

Феррохромды пайдалану арқылы коррозияға төзімді болаттың ұнтақ қоспасын дайындау

¹**АХМЕТОВ Аманкельды Серикбаевич**, PhD, аға ғылыми қызметкер, aman1aotero@gmail.com,

²***ТӨЛЕУҚАДЫР Руслан Төлеужанұлы**, магистр, ғылыми қызметкер, rus.toleukadyr@gmail.com,

³**ЖУНУСОВ Аблай Каиртасович**, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі, zhunusov_ab@mail.ru,

⁴**АЯГАНОВА Жұлдыз Темиржановна**, магистрант, ayaganova2003@list.ru,

²**МАХАМБЕТОВ Ерболат Нысаналыұлы**, PhD, зертхана меңгерушісі, makhambetovyerbolat@gmail.com,

¹«QazMetals Engineering F30» ЖШС, Мұқанов көшесі, 61/2, Қарағанды, Қазақстан,

²Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Ермаков көшесі, 63, Қарағанды, Қазақстан,

³«Торайғыров университеті» КеАҚ, Ломов көшесі, 64, Павлодар, Қазақстан,

⁴«МИСиС» ұлттық зерттеу технологиялық университеті, Ленинский даңғылы, 4, Мәскеу, Ресей,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Илемдеу отқабыршағынан алынған темір ұнтағы негізінде дисперсті өздігінен ұнтақталатын ФХ800А жоғары көміртекті феррохромды (ЖКФХ) легирлеуші қоспа ретінде қолдану арқылы коррозияға төзімді болаттың ұнтақ қоспасын алу мүмкіндігі зерттелді. Бастапқы отқабыршақ ультрадыбыстық ваннада әртүрлі орталарда тазаланды және этил спиртінің сода ерітіндісіне қарағанда ластануларды анағұрлым тиімді жоятындығы анықталды, бұл оның жақсы ылғалдандыру қабілетіне, белсенді кавитацияға және органикалық қоспаларды еріту қасиетіне байланысты. Тазалаудан кейін отқабыршақ сутегімен тотықсыздандырылып, планетарлық центрифугалы диірменде (ПЦД) механикалық өңдеуден өткізілді. Осындай өңдеу тотықсыздандырылған ұнтақ пен ЖКФХ қоспасына да жүргізілді. Растрлық электрондық микроскопия (РЭМ) және элементтердің таралу карталары ұнтақ қоспасында хром мен кремнийдің біркелкі таралғанын көрсетті, бұл жоғары энергиялы ұнтақтау барысында механикалық легирлеудің жүзеге асқанын дәлелдейді. Алынған нәтижелер ферроқорытпаларды коррозияға төзімді болат ұнтақ қоспаларын алуға элементар ұнтақтарға қолжетімді әрі экономикалық тиімді балама ретінде қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Кілт сөздер: ферроқорытпа, хром, болат, коррозияға төзімді болат, легирлеу, ұнтақ металлургиясы.

Кіріспе

Ұнтақ болаттарды алудың бірнеше әдістері бар, олардың ішінде өнеркәсіпте ең кең таралғаны – балқыманы шашырату (диспергирлеу) әдісі болып табылады [1]. Бұл әдістің мәні болатты балқытып, кейін балқыма ағынын газ немесе су ағынымен шашырату арқылы сфералық немесе дөңгелек морфологияға ие ұнтақ бөлшектерін алу болып табылады. Әдістің артықшылығы – салыстырмалы түрде төмен өзіндік құны бар және химиялық құрамы біркелкі ұнтақтарды алу мүмкіндігі. Ал кемшілігі – бөлшектер бетінің жоғары қаттылығы, соның салдарынан оларды тығыздау үшін ыстық престеу немесе ыс-

тық изостатикалық престеу сияқты күрделі әрі қымбат технологиялар қажет болуында. Сондықтан балама ретінде болат ұнтақ қоспаларын алу кеңінен қолданылады [2].

Мұндай қоспалар, әдетте, таза темір, легирлеуші элементарлы ұнтақтарын және көміртек көзі ретінде графит немесе күйе ұнтақтарын араластыру арқылы алынады. Коррозияға төзімді болаттар үшін негізгі легирлеуші элемент ретінде хром ұнтағы енгізіледі. Темір матрицасының жеткілікті пластикалығының арқасында мұндай қоспалар суық престеу және кейінгі изотермиялық жентектелу сияқты қарапайым технологиялармен оңай қалыптасады.

Сонымен қатар, диффузиялық легирленген ұнтақтар да қолданылады, мұнда легирлеуші элементтер жоғары температурада негізгі матрицамен металдық байланыс түзеді [3]. Мұндай жағдайда ұнтақ қоспасы вакуумда, инертті немесе тотықсыздандырғыш ортада қыздырылып, бөлшектер арасында диффузиялық байланыс қалыптасады. Сондай-ақ темір ұнтағының құрамына оңай тотықсызданатын қосылыстар енгізіліп, олар кейінгі өңдеу барысында металдық күйге келтіріледі.

Алайда коррозияға төзімді болаттар үшін элементарлы хром ұнтағының қымбаттылығы және хром оксидінің сутегімен төмен температурада тотықсызданбауы бұл әдісті шектейді. Сондықтан зерттеулер көбінесе вольфрам, молибден және кобальт сияқты оңай тотықсызданатын металдардың оксидтеріне бағытталған [4]. Ал хром оксиді қалыпты жағдайда сутегімен тотықсызданбайды.

Қазіргі уақытта ферроқорытпаларды ұнтақ металлургиясында легирлеуші элемент көзі ретінде қолдану бойынша зерттеулер өте аз. Алайда ферроқорытпаларда диффузия коэффициенті жоғары болуы мүмкін, бұл легирлеуші элементтердің біркелкі таралуына мүмкіндік береді. Сонымен қатар ферроқорытпалардың құны элементар ұнтақтарға қарағанда едәуір төмен және олардың құрамындағы негізгі әрі қосымша элементтердің оңтайлы арақатынасы қажетті болат құрамын қамтамасыз ете алады.

Ферроқорытпаларды қолданудағы тағы бір артықшылық – өздігімен ұсақталу қасиетінде және ұсақтау кезінде пайда болатын дисперсті фракцияларды қолдану мүмкінді-

гінде.

Бұл жұмыстың мақсаты – илемдеу отқабыршағынан алынған темір ұнтағы мен феррохром ұнтағы негізінде коррозияға төзімді болаттың ұнтақ қоспасын алу мүмкіндігін эксперименттік тұрғыдан зерттеу.

Материалдар мен әдістер

Бастапқы материалдар ретінде илемдеу отқабыршағы және өздігінен ұсақталатын ФХ800А ЖКФХ ұнтағы қолданылды. 1-кестеде бастапқы материалдардың химиялық құрамдары көрсетілген.

Илемдеу отқабыршағы бастапқы түрде тек металл емес қоспаларға ие болумен қоса майлы болды. Отқабыршақ ультрадыбыстық ваннада әртүрлі орталарда тазаланды (35-40 кГц, 60 минут). Тазаланған отқабыршақ сутегі ағынында 1050°C температурада 60 минут тотықсыздандырылды. Алынған кеуекті өнім ПЦД 800 айн/мин жылдамдықпен 30 минут ұнтақталды. Ұнтақ 250 мкм електен өткізілді. Кейін темір ұнтағы мен ЖКФХ ұнтағы 4:1 массалық қатынаста араластырылып, сол режимде механикалық өңделді.

Микроструктуралық зерттеулер ZerTools ZEM20 (ZerTools, ҚХР) электрондық микроскопында және Oxford (Oxford Instruments, Ұлыбритания) EDS жүйесінде жүргізілді.

Нәтижелер және талқылау

2-кестеде бастапқы илемдеу отқабыршағын соданың сулы ерітіндісі мен этил спиртінде ультрадыбыстық ваннада тазалау нәтижесінде алынған химиялық құрамы көрсетілген.

2-кестеден этил спирті ортасында ультрадыбыстық өңдеуден кейін отқабыршақтың едәуір дәрежеде тазаланғанын көруге болады. Элементтік талдау нәтижелері натрий

1-кесте – Бастапқы материалдардың химиялық құрамы

Материал	Элементтің үлесі, %										
	O	Na	S	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Cr	P	C
Илемдеу отқабыршағы	40,22	5,12	0,16	1,28	4,02	8,45	0,40	40,35	-	-	-
ЖКФХ ұнтағы	-	-	0,06	-	2	-	-	ост.	75,0	0,03	7,0

2-кесте – Әртүрлі ортада ультрадыбыстық ваннада тазартылған отқабыршақтың химиялық құрамы

Тазарту ортасы	Элементтің үлесі, %								
	O	Na	S	Al	Si	Ca	Mn	Fe	
Сода ерітіндісі	36,62	4,13	0,11	0,99	3,88	7,87	0,44	45,96	
Этил спирті	31,47	0,58	0,15	0,56	1,79	3,08	0,30	62,07	

мөлшерінің 5 есе, кремнийдің 2 есе және кальцийдің 2,5 есе азайғанын көрсетті.

Ультрадыбыстық тазалау кавитация құбылысына негізделген: пайда болып, кейін жарылатын көпіршіктер жергілікті қысым соққыларын және микросоқпақ ағындарды тудырады, олар механикалық жанасусыз ластануларды бұзып, оксидтік қабықшаларды жояды. Этил спирті сода ерітіндісіне қарағанда төменірек беттік керілуі мен жақсырақ ылғалдандыру қабілетінің арқасында тиімдірек тазартады, бұл кавитациялық көпіршіктердің бөлшектер бетіне жақынырақ жарылуына мүмкіндік беріп, тазалау әсерін күшейтеді. Сонымен қатар, спирт органикалық ластануларды жақсы ерітеді, ал сода ерітіндісі жоғары тұтқырлық пен беттік керілу салдарынан кавитацияны ішінара бәсеңдетеді.

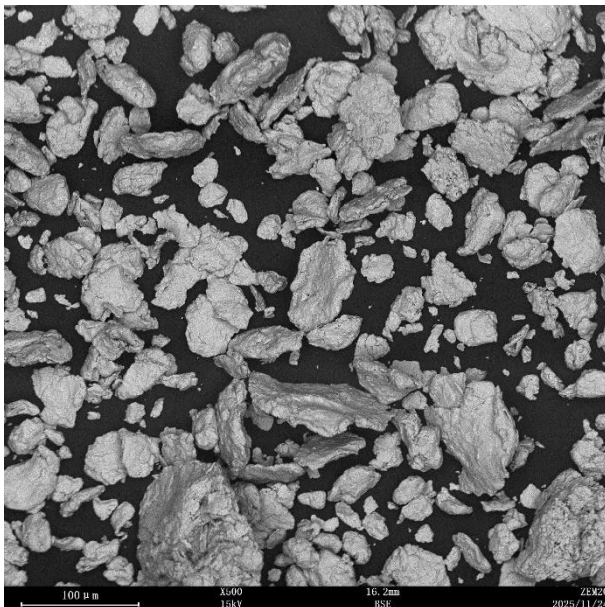
Ультрадыбыстық ваннаның өздігінен 50-60°C температураға дейін қыздырылуы сұйықтардың тұтқырлығы мен беттік керілуін төмендету арқылы процесті күшейтеді. Спирт ортасында бұл органикалық қабықшалардың ерігіштігін қосымша арттырып, кавитацияны қарқындатады, ал сода ерітіндісінде суда еритін ластанулардың еруі күшейгенімен, әсер әлсіздеу байқалады. Нәтижесінде спирт ортасы бөлшектердің анағұрлым терең және біркелкі тазалануын қамтамасыз етеді.

Сонымен бірге, тазалау ортасы ретінде этил спиртінің қымбаттығын атап өткен жөн, бұл болашақта басқа баламаларды іздеуге итермелейді.

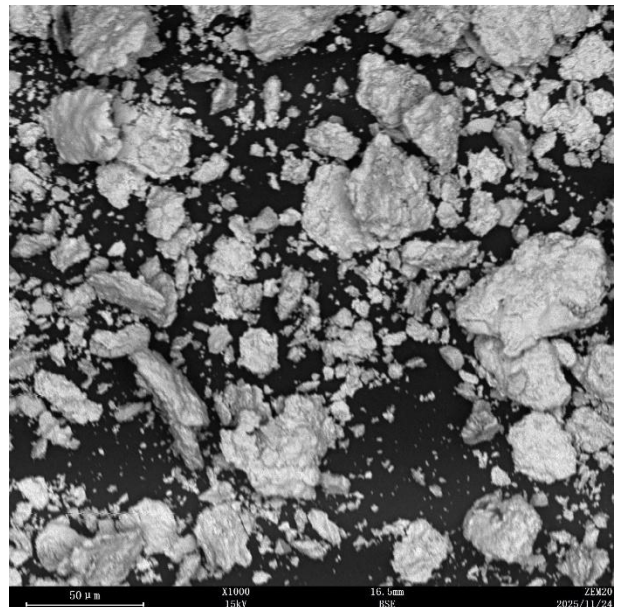
Тазаланған отқабыршақ шарлы диірменде ұнтақталып, ұяшық өлшемі 250 мкм болатын електен өткізілді және одан әрі сутегі ағынында 1050°C температурада 60 минут бойы тотықсыздандырылды. Тотықсыздандырылған отқабыршақ ПЦД механикалық өңдеуден өткізілді. Одан кейін дәл осындай режимде ПЦД-де өңделген тотықсыздандырылған отқабыршақты өздігінен ұсақталатын ЖКФХ ұнтағымен ПЦД-де араластыру жүргізілді.

1-суретте ПЦД-де өңдеуден кейін алынған тотықсыздандырылған ұнтақ бөлшектерінің және оның ЖКФХ ұнтағымен механикалық өңделген қоспасының РЭМ көмегімен алынған бейнелері көрсетілген.

1-суретте келтірілген бейнелер кері шашыраған электрондарды тіркеу режимін қолдану арқылы алынған, бұл бейнелердегі контраст бойынша химиялық құрамды бағалауға мүмкіндік береді. 1-суреттен тотықсыздандырылған отқабыршақ бөлшектерінің де, оның ЖКФХ ұнтағымен қоспасының да біркелкілігі байқалады. Бұл зерттеліп отырған материалдардың жоғары тазалығын көрсетеді. Тотықсыздандырылған отқабыршақ бөлшектері негізінен пластинкалы морфологиямен сипатталады, бұл олардың жоғары пластикалығына байланысты. ЖКФХ бөлшектері төменірек пластикалығымен, жоғары қаттылығымен және морттылығымен сипатталады. Сондықтан өлшемі 5–10 мкм-ден кіші ұсақ бөлшектер ЖКФХ бөлшектері болуы мүмкін. Бұл болжамды нақтылау үшін



а



ә

1-сурет – ПЦД-де өңделген тотықсыздандырылған отқабыршақ ұнтағының (а) және оның ЖКФХ ұнтағымен қоспасының (ә) РЭМ-бейнелері

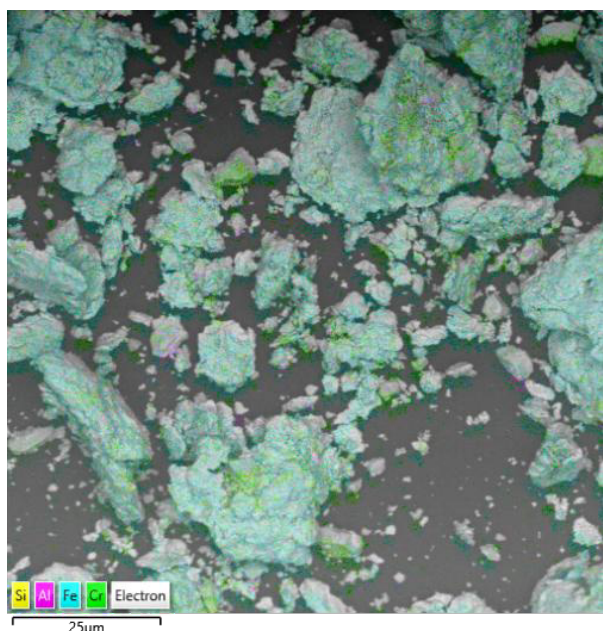
элементтердің таралу картасы жасалды. Нәтижелер 2-суретте келтірілген.

2-суреттен көрініп тұрғандай, ЖКФХ жекелеген бөлшектерінің сегрегациясыз хромның біркелкі таралуы байқалады. ЖКФХ-қа ілеспе элемент болып табылатын кремний де қоспа құрамында бар.

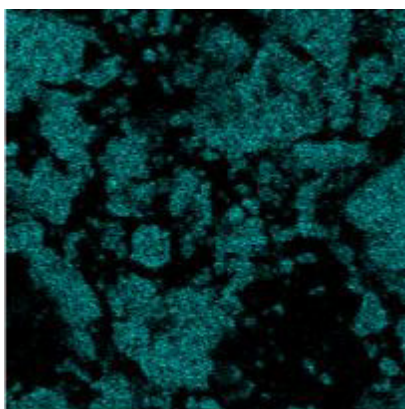
Легирлеуші элементтердің мұндай таралуы ПЦД-де жоғары энергиялы өңдеу барысында пайда болатын механикалық легирлеумен түсіндіріледі [5]. ЖКФХ-тың анағұрлым морт бөлшектері ұсақталып, тотықсыздандырылған темір ұнтағының беті бойынша біркелкі таралады, ал ұнтақтағыш денелермен соқтығысулар оксидтік қабықшалардың жойылуын, ақаулардың жиналуын және бөлшектердің активтенуін қамтамасыз етеді. Нәтижесінде таза, реакцияға

қабілетті беттер қалыптасады және кристалдық тордың ақаулылығы артады, бұл диффузияның энергетикалық тосқауылын төмендетіп, кейінгі жентектелу кезінде хром мен кремнийдің темір матрицасына тиімді енуін жақсартады. Осылайша, механикалық легирлеу легирлеуші элементтердің біркелкі таралуын ғана емес, сонымен қатар қоспаның активтелген күйін қалыптастырып, жеделдетілген күйдіруге және анағұрлым біртекті микроструктураның түзілуіне ықпал етеді.

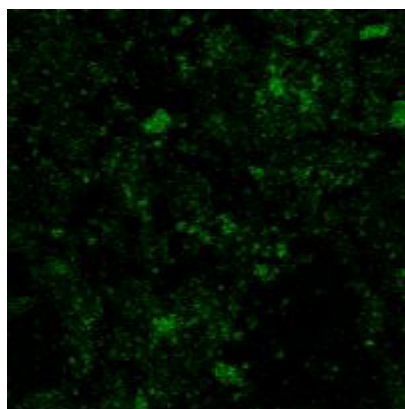
Ұнтақ қоспасының нәтижесіндегі құрамы, %: 15,00 Cr; 1,40 C; 0,24 Mn; 0,40 Si; 0,060 P; 0,012 S және қалғаны Fe. Бұл ұнтақ қоспасының құрамы коррозияға төзімді болаттардың 65X13 және 95X18 маркаларының құрамына жақын, алайда көміртек мөлшері



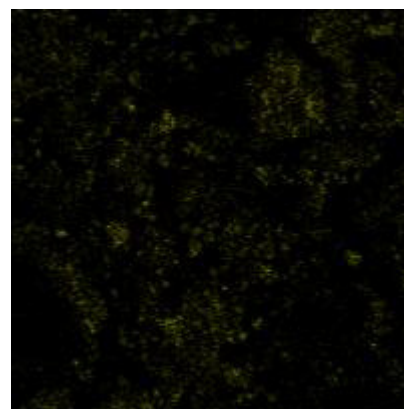
а



ә



б



в

2-сурет – Механикалық өңделген тотықсыздандырылған отқабыршақ пен ЖКФХ ұнтағы қоспасындағы элементтердің таралу картасы (а): Fe (ә), Cr (б) және Si (в)

сәл жоғары (көрсетілген маркаларда С, %: 0,6-0,70 және 0,90-1,00) және фосфор мөлшері де салыстырмалы түрде жоғары (көрсетілген маркаларда Р, %: 0,30-дан аспауы тиіс). Соған қарамастан, алынған нәтиже әдістің принциптік тұрғыдан іске асырылу мүмкіндігін дәлелдейді, ал әрі қарай сәйкес феррохром маркасын таңдау және/немесе көміртексіздендіру әдістерін қолдану қажетті құрамдағы ұнтақ қоспасын алуға мүмкіндік береді.

Қарастырылған коррозияға төзімді болат ұнтақ қоспасын алу әдісінің күтілетін әсерін эксперименттік тұрғыдан дәлелдеу келесі зерттеулерде жоспарлануда. Атап айтқанда, ЖКФХ құрамында көміртек мөлшері жоғары болғандықтан, коррозияға төзімді болаттарға қойылатын талаптарға сәйкес келмейтін ұнтақ қоспасын көміртексіздендіру мүмкіндігі зерттелетін болады. Мұндай көміртексіздендіруді сутегі ортасында немесе вакуумда жүргізуге болады, мұнда бөлшектердің дисперсті күйі мен олардың жоғары реакциялық қабілеті бұл процесті қайтадан тиімді етеді.

Қорытынды

1. Этил спиртінде отқабыршақты ультрадыбыстық тазалау тиімді әдіс екені анықталды, бұл Na, Si және Ca қоспаларының мөлшерін 2-5 есе төмендетіп, тотықсыздандырылған темір ұнтағының тазалығын арттырады.

2. Ультрадыбыстық тазалау, сутегімен

тотықсыздандыру және жоғары энергиялы механикалық өңдеуді үйлестіру жоғары дисперсті және жоғары реакциялық қабілетті темір ұнтағын алуды қамтамасыз ететіні көрсетілді.

3. Тотықсыздандырылған темір ұнтағы мен ФХ800А феррохромының қоспасын механикалық өңдеу механикалық легирлеуге және хром мен кремнийдің бөлшектер көлемі бойынша біркелкі таралуына алып келеді, бұл РЭМ және элементтердің таралу картасын тұрғызу әдістерімен расталды.

4. Алынған қоспаның химиялық құрамы (15% Cr, 1,40% С, 0,40% Si, 0,24% Mn, қалғаны Fe) 65X13 және 95X18 маркалы коррозияға төзімді болаттардың құрамына жақын, алайда көміртек мөлшерін одан әрі төмендетуді талап етеді.

5. ЖКФХ қолдану элементарлы хромға перспективалы әрі экономикалық тұрғыдан негізделген балама ретінде расталды; алынған қоспа коррозияға төзімді болатты кейіннен алу үшін жарамды, ал келесі зерттеулер көміртексіздендіру әдістерін әзірлеуге және жентектелген үлгілердің қасиеттерін бағалауға бағытталуы тиіс.

Қаржыландыру туралы ақпарат: Аталған зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің бағдарламалық-нысаналы қаржыландыруы аясында жүргізілді (BR24992758).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Rafael A.M., Celso A.B. High-Speed Steels Produced by Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy // Materials Science Forum. – 2025. Vol. 498-499. – Pp. 244-250. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.244>
2. Roland WARZEL III. High Performance Stainless Steel Mixes // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. – 2016. Vol. 63. – Pp. 591-594. <https://doi.org/10.2497/jjspm.63.591>
3. Zhaoqiang Tan, Yong Liu, Xiaolin Huang and Songlin Li. Fatigue Behavior of Alloy Steels Sintered from Pre-Alloyed and Diffusion-Bonding Alloyed Powders // Metals. – 2022. 12 (4), 659. – P. 12. <https://doi.org/10.3390/met12040659>
4. A.S. Akhmetov, Zh.V. Ereemeeva. Study of the Process of Diffusion Alloying of Mixture for Powdered High Speed Steel // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. Vol. 13. – Pp. 138-140. <https://doi.org/10.1134/S2075113322010038>
5. Leong Kean Wei, Shayfull Zamree Abd Rahim, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Allice Tan Mun Yin, Mohd Fathullah Ghazali, Mohd Firdaus Omar, Ovidiu Nemes, Andrei Victor Sandu, Petrica Vizureanu and Abdellah El-hadj Abdellah. Producing Metal Powder from Machining Chips Using Ball Milling Process: A Review // Materials. – 2023, 16 (13), 4635. – P. 43. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/13/4635>

Изготовление порошковой смеси коррозионнотстойкой стали с использованием феррохрома

¹**АХМЕТОВ Аманкельды Серикбаевич**, PhD, старший научный сотрудник, aman1aotero@gmail.com,

^{2*}**ТӨЛЕУҚАДЫР Руслан Төлеужанұлы**, магистр, научный сотрудник, rus.toleukadyr@gmail.com,

³**ЖУНУСОВ Аблай Каиртасович**, к.т.н., зав. кафедрой, zhunusov_ab@mail.ru,

⁴**АЯГАНОВА Жулдыз Темиржановна**, магистрант, ayaganova2003@list.ru,

²**МАХАМБЕТОВ Ерболат Нысаналыұлы**, PhD, зав. лабораторией, makhambetovyerbolat@gmail.com,

¹ТОО «НИЦ QazMetals Engineering», ул. Муканова, 61/2, Караганда, Казахстан,

²Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, ул. Ермакова, 63, Караганда, Казахстан,

³НАО «Торайгыров университет», ул. Ломова, 64, Павлодар, Казахстан,

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский проспект, 4, Москва, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Исследована возможность получения порошковой смеси коррозионнотстойкой стали на основе восстановленного из прокатной окалины железного порошка с использованием дисперсного саморассыпающегося высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ) марки ФХ800А в качестве легирующей добавки. Исходную окалину очищали в ультразвуковой ванне в различных средах, и установили, что этиловый спирт обеспечивает более глубокое удаление загрязнений, по сравнению с водным содовым раствором, благодаря лучшему смачиванию, более активной кавитации и способности растворять органические примеси. После очистки окалину восстановили водородом и подвергнули механической обработке в планетарной центробежной мельнице (ПЦМ), аналогичная обработка проводилась для смеси восстановленного порошка и ВУФХ. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) и картирование распределения элементов показали однородное распределение хрома и кремния в порошковой смеси, что свидетельствует о реализации механического легирования в процессе высокоэнергетического перемалывания. Представленные результаты демонстрируют перспективность применения ферросплавов в качестве доступной альтернативы элементарным порошкам при получении порошковых смесей коррозионнотстойких сталей.

Ключевые слова: ферросплав, хром, сталь, коррозионнотстойкая сталь, легирование, порошковая металлургия.

Manufacturing a Powder Mixture of Corrosion-resistant Steel Using Ferrochrome

¹**AKHMETOV Amankeldy**, PhD, Senior Researcher, aman1aotero@gmail.com,

^{2*}**TOLEUKADYR Ruslan**, Master's Degree, Researcher, rus.toleukadyr@gmail.com,

³**ZHUNUSOV Ablai**, Cand. of Tech. Sc., Head of Department, zhunusov_ab@mail.ru,

⁴**AYAGANOVA Zhuldyz**, Master's Student, ayaganova2003@list.ru,

²**MAKHAMBETOV Yerbolat**, PhD, Head of Laboratory, makhambetovyerbolat@gmail.com,

¹LLP «QazMetals Engineering Research Center», 61/2 Mukanov Street, Karaganda, Kazakhstan,

²Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, 63 Ermekov Street, Karaganda, Kazakhstan,

³NCJSC «Toraighyrov University», 64 Lomov Street, Pavlodar, Kazakhstan,

⁴National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninsky Avenue, Moscow, Russia,

*corresponding author.

Abstract. The study investigated the possibility of producing a powder mixture of corrosion-resistant steel based on iron powder recovered from rolled scale, using dispersed self-deagglomerating high-carbon ferrochrome (HCFC) FeCr800A as an alloying additive. The initial scale was cleaned in an ultrasonic bath in various media, and it was found that ethanol provides deeper removal of contaminants compared to an aqueous soda solution due to better wetting,

more active cavitation, and the ability to dissolve organic impurities. After cleaning, the scale was reduced with hydrogen and subjected to mechanical processing in a planetary centrifugal mill (PCM); a similar treatment was applied to the mixture of the reduced powder and HCFC. Scanning electron microscopy (SEM) and elemental mapping showed a uniform distribution of chromium and silicon in the powder mixture, indicating the implementation of mechanical alloying during high-energy milling. The results demonstrate the potential of using ferroalloys as an accessible alternative to elemental powders for producing powder mixtures of corrosion-resistant steels.

Keywords: *ferroalloy, chromium, steel, corrosion-resistant steel, alloying, powder metallurgy.*

REFERENCES

1. Rafael A.M., Celso A.B. High-Speed Steels Produced by Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy // Materials Science Forum. – 2025. Vol. 498-499. – Pp. 244-250. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.244>
2. Roland WARZEL III. High Performance Stainless Steel Mixes // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. – 2016. Vol. 63. – Pp. 591-594. <https://doi.org/10.2497/jjspm.63.591>
3. Zhaoqiang Tan, Yong Liu, Xiaolin Huang and Songlin Li. Fatigue Behavior of Alloy Steels Sintered from Pre-Alloyed and Diffusion-Bonding Alloyed Powders // Metals. – 2022. 12 (4), 659. – P. 12. <https://doi.org/10.3390/met12040659>
4. A.S. Akhmetov, Zh.V. Eremeeva. Study of the Process of Diffusion Alloying of Mixture for Powdered High Speed Steel // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. Vol. 13. – Pp. 138-140. <https://doi.org/10.1134/S2075113322010038>
5. Leong Kean Wei, Shayfull Zamree Abd Rahim, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Allice Tan Mun Yin, Mohd Fathullah Ghazali, Mohd Firdaus Omar, Ovidiu Nemes, Andrei Victor Sandu, Petrica Vizureanu and Abdellah El-hadj Abdellah. Producing Metal Powder from Machining Chips Using Ball Milling Process: A Review // Materials. – 2023, 16 (13), 4635. – P. 43. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/13/4635>