122.

19. Dangwal, S., & Edalati, K. (2024). High-entropy alloy TiV₂ZrCrMnFeNi for hydrogen storage at room temperature with full reversibility and good activation. *Scripta Materialia*, 238, 115774.
20. Ma, Y., Ma, Y., Wang, Q., Schweidler, S., Botros, M., Fu, T., Hahn, H., Brezesinski, T., & Breitung, B. (2021). High-entropy energy materials: Challenges and new opportunities. *Energy & Environmental Science*, 14, 2883–2905.
21. de Marco, M. O., Li, Y., Li, H. W., Edalati, K., & Floriano, R. (2020). Mechanical synthesis and hydrogen storage characterization of MgVCr and MgVTiCrFe high-entropy alloys. *Advanced Engineering Materials*, 22.
22. Zepon, G., Leiva, D. R., Strozi, R. B., Bedoch, A., Figueroa, S. J. A., Ishikawa, T. T., & Botta, W. J. (2018). Hydrogen-induced phase transition of MgZrTiFe_{0.5}Co_{0.5}Ni_{0.5} high-entropy alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 1702–1708.
23. Strozi, R. B., Leiva, D. R., Huot, J., & Botta, W. J. (2021). Synthesis and hydrogen storage behavior of Mg–V–Al–Cr–Ni high entropy alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 2351–2361.
24. Aoki, M., Noritake, T., Ito, A., Ishikiriyama, M., & Towata, S. I. (2011). Improvement of cyclic durability of Ti–Cr–V alloy by Fe substitution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 12329–12332.
25. Huot, J., Enoki, H., & Akiba, E. (2008). Synthesis, phase transformation, and hydrogen storage properties of ball-milled TiV_{0.9}Mn_{1.1}. *Journal of Alloys and Compounds*, 453, 203–209.
26. Sahlberg, M., Karlsson, D., Zlotea, C., & Jansson, U. (2016). Superior hydrogen storage in high entropy alloys. *Scientific Reports*, 6, 36770.
27. Dewangan, S. K., Sharma, V. K., Sahu, P., & Kumar, V. (2020). Synthesis and characterization of hydrogenated novel AlCrFeMnNiW high entropy alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 16984–16991.
28. Chen, S. K., Lee, P. H., Lee, H., & Su, H. T. (2018). Hydrogen storage of C14-Cr_{0.5}Fe_{0.5}Mn_{0.5}Ti_{0.5}V_{0.5}Zr_{0.5} alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 336–347.
29. Edalati, P., Floriano, R., Mohammadi, A., Li, Y., Zepon, G., Li, H. W., & Edalati, K. (2020). Reversible room temperature hydrogen storage in high-entropy alloy TiZrCrMnFeNi. *Scripta Materialia*, 178, 387–390.
30. Zepon, G., Silva, B. H., Zlotea, C., Botta, W. J., & Champion, Y. (2021). Thermodynamic modelling of hydrogen-multicomponent alloy systems: Calculating pressure-composition-temperature diagrams. *Acta Materialia*, 215, 117070.
31. Pedroso, O. A., Botta, W. J., & Zepon, G. (2022). An open-source code to calculate pressure-composition-temperature diagrams of multicomponent alloys for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 32582–32593.
32. Kao, Y. F., Chen, S. K., Sheu, J. H., Lin, J. T., Lin, W. E., Yeh, J. W., Lin, S. J., Liou, T. H., & Wang, C. W. (2010). Hydrogen storage properties of multiprincipal-component CoFeMnTi_xVyZrz alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9046–9059.
33. Joseph, J., Jarvis, T., Wu, X., Stanford, N., Hodgson, P., & Fabijanic, D. M. (2015). Comparative study of the microstructures and mechanical properties of direct laser fabricated and arc-melted Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 633, 184–193.
34. Joseph, J., Stanford, N., Hodgson, P., & Fabijanic, D. M. (2017). Understanding the mechanical behaviour and the large strength/ductility differences between FCC and BCC Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 726, 885–895.
35. Joseph, J., Hodgson, P., Jarvis, T., Wu, X., Stanford, N., & Fabijanic, D. M. (2018). Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 733, 59–70.
36. Borkar, T., Gwalani, B., Choudhuri, D., Mikler, C. V., Yannetta, C. J., Chen, X., Ramanujan, R. V., Styles, M. J., & Gibson, M. A. (2016). A combinatorial assessment of Al_xCrCuFeNi₂ (0 < x < 1.5) complex concentrated alloys: Microstructure, microhardness, and magnetic properties. *Acta Materialia*, 116, 63–76.
37. Ocelík, V., Janssen, N., Smith, S. N., & De Hosson, J. T. M. (2016). Additive manufacturing of high-entropy alloys by laser processing. *JOM*, 68, 1810–1818.
38. Borkar, T., Chaudhary, V., Gwalani, B., Choudhuri, D., Mikler, C. V., Soni, V., Alam, T., Ramanujan, R. V., & Banerjee, R. (2017). A combinatorial approach for assessing the magnetic properties of high entropy alloys: Role of Cr in AlCoxCr1–xFeNi. *Advanced Engineering Materials*, 19, 1700048.
39. Sistla, H. R., Newkirk, J. W., & Liou, F. F. (2015). Effect of Al/Ni ratio, heat treatment on phase transformations and microstructure of Al_xFeCoCrNi_{2-x} (x=0.3, 1) high entropy alloys. *Materials and Design*, 81, 113–121.
40. Li, M., Gazquez, J., Borisevich, A., Mishra, R., & Flores, K. M. (2018). Evaluation of microstructure and mechanical property variations in Al_xCoCrFeNi high entropy alloys produced by a high-throughput laser deposition method. *Intermetallics*, 95, 110–118.
41. Zhang, W., Chabok, A., Kooi, B. J., & Pei, Y. (2022). Additive manufactured high entropy alloys: A review of the microstructure and properties. *Materials and Design*, 220, 110875.

42. Dada, M., Popoola, P., Mathe, N., Pityana, S., Adeosun, S., & Aramide, O. (2021). The comparative study of the microstructural and corrosion behaviour of laser-deposited high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 866, 158777.
43. Wang, Y., Li, R., Niu, P., Zhang, Z., Yuan, T., Yuan, J., & Li, K. (2020). Microstructures and properties of equimolar AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting. *Intermetallics*, 120, 106746.
44. Karlsson, D., Ek, G., Cedervall, J., Zlotea, C., Møller, K. T., Hansen, T. C., Bednarčík, J., Paskevicius, M., Sørby, M. H., Jensen, T. R., Jansson, U., & Sahlberg, M. (2018). Structure and hydrogenation properties of a HfNbTiVZr high-entropy alloy. *Inorganic Chemistry*, 57, 2103–2110.
45. Edalati, P., Floriano, R., Mohammadi, A., Li, Y., Zepon, G., Li, H. W., & Edalati, K. (2020). Reversible room temperature hydrogen storage in high-entropy alloy TiZrCrMnFeNi. *Scripta Materialia*, 178, 387–390.
46. Zhang, W., Chabok, A., Kooi, B. J., & Pei, Y. (2022). Additive manufactured high entropy alloys: A review of the microstructure and properties. *Materials and Design*, 220, 110875.
47. Dada, M., Popoola, P., Mathe, N., Pityana, S., Adeosun, S., & Aramide, O. (2021). The comparative study of the microstructural and corrosion behaviour of laser-deposited high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 866, 158777.
48. Wang, Y., Li, R., Niu, P., Zhang, Z., Yuan, T., Yuan, J., & Li, K. (2020). Microstructures and properties of equimolar AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting. *Intermetallics*, 120, 106746.
49. Karlsson, D., Ek, G., Cedervall, J., Zlotea, C., Møller, K. T., Hansen, T. C., Bednarčík, J., Paskevicius, M., Sørby, M. H., Jensen, T. R., Jansson, U., & Sahlberg, M. (2018). Structure and hydrogenation properties of a HfNbTiVZr high-entropy alloy. *Inorganic Chemistry*, 57, 2103–2110.

Сведение об авторах

Амангельдиева Ю. - магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан г.Туркестан,), e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru

Айдарова М. – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева (Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: maidarova@ektu.kz

Курбанбеков Ш.Р. – PhD, ассоциированный профессор, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан,г.Туркестан), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Балтабаева Д.Э. – магистр, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан,г.Туркестан), e-mail: baltabaeva-d@bk.ru

Эртаев Н.С. - магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави (Казахстан г.Туркестан,), e-mail: nurs.ertaev@gmail.com

Information about authors

Amangeldiyeva Y. - master's student, Yasavi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkestan), e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru

Aidarova M. – doctors student, Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Kazakhstan,Ust-Kamenogorsk), e-mail: maidarova@ektu.kz

Kurbanbekov Sh.R. – PhD, associate professor, Yasavi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkestan), e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Baltabayeva D.E. – master, Yasavi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkestan), e-mail: baltabaeva-d@bk.ru

Ertaev N.S. - master's student, Yasavi International Kazakh-Turkish University (Kazakhstan, Turkestan), e-mail: nurs.ertaev@gmail.com