

ЧХ16 жоғары хромды шойынның микроқұрылымы мен трибологиялық қасиеттеріне ниобиймен, титанмен және ванадиймен кешенді легірілеудің әсері

¹*ТУЛЕПОВА Мәлдір Абілсеитқызы, докторант, moldir_a_nur@mail.ru,

¹КВОН Светлана Сергеевна, т.ғ.к., профессор, svetlana.1311@mail.ru,

¹КУЛИКОВ Виталий Юрьевич, т.ғ.к., профессор, mlpikm@mail.ru,

²ОКИШЕВ Константин Юрьевич, ф.-м.ғ.д., профессор, k.okishev@inbox.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

²Ресей Федерациясының бірінші президенті Б.Н. Ельцин атындағы Орал федералды университеті, Мира көшесі, 19, Екатеринбург, Ресей,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыста ниобий, титан және ванадиймен кешенді легірілеудің ЧХ16 маркалы жоғары хромды шойынның микроқұрылымы мен трибологиялық қасиеттеріне әсерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында базалық қорытпа және құрамында шамамен 1,5 масс. % Nb, 0,6 масс. % Ti және 0,6 масс. % V бар тәжірибелік қорытпа зерттелді. Микроқұрылымдық талдау нәтижелері бастапқы ЧХ16 шойынында материалдың жоғары морттылығын және карбидтер аралық жарылуға бейімділігін айқындайтын ірі пластиналы эвтектикалық M_7C_3 карбидтерінің қалыптасатынын көрсетті. Nb, Ti және V элементтерін енгізу неғұрлым изометриялық M_7C_3 карбидтерінің түзілуіне, сондай-ақ кристалдану орталықтары ретінде әрекет ететін және құрылымның ұсақталуына ықпал ететін $(Nb,V,Ti)_{1-x}C$ -типті дисперсті фазаның бөлінуіне әкелді. Трибологиялық сынақтардың нәтижелері легіріленген шойынның үйкеліс коэффициенті базалық шойынмен салыстырғанда шамамен 83%-ға төмендеп, 0,7-ден 0,12-ге дейін азаятындығын және сынау процесінде тұрақты мәнде сақталатынын көрсетті. Беткі профилометрия нәтижелері тозу тереңдігі мен кедір-бұдырлық параметрлерінің шамамен 50%-ға азайғанын анықтады, бұл кешенді легіріленген қорытпаның тозуға төзімділігінің айтарлықтай артқанын дәлелдейді. Алынған нәтижелер ниобий, титан және ванадиймен кешенді қоспалаудың жоғары тиімділігін көрсетеді, бұл ЧХ16 маркалы шойынның тозуға төзімділігін едәуір арттыруға және абразивтік тозу жағдайында жұмыс істейтін бөлшектер үшін қолдану аясын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: жоғары хромды шойын, карбид түзуші элементтер, микроқұрылым, тозуға төзімділік.

Кіріспе. Жоғары хромды ақ шойындар абразивтік және коррозиялық тозудың ауыр жағдайларында жұмыс істейтін бөлшектерді, атап айтқанда шламды сорғылардың жұмыс дөңгелектерін, диірмен қаптамаларын, ұсатқыш плиталарды және тау-кен-металлургиялық жабдықтың басқа да элементтерін дайындау үшін дәстүрлі түрде қолданылады [1]. Олардың микроқұрылымы, әдетте, аустениттік немесе мартенситтік матрицада орналасқан эвтектикалық M_7C_3 карбидтерінен тұрады, бұл жоғары қаттылық пен тозуға төзімділікті қамтамасыз етеді.

Алайда ірі өлшемді M_7C_3 карбидтері жоғары морттылықпен сипатталады және үгілуге бейім, өндірістік пайдалану жағдайларында мұндай қорытпалардың қызмет ету мерзімін шектейді. Осы шойындардың тозуға төзімділігін арттырудың тәсілдерінің бірі – қатты әрі тұрақты карбидтер түзетін және бір мезгілде эвтектикалық M_7C_3 фазасын модификациялайтын карбидтүзгіш элементтермен легірілеу болып табылады. Бұл бағытта ең үлкен назар ниобийге, ванадийге және титанға аударылған [2].

Ниобий аустенитте төмен ерігіштігімен

сипатталады және микроқаттылығы шамамен 2400 HV болатын бастапқы NbC карбидтерін түзеді, бұл эвтектикалық M₇C₃ карбидтерінің микроқаттылығынан (шамамен 1500 HV) едәуір жоғары. NbC карбидтерінің түзілуі эвтектикалық карбидтердің ұсақталуына ықпал етіп, қорытпаның тозуға төзімділігін арттырады. [3] деректері бойынша 0,9-1,6 масс. % Nb қосу жоғары хромды шойынның тозуға төзімділігін бастапқы құраммен салыстырғанда 48%-ға дейін арттырады. Сол сияқты, [4] жұмысында Nb мөлшерін 4 масс. %-ға дейін арттыру көлемдік тозудың төмендеуіне әкелетіні көрсетілген, ал [5] зерттеуінде Nb-ның төмен концентрацияларында (0,5-1,0 масс. %) ұсақ дисперсті NbC карбидтерінің біркелкі таралуын қамтамасыз ететін оңтайлы әсер байқалатыны анықталған.

Ванадий де жоғары хромды шойындардың микроқұрылымы мен қасиеттеріне елеулі әсер етеді. Ол микроқаттылығы 2600 HV-қа дейін жететін ұсақ дисперсті VC карбидтерін түзеді, бұл матрицаны да, карбидтік фазаны да нығайтады. [6] мәліметтері бойынша 0,5-1,0 масс. % V қосу VC карбидтерінің үлесін арттырып, тозуға төзімділікті жақсартады, ал ванадийдің жоғары мөлшері карбидтердің іріленуіне және морттылықтың артуына әкеледі.

Титан микроқаттылығы шамамен 3000 HV болатын TiC карбидтерін түзеді. TiC бөлшектері кристалдану орталықтары ретінде әрекет етіп, эвтектикалық M₇C₃ карбидтерінің ұсақталуына ықпал етеді. [7] зерттеулерінде 0,6 масс. % Ti қосу ұсақ дисперсті карбидтік фазаның біркелкі түзілуі есебінен қаттылық пен тұтқырлықтың оңтайлы үйлесімін қамтамасыз ететіні көрсетілген. Алайда титан мөлшері артқан жағдайда ірі TiC карбидтері түзіліп, иілімділіктің төмендеуіне және сегрегация құбылыстарына алып келуі мүмкін [8].

Осылайша, әдеби деректер жоғары хромды шойындарды Nb, V және Ti сияқты элементтермен легірлеудің тиімділігін растайды [9]. Сонымен қатар, осы элементтердің дәл осындай комбинациясымен кешенді легірлеуге арнайы арналған зерттеулер іс жүзінде жоқ. Дегенмен, кешенді легірлеуді қолдану легірлеуші қоспалардың жалпы мөлшерін азайтып, жекелеген элементтермен легірлеумен салыстырғанда қасиеттердің анағұрлым жоғары деңгейіне қол жеткізуге мүмкіндік береді деп пайымдауға болады [10].

Осы жұмыстың мақсаты – базалық ЧХ16 маркалы шойын және құрамында шамамен 1,5 масс. % ниобий, 0,6 масс. % титан және 0,65 масс. % ванадий бар легірленген нұсқасының микроқұрылымы мен тозуға төзімділігін салыстырмалы түрде зерттеу болып

табылады.

Материалдар мен әдістер. Тәжірибелік қорытпа қосымша көміртектенуді болдырмау мақсатында алундтан жасалған тигельде зертханалық индукциялық пеште балқытылды. Негізгі материал ретінде ниобий, ванадий және титан қоспаларымен легірленген ЧХ16 маркалы шойын қолданылды. Қажетті химиялық құрамды қамтамасыз ету үшін қорытпаға бөлшек өлшемі ≤ 5 мм болатын феррониобий ФН660, феррованадий ФВд50 және ферротитан ФТи70 енгізілді. Шихта есебі легірлеуші элементтердің балқыту кезіндегі жанып кетуін ескере отырып жүргізілді, нәтижесінде қорытпадағы ниобий, ванадий және титанның мөлшері тиісінше шамамен 1,5% Nb, 0,65% V және 0,6% Ti деңгейінде қамтамасыз етілді. Балқыма дәстүрлі құм-саз қалыптарға құйылды. Қалыпты бұзғаннан және толық салқындағаннан кейін алынған үлгілер диаметрі 60 мм және биіктігі 100 мм болатын цилиндр пішінді болды.

Салқындағаннан кейін құйма дайындамалар стандартты үлгі дайындау операцияларынан өткізілді, оның ішінде тегістеу, жылтырату және химиялық өңдеу жүргізілді. Химиялық құрам оптикалық-эмиссиялық спектрометрия әдісімен (PolySpek-F) анықталды. Микроқұрылымды зерттеу үшін энергия-дисперсиялық талдау (EDS) жүйесімен жабдықталған JEOL JSM-IT200 сканерлеуші электрондық микроскопы пайдаланылды.

Тозуға төзімділік сынақтары құрғақ үйкеліс жағдайында «шар-диск» сызбасы бойынша жүргізілді. Қарсы дене ретінде диаметрі 6 мм болатын шыңдалған болат шар қолданылып, оған 2 Н нормаль күш түсірілді. Сынақтар сызықтық сырғанау жылдамдығы 0,1 м/с болғанда, ұзындығы 200 м шеңберлік траектория бойынша орындалды. Сынақ шарттары бөлме температурасына (20–25°C) және салыстырмалы ауа ылғалдылығы шамамен 75% деңгейіне сәйкес келді.

Сынақтар аяқталғаннан кейін тозған беттер Veeco 3D/2D профилометрінің көмегімен зерттелді. Беткі кедір-бұдырлық параметрлері (Ra, Rq, Rt), сондай-ақ тозу ізінің тереңдігі мен ені анықталды. Алынған профильдер негізінде тозу көлемінің сипаттамалары есептелді. Тозу көлемін анықтау Veeco 3D профилометрі арқылы алынған үш өлшемді беткі профильдер негізінде жүргізілді. Әрбір үлгі үшін биіктік картасы құрастырылып, аспаптың бағдарламалық қамтамасыз етуін қолдана отырып интегралды көлемдік тозу параметрі V есептелді. Тозу көлемі контакт аймағы шегінде бастапқы және тозған профильдер арасындағы айырма ретінде анықталды. Қосымша түрде меншікті тозу көрсеткіші есептелді.

$$I = \frac{V}{F \cdot S},$$

мұндағы V – тозу көлемі, мм³;

F – нормаль күш, Н;

S – үйкеліс жолы, м.

Нәтижелер мен талқылау. ЧХ16 шойынының микроқұрылымы болжаған сипатқа сәйкес келеді. Бастапқы ЧХ16 шойынының микроқұрылымында (1,а-сурет) пластинкалық морфологиясы бар ірі эвтектикалық М₇С₃ типті карбидтер анық көрінеді. Карбидтер аралық кеңістік аустениттік матрицамен толтырылған, карбидтердің іріленгендігі байқалады, бұл материалдың морттылығының артуына және карбидтер аралық жарылуға бейімділіктің жоғарылауына ықпал етуі мүмкін.

Легірленген ЧХ16 шойынының микроқұрылымында (1,б-сурет) аустениттік матрицада біркелкі таралған, салыстырмалы түрде изометриялық ашық түсті карбидтер тіркеледі. Мұндай ұсақ дисперсті бөлшектердің болуы базалық қорытпаға тән ұзын

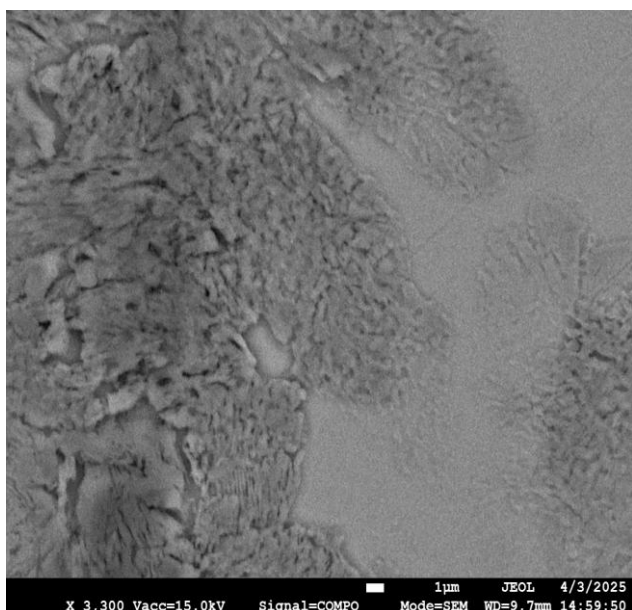
пластинкалық М₇С₃ карбидтерінің түзілуін тежеуге ықпал етуі тиіс.

2,а-суретте сол жағында (22 нүкте) ашық контрастты ірі блок тәрізді карбид тіркелген. ЭДС-анализі (оң жақта) ниобийдің (23,4% Nb) жоғары көміртек құрамымен (69,6% C) бар екенін анықтады, бұл Nb_{0,25}C фазасына сәйкес келеді. Хром (Cr), титан (Ti) және ванадий (V) элементтерінің аз мөлшері олардың карбид құрылымына ішінара қатысатынын көрсетеді. Айта кету керек, ниобий көміртекпен жоғары ұқсастыққа ие болып, кристалданудың бастапқы кезеңдерінде NbC карбидін түзуге бейім. Сол себепті, анықталған карбидтердің құрамында Nb басым болып, ал титан, ванадий және хром тек аз мөлшерде анықталады. Көп ықтималдықпен аталған фазалар әртүрлі құрамды (Nb,Ti,V)_{1-x}C типті легірленген карбидтер болып табылады.

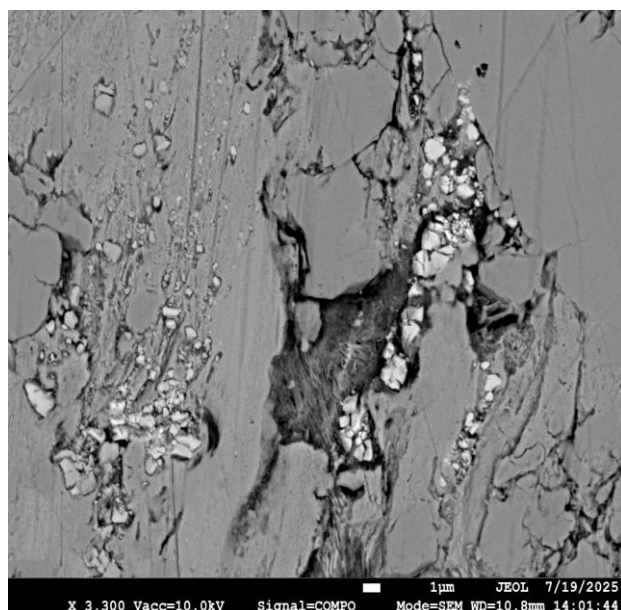
Профилометриялық талдау (3-сурет) базалық және легірленген ЧХ16 шойындарының тозу сипаты бойынша елеулі айырмашылықтарды көрсетті. Бастапқы қорытпа

Тәжірибелік қорытпа мен ЧХ16 шойынының химиялық құрамы

Атауы	Элементтердің өлшемі, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ti	V	Nb	P	S	Fe
ЧХ16 шойыны (MEMCT 7769-82)	1,6-2,4	1,5-2,2	0,96	13-19	-	-	-	0,1	0,05	ост
Тәжірибелік қорытпа	2,05	1,93	0,62	15,1	0,58	0,63	1,48	0,1	0,05	ост



а



б

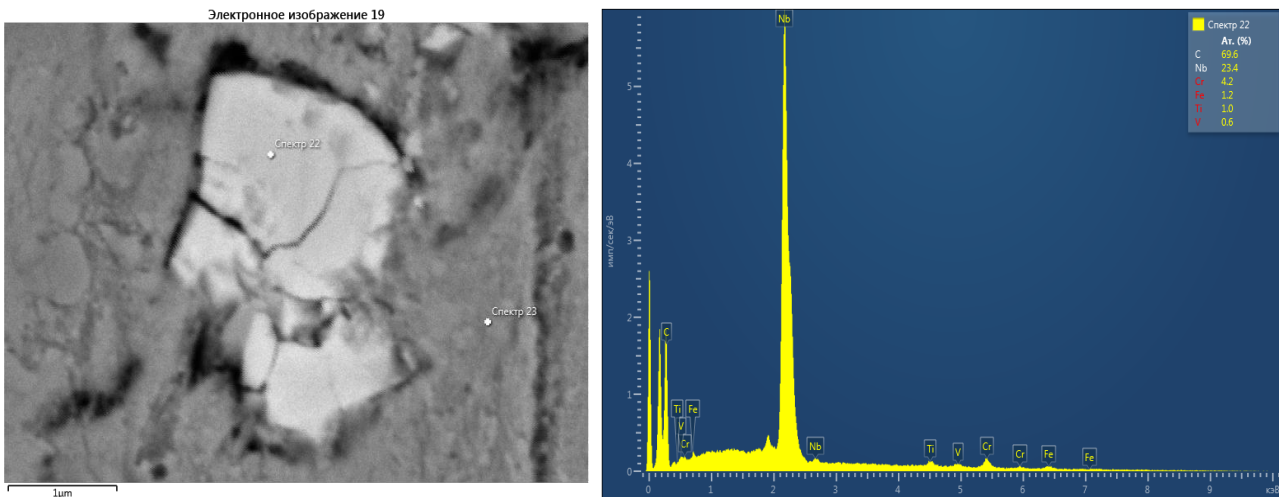
1-сурет – Жоғары хромды шойынның микроқұрылымы: а) базалық ЧХ16 шойыны; б) легірленген ЧХ16 шойыны

(3,а-сурет) бетінде терең тозу іздері байқалады, беткі кедір-бұдырлық параметрлері жоғары: $R_a \approx 202$ нм, $R_q \approx 340$ нм және $R_t \approx 7,8$ мкм. Беткей тереңдігі мен зақымданудың біркелкі еместігі абразивтік тозуға төмен тұрақтылықты көрсетеді. Легіріленген ЧХ16 шойынында (3,б-сурет) тозу ізінің тереңдігі айтарлықтай төмендеп, беткі кедір-бұдырлық параметрлері шамамен екі есе азайды: $R_a \approx 104$ нм, $R_q \approx 142$ нм және $R_t \approx 3,9$ мкм. Беткі рельеф біркелкіленген, бұл микроқазу және қабатталу процестерінің бәсеңдеуін көрсетеді. Алынған нәтижелер карбидтүзгіш элементтердің енгізілуі құрылымды ұсақтауға және қатты карбидтердің түзілуіне ықпал ететінін, соның арқасында беткі тозуды тежеуге мүмкіндік беретінін растайды.

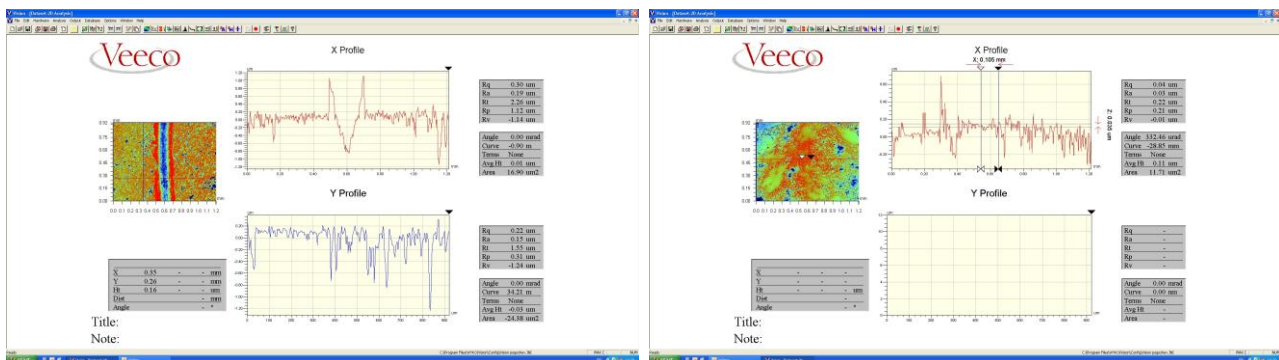
Профильдерді талдау нәтижесінде базалық шойын үшін тозу көлемі V шамамен $2,4 \cdot 10^{-3}$ мм³, ал легіріленген шойын үшін ша-

мамен $1,1 \cdot 10^{-3}$ мм³ екені анықталды, бұл тозу көлемінің шамамен 55% төмендеуіне сәйкес келеді. Алынған деректер жиынтығы кешенді легірілеудің арқасында тозуға төзімділіктің артқанын көрсетеді. Беткі тозуды талдауға қосымша ретінде үйкеліс коэффициентін анықтау сынақтары жүргізілді, бұл үйкеліс процесінің тұрақтылығын бағалау мақсатында жасалды. Нәтижелер көрсеткендей (4-сурет), базалық ЧХ16 шойыны жоғары үйкеліс коэффициентімен сипатталады (орташа $\sim 0,7$) және айқын тербелістерге ие, бұл үйкеліс процесінің тұрақсыз сипатын көрсетеді. Үйкеліс коэффициентінің өсуі ұзындыққа байланысты ірі эвтектикалық M_7C_3 карбидтерінің қабатталуы және абразивтік бөлшектердің түзілуімен байланысты, олар микроқазу процесін күшейтеді.

Керісінше, легіріленген шойын төмен және тұрақты үйкеліс коэффициентін ($\sim 0,12$) көрсетеді, бұл ұсақ дисперсті карбидтердің



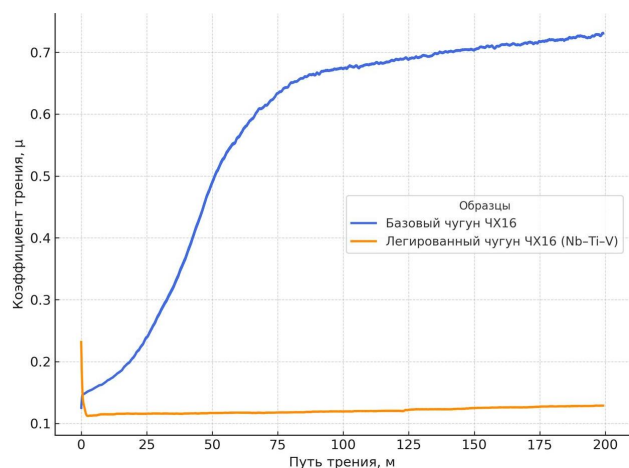
2-сурет – Легіріленген шойынның EDS-анализінің нәтижелері



а

б

3-сурет – Базалық ЧХ16 шойынының тозу іздері (а) және легіріленген ЧХ16 шойынының тозу іздері (б)



4-сурет – Базалық және легіріленген ЧХ16 шойындарының үйкеліс коэффициентінің үйкеліс жолына тәуелділігі

түзілуіне байланысты, олар беткі қабатты нығайтып, тозу зақымдарының дамуын тежейді. Осындай сипат тозу ізінің тереңдігінің азаюы мен беткі рельефтің тегістелуімен байланысты болады.

Қорытынды. Шамамен 1,5% Nb, 0,6% Ti және 0,65% V массалық мөлшерінде жүргі-

зілген кешенді легірлеу құрылымның өзгеруіне әкелді: карбидтердің изометриялық формасының артуы, біркелкі таралуы және $(Nb,Ti,V)_{1-x}C$ -типті жаңа карбид фазасының түзілуі байқалды, оның болуы беткі тозуға төзімділіктің артуына ықпал етеді.

Трибологиялық зерттеулер нәтижелері көрсеткендей, базалық шойында тозу ізінің тереңдігі $R_t \approx 7,8$ мкм деңгейінде болса, тәжірибелік үлгілерде бұл көрсеткіш шамамен екі есе төмендеп ($\approx 3,9$ мкм) отыр.

Үйкеліс сынақтары көрсеткендей, бастапқы қорытпаның үйкеліс коэффициенті 0,7 болса, легірленген үлгідегі мән 0,12-ге дейін төмендеді, бұл контакт қабатының тұрақтылығының артуымен және тозуға төзімділіктің қосымша жақсаруының нәтижесі болып табылады.

Осылайша, ниобий, титан және ванадий арқылы жүргізілген кешенді легірлеу ЧХ16 шойынының трибологиялық сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері Қазақстан Республикасы Ғылым Комитетінің гранты аясында AP26103843 «Берілген қасиеттері бар жаңа материалдарды алудың физика-химиялық негіздерін әзірлеу» тақырыбы бойынша жүргізілді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Aubakirov, D., Issagulov, A., Kvon, S., Kulikov V. Chsherbakova, Y., Arinova, S. Modifying Effect of a New Boron-Barium Ferroalloy on the Wear Resistance of Low-Chromium Cast Iron // *Metals*, 2022, 12 (7), 1153. DOI: 10.3390/met12071153
2. Issagulov, A.Z., Kulikov, V.Y., Chsherbakova, Y.P., Kovaleva, T.V., Kvon, S.V. The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles // *Metalurgija*, 2016, 55 (3), pp. 426-428.
3. Oliveira, C., et al. Effect of niobium on wear resistance of high chromium white cast irons. *Wear*, 2016, 348-349, pp. 109-117.
4. Bedolla-Jacuinde, A., et al. Microstructure and wear behavior of high-Cr white irons with Nb additions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8 (6), pp. 5287-5299.
5. Melo, H.G., et al. Optimization of Nb content in high chromium cast irons for wear resistance. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62, pp. 3159-3166.
6. Zhou, Y., et al. Influence of vanadium additions on the microstructure and properties of high chromium cast iron. *Materials Characterization*, 2017, 131, pp. 42-49.
7. Liu, J., et al. Effect of titanium on the microstructure and wear resistance of high chromium cast iron. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 718, pp. 190-198.
8. Kvon, S.S., Kulikov, V.Y., Issagulov, A.Z., Dostayeva, A.M., Kovalyova, T.V. Studying structure and properties of shaped ingots obtained in various conditions of crystallization // *Metalurgija*, 2018, 57 (4), pp. 313-316, 201751.
9. Dostayeva, A.M., Erahtina, I.I., N.R. Zholmagambetov, N.R., Medeubayev, N.A., Zholmagambetov, S.R. Investigation of aluminum-titanium alloys production and labor safety in metal smelting process, *Metalurgija*, 2021, 60 (3-4), pp. 403-406.
10. Kovalyova, T., Eremin, E., Arinova, S., Medvedeva, I., Dostayeva, A. Enhancing surface roughness of castings when sand-resin mold casting, *Metalurgija*, 2017, 56 (1-2), pp. 135-138.

Влияние комплексного легирования ниобием, титаном и ванадием на микроструктуру и трибологические свойства высокохромистого чугуна ЧХ16

¹*ТУЛЕПОВА Мәлдір Абілсеитқызы, докторант, moldir_a_nur@mail.ru

¹КВОН Светлана Сергеевна, к.т.н., профессор, svetlana.1311@mail.ru,

¹КУЛИКОВ Виталий Юрьевич, к.т.н., профессор, mlpikm@mail.ru,

²ОКИШЕВ Константин Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор, k.okishev@inbox.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния комплексного легирования ниобием, титаном и ванадием на микроструктуру и трибологические свойства высокохромистого чугуна ЧХ16. Для сравнительного анализа были изучены базовый сплав и экспериментальные образцы, содержащие около 1,5% Nb, 0,6% Ti и 0,6% V. Анализ микроструктуры показал, что в исходном ЧХ16 формируются крупные пластинчатые эвтектические карбиды M_7C_3 , определяющие повышенную хрупкость и склонность к межкарбидному растрескиванию. Введение Nb, Ti и V привело к формированию более изометричных карбидов M_7C_3 и выделению дисперсной фазы типа $(Nb,V,Ti)_{1-x}C$, которые действуют как центры кристаллизации и способствуют измельчению структуры. Результаты трибологических испытаний показали, что коэффициент трения у легированного чугуна снижается примерно на 83%, по сравнению с базовым чугуном с 0,7 до 0,12, и остается стабильным в процессе испытаний. Профилометрия поверхности выявила уменьшение глубины износа и параметров шероховатости почти на 50%, что свидетельствует о существенном повышении износостойкости легированного сплава. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности комплексного легирования Nb, Ti и V, которое позволяет существенно повысить износостойкость чугуна ЧХ16 и расширить область его применения для деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Ключевые слова: высокохромистый чугун, карбидообразующие элементы, микроструктура, износостойкость.

Influence of Complex Alloying with Niobium, Titanium and Vanadium on the Microstructure and Tribological Properties of High-chromium Cast Iron ChH16

¹*TULEPOVA Moldir, Doctoral Student, moldir_a_nur@mail.ru,

¹KVON Svetlana, Cand. of Tech. Sc., Professor, svetlana.1311@mail.ru,

¹KULIKOV Vitaliy, Cand. of Tech. Sc., Professor, mlpikm@mail.ru,

²OKISHEV Konstantin, Dr. of Phys.-Math. Sc., Professor, k.okishev@inbox.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», 56 N. Nazarbayev Avenue, Karaganda, Kazakhstan,

²Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira Street, 19, Yekaterinburg, Russia,

*corresponding author.

Abstract. The paper presents the results of a study on the influence of complex alloying with niobium, titanium and vanadium on the microstructure and tribological properties of high-chromium cast iron ChH16. For comparative analysis, a base alloy and experimental specimens containing about 1.5 wt. % Nb, 0.6 wt. % Ti and 0.6 wt. % V were examined. Microstructural analysis showed that in the initial ChH16 large plate-like eutectic M_7C_3 Carbides are formed, which determine the increased brittleness and tendency to intercarbide cracking. The addition of Nb, Ti and V leads to the formation of more equiaxed M_7C_3 carbides and the precipitation of a dispersed $(Nb,V,Ti)_{1-x}C$ -type phase, which acts as crystallization nuclei and promotes structure refinement. The results of tribological tests showed that the friction coefficient of the alloyed cast iron decreases by approximately 83% compared with the base cast iron, from 0.7 to 0.12, and remains stable during testing. Surface profilometry revealed a decrease in wear depth and roughness parameters by almost 50%, indicating a significant increase in the wear resistance

of the alloyed cast iron. The obtained results demonstrate the high effectiveness of complex alloying with Nb, Ti and V, which makes it possible to substantially improve the wear resistance of ChH16 cast iron and to expand its application for parts operating under abrasive wear conditions.

Keywords: *high-chromium cast iron, carbide-forming elements, microstructure, wear resistance.*

REFERENCES

1. Aubakirov, D., Issagulov, A., Kvon, S., Kulikov V. Chsherbakova, Y., Arinova, S. Modifying Effect of a New Boron-Barium Ferroalloy on the Wear Resistance of Low-Chromium Cast Iron // *Metals*, 2022, 12 (7), 1153. DOI: 10.3390/met12071153
2. Issagulov, A.Z., Kulikov, V.Y., Chsherbakova, Y.P., Kovaleva, T.V., Kvon, S.V. The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles // *Metalurgija*, 2016, 55 (3), pp. 426-428.
3. Oliveira, C., et al. Effect of niobium on wear resistance of high chromium white cast irons. *Wear*, 2016, 348-349, pp. 109-117.
4. Bedolla-Jacuinde, A., et al. Microstructure and wear behavior of high-Cr white irons with Nb additions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8 (6), pp. 5287-5299.
5. Melo, H.G., et al. Optimization of Nb content in high chromium cast irons for wear resistance. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62, pp. 3159-3166.
6. Zhou, Y., et al. Influence of vanadium additions on the microstructure and properties of high chromium cast iron. *Materials Characterization*, 2017, 131, pp. 42-49.
7. Liu, J., et al. Effect of titanium on the microstructure and wear resistance of high chromium cast iron. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 718, pp. 190-198.
8. Kvon, S.S., Kulikov, V.Y., Issagulov, A.Z., Dostayeva, A.M., Kovalyova, T.V. Studying structure and properties of shaped ingots obtained in various conditions of crystallization // *Metalurgija*, 2018, 57 (4), pp. 313-316, 201751.
9. Dostayeva, A.M., Erahtina, I.I., N.R. Zholmagambetov, N.R., Medeubayev, N.A., Zholmagambetov, S.R. Investigation of aluminum-titanium alloys production and labor safety in metal smelting process, *Metalurgija*, 2021, 60 (3-4), pp. 403-406.
10. Kovalyova, T., Eremin, E., Arinova, S., Medvedeva, I., Dostayeva, A. Enhancing surface roughness of castings when sand-resin mold casting, *Metalurgija*, 2017, 56 (1-2), pp. 135-138.