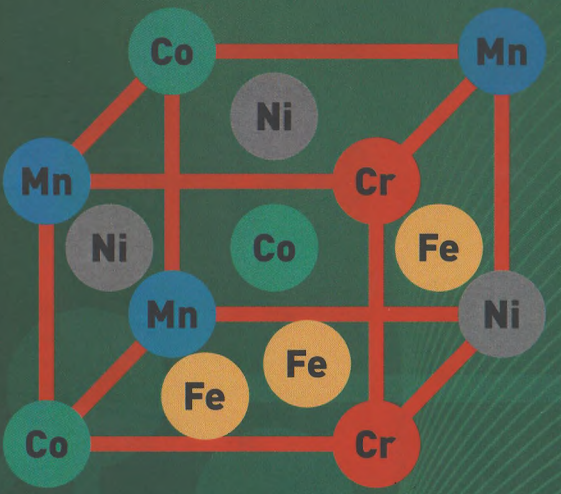
Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю.,
Аринова С.К., Абильдина А.Р.

FeCrNiCoMn

ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕГІ КВАЗИЖОҒАРЫЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА ҚҰРАМЫН ФЕРРОҚОРЫТПАЛАРДЫ ІШІНАРА ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӘЗІРЛЕУ



Қарағанды – 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

КОММЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМ
ӘБІЛҚАС САҒЫНОВ АТЫНДАҒЫ
ҚАРАҒАНДЫ ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Исагулов Аристотель Зейнуллинович
Квон Светлана Сергеевна
Куликов Виталий Юрьевич
Аринова Сания Каскатаевна
Абильдина Айжан Рымкулкызы

FeCrNiCoMn ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕГІ КВАЗИЖОҒАРЫЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА ҚҰРАМЫН ФЕРРОҚОРЫТПАЛАРДЫ ІШІНАРА ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӘЗІРЛЕУ

Монография
Университеттің Ғылыми кеңесі бекіткен
(№14 хаттама 03.07.2025 ж.)

Қарағанды, 2025

УДК 669.15-198
ББК 34.326
А15

Рецензенттер:

Макашева А.М. – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ «Машина жасау және металлургия» факультетінің деканы.

Байсанов А.С. – техника ғылымдарының кандидаты, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургиялық институтының «Пирометаллургиялық процестер» зертханасының меңгерушісі.

FeCrNiCoMn жүйесі негізіндегі квазижоғарыэнтропиялық қорытпа құрамын ферроқорытпаларды ішінара пайдалану арқылы әзірлеу: Монография / Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Аринова С.К., Абильдина А.Р. – Қарағанды: «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, 2025 – 119 бет.

ISBN 978-601-355-577-5

Монографияда жоғарыэнтропиялы қорытпаларды ферроқорытпаларды ішінара пайдалану арқылы балқыту мүмкіндігін зерттеуге арналған. Негізгі жүйе ретінде FeCrNiCoMn жүйесі таңдалған. Мұндай тәсіл шихта материалдарының арзандығы мен технологиялық процесстердің жеңілдетілуі есебінен қорытпаның өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде қорытпаның коммерциялық тартымдылығын арттырып, оны өндірістік қолданысқа енгізуге мүмкіндік тудырады.

Монография металлургия, материалтану және жаңа материалдарды әзірлеу салаларындағы ғалымдарға, инженерлерге, докоранттарға, магистранттарға және студенттерге құнды құрал ретінде ұсынылады.

ISBN 978-601-355-577-5

УДК 669.15-198
ББК 34.326

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ 5

1 **КВАЗИЖОҒАРЫЭНТРОПИЯЛЫ ҚОРЫТПА ЖҮЙЕСІН ЖӘНЕ ДӘЛДІК БӨЛШЕКТЕРІНІҢ АССОРТИМЕНТІН ӘЗІРЛЕУ ҮШІН ТАҢДАУ НЕГІЗДЕМЕСІ** 8

1.1 Тау-металлургиялық жабдықтардың дәлдік бөлшектерінің ассортиментін және олардың өндірісіндегі «мәселелі» орындарды анықтау мақсатында ҚР нарығына мониторинг жасау 8

1.2 ЖЭҚ және КЖЭҚ аясындағы әлемдік трендтерге ақпараттық талдау 15

1.3 КЖЭҚ өндірісі үшін қажетті шикізат базасына ақпараттық талдау 23

1.4 КЖЭҚ балқытуда ферроқорытпаларды қолданудың экономикалық тиімділігін есептеу 37

2 **КЖЭҚ ҚОРЫТПАСЫНДАҒЫ ФАЗАЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАРДЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРІ** 39

2.1 Thermo-Calc бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып CrMnNiFeCo жүйесіндегі фазалық түрленулерді термодинамикалық модельдеу 39

2.2 Қорытпадағы бейметалл қосындылардың түзілу үдерісін модельдеу 42

2.3 Негізгі тәжірибелерді жүргізу 45

2.4 Толық факторлық тәжірибе 47

2.5 Қоспалауыш элементтердің тәжірибелік қорытпа қасиеттеріне әсерін анықтауда ықтималдық-детерминирленген эксперименттік әдісті қолдану 59

3 **ЭКСПЕРИМЕНТТІК КЖЭҚ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМЫН ЗЕРТТЕУ** 70

3.1 Fe-Cr-Ni-Co-Mn жүйесі негізінде бастапқы зерттеулер жүргізу 70

3.2 Fe-Cr-Ni-Co-Mn жүйесінің квазижоғарыэнтропиялық қорытпаларының қасиеттеріне ниобийдің әсері 76

3.3 Тәжірибелік серияның көміртегі мөлшері жоғары құймаларын балқыту және қасиеттерін зерттеу 92

4 **Fe-Cr-Ni-Co-Mn ЖЭҚ ЖҮЙЕСІНІҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ МОЛИБДЕННІҢ ӘСЕРІ** 97

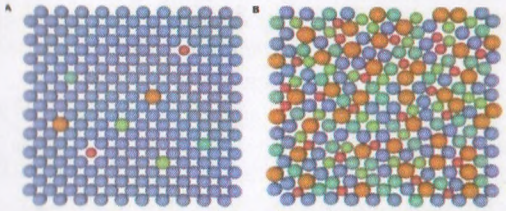
4.1 Fe-Cr-Ni-Co-Mn жоғары энтропиялық қорытпалар 97

жүйесінің қасиеттеріне молибденнің әсеріне қпараттық талдау
4.2 Молибденнің Fe-Cr-Ni-Co-Mn-Nb жүйесіндегі квазижоғарыэнтропиялы қорытпаның құю қасиеттеріне әсері 103
ҚОРЫТЫНДЫ 109
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі 110

КІРІСПЕ

Бүгінгі таңда жоғарыэнтропиялы қорытпалар (ЖЭҚ немесе HEA – ағылшын тіліндегі әдебиеттерде) деп кемінде 5 компоненттен тұратын, олардың құрамдық мөлшері эквиатомдық концентрацияда немесе әр компоненттің мөлшері 5% кем емес және 35% аспайтын қорытпаларды атайды. ЖЭҚ жасау қағидасы дәстүрлі жаңа қорытпалар алу тәсілдерінен ерекшеленеді. Дәстүрлі түрде жаңа материалдарды жасау – негізді матрица құрайтын бір негізгі элементті әртүрлі легирлеуші элементтермен қосу арқылы жүзеге асады. Мұндай қорытпалардағы беріктендіру тетіктері негізінен матрица базасында жаңа фазалар түзілуіне негізделген. Ал ЖЭҚ құрамында нақты бір негізгі матрица болмайды, оның орнына қорытпаға кіретін әр компонент құрылым мен қасиеттердің қалыптасуына тең үлес қосады.

Белгілі болғандай, «классикалық» қорытпаларда негізгі матрица бір базалық элементтен түзіледі, ал басқа компоненттер еріген зат түрінде аз мөлшерде болады (1, а-сурет). Жоғарыэнтропиялы қорытпалардың (ЖЭҚ) құрылымы дәстүрлі қорытпалардан негізгі матрицаның болмауымен ерекшеленеді, яғни барлық элементтер кристалдық тордың түйіндерінде орналасуға бірдей ықтималдыққа ие (1, б-сурет).



1-сурет – «Классикалық» қорытпадағы атомдардың орналасуы (а) және ЖЭҚ (б) [2]

ЖЭҚ ерекшелігі – гранеорталықтандырылған кубтық (ГОК) немесе көлемдік орталықтандырылған кубтық (КОК) торлы бірфазалы термодинамикалық тұрақты қатты ерітіндінің түзілуі [1-3]. Бұл құрылым ЖЭҚ тән ерекше қасиеттерді қамтамасыз етеді.

ЖЭҚ бірегей қасиеттері «ЖЭҚ коктейлі» деп аталатын төрт негізгі әсердің қалыптасуымен байланысты [4]:

- араласу энтропиясының жоғары мәні, бұл жоғары температураларда жүйенің термодинамикалық тұрақтылығын арттырып, қажетсіз фазалардың түзілуіне төзімділігін күшейтеді;

- кристалдық тордың құрылымдық бұрмалануы, ол дислокациялардың қозғалысына кедергі келтіреді және нәтижесінде жоғары беріктік қасиеттерді қамтамасыз етеді;

- атомаралық диффузия жылдамдығының төмен болуы, бұл қорытпада жаңа фазалардың түзілуін баяулатады;

- араласу әсері, ол қорытпаларға жоғары кешенді қасиеттер береді.

Барлық ЖЭҚ таза металдарды пайдалану арқылы және күрделі технологиялармен: механикалық легірлеу, плазмалық престеу, қорғаныш ортада көп мәрте қайта балқыту сияқты әдістермен алынады. Мұның барлығы ЖЭҚ-тың өзіндік құнының жоғары болуына әкеледі, бұл олардың қолданылу аясын шектейді және коммерциялық тартымдылығын төмендетеді.

Осы жұмыс жоғары энтропиялы қорытпаларды ішінара ферроқорытпаларды қолдана отырып балқыту мүмкіндігін зерттеуге арналған. Мұндай тәсіл қорытпаның өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді, себебі шихта материалдарының арзандығы мен балқыту және өңдеу технологиясының жеңілдетілуі қамтамасыз етіледі. Қорытпаның өзіндік құнының төмендеуі оның коммерциялық тартымдылығын арттырып, өндірісте қолдану әлеуетін кеңейтеді.

Классикалық ЖЭҚ айырмашылығы – әзірленген қорытпада элементтердің эквиатомдық концентрациясы қатаң сақталмайды, сондықтан оны квазижоғарыэнтропиялы қорытпалар (КЖЭҚ) класына жатқызу орынды. Мұндай терминология қазіргі уақытта жоғары энтропия қағидасы бойынша жасалған, бірақ құрамы, балқыту технологиясы және басқа параметрлері жағынан «классикалық» ЖЭҚ ерекшеленетін қорытпаларға қатысты қолданылады.

Зерттеу үшін базалық жүйе ретінде FeCrNiCoMn жүйесі таңдалды. Бұл таңдау мынадай себептерге байланысты жасалды: біріншіден, осы жүйедегі қорытпалар жақсы пайдаланушылық қасиеттерге ие; екіншіден, бұл жүйеге негізделген қорытпаларды әзірлеу – аустениттік және мартенситті қартаятын болаттардың дамуының келесі сатысы болып табылады, бұл КЖЭҚ технологиясын қолданыстағы өндірістік базаға оңай бейімдеуге мүмкіндік береді.

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі қаржыландыратын BR21882240 бағдарламасы аясында орындалды. Бағдарламаның атауы: «Қазақстандық шикізат пен дәлдік бөлшектерін өндіру технологиясын пайдалана отырып, квазижоғары энтропиялы қорытпаны жасау» (Қазақстан Республикасы Министрлігімен жасалған келісім-шарт № 378-ПЦФ-23-25, 15.11.2023ж.).

Авторлардың үлесі:

Исагулов А.З. – зерттеудің жалпы идеясы, нәтижелерді талдау және интерпретациялау. Кіріспе, 1.1-1.2 бөлімдері, Қорытынды.

Квон Св.С. – микроқұрылымдарды талдау, нәтижелерді интерпретациялау, 2.3, 3.1-3.2 бөлімдері.

Куликов В.Ю. – механикалық қасиеттерді зерттеу нәтижелерін талдау, 1.3-1.4, 3.3 бөлімдері.

Аринова С.К. – ақпараттық талдау және нәтижелерді математикалық өңдеу, 2.2, 2.4-2.5 бөлімдері.

Абильдина А.Р. – ақпараттық талдау, термодинамикалық модельдеу, құрылымдарды талдау, 2.1, 4.1-4.2 бөлімдері.

Автормен алғыс айтылады:

Профессор Ковалев П.В., Мельник С. (Санкт-Петербург мемлекеттік политехникалық университеті, Ресей, Санкт-Петербург қ.), Щербакова Е.П. – Калининград техникалық университетінің доценті (Ресей, Калининград қ.) осы зерттеуге қатысқаны үшін (2.2, 2.5 бөлімдері).

with Mo addition// Materials Today Communications. - Том 35, June 2023, Номер статьи 106020.

101. Yucheng Yang, Yaojia Ren, Yanwen Tian, Kaiyang Li, Lichun Bai, Qianli Huang, Quan Sha, Yingtao Tian, Hong Wu// Microstructure and tribological behaviors of $FeCoCrNiMoSi_x$ high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding/ - Surface and Coatings Technology,-Volume 432, - 25 February 2022, 128009

102. Yang, L.; Li, Y.; Wang, Z.; Zhao, W.; Qin, C. Nanoporous Quasi-High-Entropy Alloy Microspheres. Metals 2019, 9, 345.

103. Bazlov, A.; Strochko, I.; Ubyivovk, E.; Parkhomenko, M.; Magomedova, D.; Zanaeva, E. Structure and Properties of Amorphous Quasi-High-Entropy Fe-Co-Ni-Cr-(Mo,V)-B Alloys with Various Boron Content. Metals 2023, 13, 1464. https://doi.org/10.3390/met13081

104. Kvon, S.; Issagulov, A.;Kulikov, V.; Arinova, S.// Investigation of the properties of the CoCrFeMnNi alloy developed on the basis of the entropy approach (pp. 366-368)// Metalurgija 63 (2024) 3-4, p.366-368,ISSN 0543-5846, https://hrcak.srce.hr/file/456140

105. L.M. Du, L.W. Lan, S. Zhu, H.J. Yang , X.H. Shi, P.K. Liawc, J.W. Qia. Effects of temperature on the tribological behavior of Al0.25CoCrFeNi high-entropy alloy. Journal of Materials Science & Technology ,2019. pp. 917-925.

106. Рысс М.А. Производство ферросплавов. 2 - е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1985. - 244 с.

107. Трофименко Н.Н. Жаропрочные высокоэнтропийные сплавы // В сборнике: Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия. сборник докладов III Всероссийской научно-технической конференции. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. 2018. С. 106-113.

108. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропи-йных сплавов//Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 8. С. 807-841.

109. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 248-253.

110. Ивченко М.В., Пушин В.Г. Высокоэнтропийные эквиатомные сплавы Alcrfeconicu: гипотезы и экспериментальные факты // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 2. С. 57-69.

Исагулов Аристотель Зейнуллинович
Квон Светлана Сергеевна
Куликов Виталий Юрьевич
Аринова Сания Каскатаевна
Абильдина Айжан Рымкулкызы

FeCrNiCoMn ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕГІ КВАЗИЖОҒАРЫЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА ҚҰРАМЫН ФЕРРОҚОРЫТПАЛАРДЫ ШІНАРА ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӘЗІРЛЕУ

Монография

Подписано в печать 13.06.2025. Формат 60x90/16.
Усл. печ. л. 6.5. Тираж 500.
Отпечатанно в типографии РПК Calibri