



Bor bilan mikrolegirlashning 110G13L yuqori marganesli yeyilishbardosh po'lat mikrostrukturasi va xossalari ta'sirini tadqiq qilish

Ulugov G'olibjon Davlatovich

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, PhD, dotsent

email: d_golibjon@mail.ru

ANNOTATSIYA

Yuqori marganesli 110G13L po'latning ekspluatatsion samaradorligi uning austenit tuzilmasi, donalar o'lchami va yuklanish jarayonida deformatsion puxtalanish qobiliyati bilan belgilanadi. Biroq quymadagi yirik austenit donalari hamda donalar chegaralarida karbid ajrilmalari past va o'rta zarbiy-abraziv yuklanishlarda yeyilishbardoshlikni cheklashi mumkin. Ushbu ishda 0; 0,002; 0,005 va 0,009 % miqdorda bor bilan mikrolegirlashning 110G13L po'lat mikrostrukturasi, Brinell qattiqligi va nisbiy yeyilishbardoshligiga ta'siri o'rganildi. Tajriba eritmalari 0,25 t sig'imli induksion pechda tayyorlandi, bor FB17 ferrobora orqali kiritildi, namunalarga 1080 °C da 1,5 soat austenitlash va suvda toblash ishlovi berildi. Metallografik kuzatuvlar va mexanik xossalarni tahlili bor miqdori 0,005 % bo'lganda eng qulay natija kuzatilganini ko'rsatdi: o'rtacha donalar o'lchami 178 mkm dan 66 mkm gacha kamaydi, qattiqlik 210 HB dan 226 HB gacha oshdi va nisbiy yeyilishbardoshlik 1,36 ga yetdi. 0,009 % B da qattiqlik 236 HB gacha oshgan bo'lsa-da, donalar o'lchami 71 mkm bo'lib, yeyilishbardoshlik 1,29 gacha pasaydi. Bu holat ortiqcha bor miqdorida donalar chegarasidagi ajrilmalar ko'payishi va struktura yaxlitligining yomonlashishi ehtimoli bilan izohlanadi. Natijalar 0,005 % B ni tajribada tekshirilgan eng maqbul konsentratsiya sifatida ko'rsatadi; sanoat uchun 0,003–0,006 % interval esa qo'shimcha fazaviy va zarbiy sinovlar bilan tasdiqlanishi lozim bo'lgan muhandislik diapazoni sifatida taklif etiladi.

Kalit so'zlar:

110G13L po'lat, Hadfield po'lati, bor, mikrolegirlash, austenit donasi, issiqlik ishlovi, qattiqlik, yeyilishbardoshlik, mikrostruktura.

Исследование влияния микролегирования бором на микроструктуру и свойства высокомарганцевистой износостойкой стали 110Г13Л

АННОТАЦИЯ

Эксплуатационная эффективность высокомарганцевистой стали 110Г13Л определяется её аустенитной структурой, размером зёрен и способностью к деформационному упрочнению в процессе нагружения. Однако крупные аустенитные зёрна в отливке и карбидные выделения по границам зёрен могут ограничивать износостойкость при низких и средних ударно-абразивных нагрузках. В настоящей работе исследовано влияние микролегирования бором в

Ключевые слова:

сталь 110Г13Л, сталь Гадфильда, бор, микролегирование, аустенитное зерно, термическая обработка,



количестве 0; 0,002; 0,005 и 0,009 % на микроструктуру, твёрдость по Бринеллю и относительную износостойкость стали 110Г13Л. Опытные плавки проводили в индукционной печи вместимостью 0,25 т, бор вводили с использованием ферробора ФБ17. Образцы подвергали аустенитизации при 1080 °С в течение 1,5 ч с последующей закалкой в воде. Металлографические исследования и анализ механических свойств показали, что наиболее благоприятные результаты достигнуты при содержании бора 0,005 %: средний размер зёрен уменьшился со 178 до 66 мкм, твёрдость повысилась с 210 до 226 НВ, а относительная износостойкость достигла 1,36. При содержании бора 0,009 % твёрдость повысилась до 236 НВ, однако размер зёрен составил 71 мкм, а относительная износостойкость снизилась до 1,29. Такое поведение предположительно связано с увеличением количества выделений по границам зёрен и ухудшением структурной целостности при избыточном содержании бора. Полученные результаты указывают на 0,005 % В как на наиболее благоприятную из экспериментально исследованных концентраций. Интервал 0,003–0,006 % предлагается в качестве ориентировочного диапазона для промышленного применения, требующего подтверждения дополнительным фазовым анализом и испытаниями на ударную вязкость.

твёрдость,
износостойкость,
микроструктура.

Investigation of the effects of boron microalloying on the microstructure and properties of high-manganese wear-resistant 110g13l steel

ABSTRACT

The service performance of high-manganese 110G13L steel is governed by its austenitic microstructure, grain size, and strain-hardening capacity under loading. However, coarse austenite grains in the casting and grain-boundary carbide precipitates may limit wear resistance under low and moderate impact–abrasive loading. This study investigated the effects of boron microalloying at concentrations of 0, 0.002, 0.005, and 0.009% on the microstructure, Brinell hardness, and relative wear resistance of 110G13L steel. Experimental heats were produced in an induction furnace with a capacity of 0.25 t, and boron was introduced using FB17 ferrobore. The specimens were austenitized at 1080 °C for 1.5 h and subsequently water-quenched. Metallographic observations and mechanical property analysis showed that the most favorable results were obtained at a boron content of 0.005%: the average grain size decreased from 178 to 66 µm, hardness increased from 210 to 226 HB, and relative wear resistance reached 1.36. At 0.009% B, although hardness increased to 236 HB, the grain size was 71 µm and relative wear resistance decreased to 1.29. This behavior may be attributed to increased grain-boundary precipitation and reduced microstructural integrity at excessive boron contents. The results identify 0.005% B as the most favorable concentration among those experimentally investigated. A range of 0.003–0.006% is proposed as a provisional engineering range for industrial application, requiring confirmation through additional phase analysis and impact testing.

Key words:

110G13L steel, Hadfield steel, boron, microalloying, austenite grain, heat treatment, hardness, wear resistance, microstructure.



KIRISH

Konchilik, maydalash-boyitish, metallurgiya va og'ir mashinasozlikda ishchi detallar bir vaqtning o'zida zarba, abraziv zarrachalar, siqilish va sirpanish ta'siriga uchraydi. Bunday sharoitlar uchun material tanlashda faqat dastlabki qattiqlik emas, balki yuklanish vaqtida sirt qatlamining qayta puxtalanishi, yorilishga qarshiligi va strukturaning barqarorligi ham muhim hisoblanadi. Yuqori marganesli austenit 110G13L po'lat, xalqaro adabiyotlarda Hadfield po'lati sifatida ma'lum bo'lib, aynan yuqori zarbiy yuklanish va abraziv yeyilish birgalikda mavjud bo'lgan detallar: maydalagich jag'lari va futerovkalari, ekskavator kovshi tishlari, tegirmon qoplamalari, temir yo'l elementlari hamda boshqa mas'ul qismlarda keng qo'llanadi. Ushbu po'latning afzalligi austenit matritsaning katta plastikligi va ekspluatatsiya davomida deformatsion puxtalanish qobiliyatidir [1,3,4].

110G13L po'latning an'anaviy kimyoviy tarkibida uglerod miqdori taxminan 1,0–1,5 %, marganes esa 11,5–15,0 % oraliqida bo'ladi. Marganes austenitni xona haroratida barqarorlashtiradi, uglerod esa mustahkamlik va deformatsion puxtalanish salohiyatini ta'minlaydi. Shunga qaramay, quyma holatda sovishning nisbatan sekin kechishi donalar chegaralari bo'ylab karbid fazalarining ajralishiga va yirik austenit donalarining shakllanishiga olib keladi. Shu sababli sanoat amaliyotida qotishma odatda yuqori haroratli eritib yuboruvchi issiqlik ishloviga uchratiladi: karbidlar austenitda eritiladi va keyin suvda tez sovitish orqali bir fazali yoki unga yaqin austenit tuzilma olinadi [1,2].

Biroq standart austenitlash ishlovi karbid to'rini bartaraf etsa-da, quyma donalarni har doim ham yetarli darajada maydalamaydi. Yirik donali austenitning bir qator salbiy oqibatlari mavjud: lokal deformatsiya notekis taqsimlanadi, donalar chegaralari bo'ylab darz boshlanishi ehtimoli ortadi, past yoki o'rta zarbiy yuklarda esa sirtning o'z-o'zidan puxtalanishi to'liq ishga tushmasligi mumkin. Venturelli va hammualliflar austenit donasini mayda qilish Hadfield po'latining mustahkamligi, deformatsion puxtalanish koeffitsiyenti va zarbiy energiyasini sezilarli yaxshilashi mumkinligini ko'rsatgan [1]. Dziubek va hammualliflar issiqlik ishlovi orqali donalarni mayda va karbidlarni boshqariladigan taqsimotga keltirish abraziv yeyilishbardoshlikni oshirishini aniqlagan [2].

Strukturani boshqarishning bir yo'li mikrolegirlashdir. Juda kichik miqdordagi faol elementlar kristallanish frontidagi yadrolanish jarayoniga, donalar chegarasi energiyasiga, segregatsiyaga va ikkilamchi fazalarning hosil bo'lishiga ta'sir ko'rsatadi. Bor shu nuqtai nazardan alohida qiziqish uyg'otadi. U po'latlarda juda kichik konsentratsiyalarda ham donalar chegaralariga moyil bo'lib, chegaralarning migratsiyasini sekinlashtirishi va mikrostrukturani noziklashtirishga yordam berishi mumkin. Shu bilan birga, bor miqdori ortib ketsa, qattiq va mo'rt borid yoki bor-karbid tabiatli ajrilmalar donalar chegarasida to'planib, aks ta'sir ko'rsatishi ehtimoli mavjud. Demak, bor uchun «qancha ko'p bo'lsa, shuncha yaxshi» tamoyili ishlaymaydi; maqbul miqdorni eksperimental aniqlash talab etiladi.

So'nggi yillarda yuqori marganesli po'latlarning yeyilish xossalarini yaxshilash uchun donalarni mayda qilish, sirtni nanokristallash, Cr va N, V kabi elementlar bilan legirlash, shuningdek, borlash kabi usullar tadqiq etilgan [3–8]. Bu ishlar strukturaviy noziklashtirish va qattiq fazalarning nazorat qilinishi yeyilishbardoshlikni oshirishini ko'rsatadi, ammo natija yuklanish turiga va hosil bo'lgan fazalarning morfologiyasiga kuchli bog'liq. Masalan, sirt nanokristallanishi ayrim abraziv sharoitlarda ijobiy natija bergan [5], borlash esa juda yuqori sirt qattiqligi va yeyilishga qarshilik hosil qilishi mumkin [7,8]. Biroq sirtga diffuzion bor kiritish bilan eritmaga mingdan bir ulushlarda bor kiritib butun quyma strukturasini mikrolegirlash mexanizmlari bir xil emas. Shuning uchun 110G13L quyma po'latida juda kichik bor miqdorining donalar o'lchami va integral yeyilish xossalariga ta'sirini alohida baholash ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

Mazkur tadqiqotning maqsadi 0–0,009 % diapazonda bor bilan mikrolegirlashning 110G13L yuqori marganesli po'lat mikrostrukturasi, qattiqligi va yeyilishbardoshligiga ta'sirini tajribaviy baholash hamda tajribada tekshirilgan konsentratsiyalar ichidan eng maqbul variantni aniqlashdan iborat. Tadqiqotning ilmiy vazifalari: bazaviy va bor qo'shilgan eritmalarini bir xil metallurgik



sharoitda olish; standart austenitlashdan keyingi donalar o'ldhamini solishtirish; qattqlik va nisbiy yeyilishbardoshlikni baholash; bor miqdori–struktura–xossa o'rtasidagi bog'lanishni tahlil qilish; ortiqcha borning ehtimoliy salbiy ta'sir chegarasini asoslash. Ishning amaliy yo'nalishi esa mavjud eritish va issiqlik ishlovi texnologiyasini tubdan o'zgartirmagan holda xizmat xususiyatlarini yaxshilash imkoniyatini aniqlashdir.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAHLILI

Hadfield po'latining yuqori yeyilishbardoshligi uning boshlang'ich qattqliigidan ko'ra deformatsiya vaqtida rivojlanadigan mikrostrukturaviy jarayonlarga ko'proq bog'liq. Chen va hammualliflar N va Cr bilan legirlangan Mn12CrN hamda an'anaviy Mn12 po'latlarni solishtirib, yeyilish yukining darajasi sirt puxtalanishining tezligi va yakuniy yeyilish qarshiligini keskin o'zgartirishini ko'rsatdi [3]. Yuqori yuklarda egizaklanish va dislokatsion mexanizmlar kuchli faollashib, sirt qattqligi tez ortadi; past yuklarda esa bu mexanizm to'liq shakllanmasligi mumkin. Bu xulosa 110G13L kabi materiallarda boshlang'ich strukturani mayda va bir xil qilishning ahamiyatini oshiradi, chunki deformatsion puxtalanish boshlanishiga qadar materialning o'z qattqligi va donalararo yaxlitligi hal qiluvchi bo'lib turadi.

Machado va hammualliflar real jag'li maydalagichda ishlagan Hadfield po'latining ishchi sirtini mikrosketch usulida tekshirib, sirt qatlamidagi qattqlik 300 HV dan 700 HV gacha ortishi mumkinligini va yeyilish mexanizmi kristallografik yo'nalishga ham bog'liqligini ko'rsatgan [4]. Ularning natijalari austenit donasining faqat o'ldhami emas, balki yo'nalishi va deformatsiya ichki tuzilmasi ham yeyilish jarayonida rol o'ynashini anglatadi. Donalar o'ldhamini kamaytirish esa katta donalar ichida deformatsiyaning lokal to'planishini cheklab, ko'proq donalar va chegaralar orqali yukni taqsimlash imkonini beradi. Bu mexanizm bor kabi mikrolegirlovchi elementlar yordamida kristallanish va yuqori haroratda donalar o'sishini boshqarish g'oyasiga mos keladi.

Venturelli, Albertin va Azevedo quyma Hadfield po'latida austenit donasini gafniy bilan inokulyatsiya orqali taxminan 3000 mkm dan 600 mkm gacha kamaytirgan va natijada uzilishdagi mustahkamlik 37 %, qovushqoqlik 88 %, deformatsion puxtalanish koeffitsiyenti 50 % hamda Charpy energiyasi qariyb 13–15 % ortganini qayd etgan [1]. Ushbu tadqiqot donalarni mayda qilish Hadfield po'latining faqat statik mustahkamligiga emas, balki plastik deformatsiya mexanizmlarining nisbatiga ham ta'sir qilishini ko'rsatadi. Mualliflar mayda donali materialda mexanik egizaklar zichligi yuqoriroq bo'lganini aniqlagan. Demak, donalarni mayda qilishni 110G13L po'latning texnologik modifikatsiyasida asosiy maqsadlardan biri sifatida ko'rish mumkin.

Dziubek va hammualliflar X120Mn12 po'latida ikki bosqichli issiqlik ishlovidan foydalanib, avval izotermik tutib turish orqali karbidlarni boshqarilgan holatda hosil qilgan, keyin qayta austenitlash orqali ancha mayda austenit donalari va globulyar karbidlar taqsimotini olgan [2]. Natijada abraziv yeyilishbardoshlik dastlabki holatga nisbatan 16,4 % ortgan. Ushbu natija 110G13L po'lat uchun muhim ikki tamoyilni ko'rsatadi: birinchidan, faqat bir fazali austenit olishning o'zi maksimal yeyilishbardoshlikni kafolatlamaydi; ikkinchidan, donalar va qattiq fazalarning morfologiyasi nazorat qilingan holda heterogen tuzilma ham foydali bo'lishi mumkin. Shunday ekan, bor qo'shilganda paydo bo'ladigan dispers ajrilmalarni to'liq «zararli» deb baholash to'g'ri emas; ularning o'ldhami, uzluksizligi va joylashuvi muhim.

Sirtni nanokristallash bo'yicha tadqiqotlar ham donalar o'ldhamining yeyilishga ta'sirini tasdiqlaydi. Feng va hammualliflar yuqori tezlikdagi mexanik zarbalash orqali Hadfield po'latida gradient nanokristall qatlam hosil qilib, sirt donalarini taxminan 25 nm gacha maydalagan va 25–500 °C oralig'ida ishqalanish hamda yeyilish ko'rsatkichlari yaxshilanganini bildirgan [5]. Yan va boshqa mualliflarning ishlari ham mexanik sirt ishlovi natijasida donalarning nanometr o'ldhamga tushishi, qattqlikning keskin ortishi va ma'lum abraziv sharoitlarda yeyilishga qarshilikning oshishini ko'rsatadi. Bu tadqiqotlarda ishlatilgan usullar sirtga yo'naltirilgan bo'lsa-da, asosiy mikrostrukturaviy g'oya – donalar chegaralari sonini ko'paytirish va plastik oqimni ko'p mayda hajmlarga bo'lish – hajmiy mikrolegirlash uchun ham dolzarb.



Hadfield po'latining legirlash orqali modifikatsiyasi bo'yicha Moghaddam, Varahram va Davami yuqori vanadiyli austenit marganesli po'latlarni standart Hadfield po'lati bilan taqqoslab, V qo'shilishi karbid fazalari va matritsa tuzilmasini o'zgartirishi, natijada qattqlik, zarbiy xossa va yeyilish ko'rsatkichlari o'zgarishini ko'rsatgan [6]. Legirlovchi elementning ijobiy ta'siri uning miqdori bilan chiziqli emasligi ayniqsa muhim: qattiq faza miqdori ko'paygan sari qattqlik ortishi mumkin, lekin mo'rtlashish xavfi ham oshadi. Bor bilan mikrolegirlashda ham xuddi shu muvozanat – donalarni mayda qilish va donalar chegarasini mo'rtlashtirmaslik – asosiy optimallashtirish vazifasidir.

Borning yuqori marganesli po'lat bilan o'zaro ta'siri haqida to'g'ridan-to'g'ri ishlar ko'p emas. Hayat va Sezgin sovuq prokatlangan yuqori marganesli po'latni paketli borlash orqali 850–950 °C da ishlov berib, FeB, Fe₂B, MnB va SiC fazalarini qayd etgan, borid qatlam qattqligi esa 1120–1915 HV0.05 oralig'ida bo'lgan [7]. Ularning ishida borlash yeyilishbardoshlikni sezilarli oshirgan. Biroq bu diffuzion sirt jarayoni bo'lib, bor miqdori mikrolegirlashdagi mingdan bir foiz darajasidan tubdan farq qiladi. Shunga qaramay, tadqiqot bor va Mn ishtirokidagi qattiq fazalar yuqori marganesli matritsada shakllanishi mumkinligini tasdiqlaydi va ortiqcha bor sharoitida donalararo qattiq ajrilmalar ehtimolini tushuntirishga yordam beradi.

Günen va hammualliflarning 2025-yildagi tadqiqotida X120Mn12 po'lat sirtini vibratsion puxtalash va keyingi borlash kombinatsiyasi o'rganilgan [8]. Oldindan mexanik ishlov dislokatsiyalar va donalar chegaralari zichligini oshirgan, natijada bor diffuziyasi tezlashgan va borid qatlamning qattqligi ortgan. Mualliflar yuqori harorat hamda bor diffuziyasining ortishi bilan termik kuchlanish va darz xavfi o'rtasidagi muvozanatga e'tibor bergan. Bu xulosa hajmiy mikrolegirlash uchun ham metodologik jihatdan muhim: borning foydali ta'siri faqat uning mavjudligi bilan emas, balki uni qabul qiluvchi mikrostrukturaning holati va bor atomlarining qayerda jamlanishi bilan belgilanadi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, yuqori marganesli austenit po'latlarda yeyilishbardoshlikni oshirishning universal yo'li mavjud emas. Yuqori yuklarda deformatsion puxtalanish asosiy rol o'ynasa [3,4], past va o'rta yuklarda boshlang'ich qattqlik, donalar o'lchami va ikkilamchi fazalar morfologiyasi ko'proq ahamiyat kasb etadi [1,2,5]. Bor bilan bog'liq ishlar esa borid fazalari juda qattiq bo'lishi mumkinligini, ammo ularning morfologiyasi va yaxlitligi servis xossalarini belgilashini ko'rsatadi [7,8]. Shuning uchun mazkur ishning o'ziga xosligi borni sirtga diffuzion kiritish emas, balki 110G13L eritmasiga 0–0,009 % oralig'ida mikrolegirlovchi sifatida kiritish va bir xil issiqlik ishlovidan keyin donalar o'lchami–qattqlik–yeyilishbardoshlik uchligini kompleks tahlil qilishdan iborat.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqot obyekti sifatida kimyoviy tarkibi 110G13L yuqori marganesli yeyilishbardosh quyma po'lat diapazoniga mos bazaviy qotishma qabul qilindi. 1 – jadvalga ko'ra bazaviy tarkibda uglerod 1,0–1,5 %, marganes 11,5–15,0 %, kremniy 0,3–1,0 % miqdorda bo'lishi ko'zda tutilgan; xrom va nikel miqdorlari tegishli ravishda 1,5 % va 1,0 % dan oshmasligi, oltingugurt va fosfor esa zararli qo'shimchalar sifatida past darajada saqlanishi talab etiladi. Tajribada asosiy e'tibor bor miqdoriga qaratilgani sababli qolgan elementlar barcha eritmalarda imkon qadar bir xil darajada ushlab turildi.

Tajriba eritmaları nominal sig'imi 0,25 t bo'lgan IST-0,25/0,32 markali induksion pechda olindi. Shixta to'liq erigandan keyin metall kremniy, marganes va alyuminiy yordamida oksidsizlantirildi. Borni kiritish uchun FB17 ferrobora qo'llanildi. Ferrobora alyuminiy qobiq ichida suyuq metallga kiritilib, qo'shimcha miqdori yakuniy qotishmada 0,002; 0,005 va 0,009 % bor hosil bo'lishini ta'minlaydigan qilib tanlandi. Bor qo'shilmagan 0 % B eritma nazorat varianti sifatida qabul qilindi. Metallni qum-gilli qoliplarga quyish 1420–1450 °C oralig'ida amalga oshirildi. Shu tarzda to'rtta tajriba varianti bir xil eritish va quyish tamoyili asosida tayyorlandi (1 -).

Tajriba eritmalarining amaldagi kimyoviy tarkibi 2-jadvalda keltirilgan. Bazaviy eritmada C=1,25 %, Mn=12,8 %, Si=0,55 %, S=0,03 %, P=0,08 % bo'lgan. 0,002 % B li variantda C=1,22 %, Mn=12,6 %, Si=0,58 %; 0,005 % B li variantda C=1,24 %, Mn=12,9 %, Si=0,52 %; 0,009 % B



li variantda C=1,23 %, Mn=12,7 %, Si=0,56 % bo'lgan. Bu qiymatlar bazaviy elementlar bo'yicha farqlar kichik ekanini, ya'ni kuzatilgan strukturaviy o'zgarishlarni birinchi navbatda bor miqdorining o'zgarishi bilan bog'lash mumkinligini ko'rsatadi.

Har bir eritmadan olingan quymalar ikki guruhga ajratildi. Birinchi guruh quyma holatdagi strukturani kuzatish uchun saqlandi, ikkinchi guruh standart eritib yuboruvchi issiqlik ishloviga uchratildi. Austenitlash 1080 °C haroratda 1,5 soat ushlab turish orqali bajarildi. Keyin namunalar harorati 40 °C dan yuqori bo'lmagan suvda tez sovitildi. Mazkur rejimning vazifasi quyma holatda donalar chegarasida hosil bo'ladigan karbid tarmoqlarini austenitda eritish va xona haroratida asosan austenitli matritsani saqlab qolishdan iborat.

Metallografik tahlil uchun namunalardan shliflar tayyorlandi. Sirtlar silliqalanib va jilolangandan keyin etil spirtidagi 4 % li azot kislotasi eritmasi bilan kimyoviy ishlov berildi. Mikrostruktura Olympus/Evident GX53 optik metallografik mikroskopda kuzatildi. Austenit donalarining o'rtacha o'lchami kesuvchi chiziqlar usuli bo'yicha baholandi. Mazkur ishda hisobot qiymati sifatida har bir variant uchun o'rtacha donalar o'lchami qabul qilindi. Manba tajriba protokolidagi takroriy o'lchovlar soni va standart og'ishlar keltirilmaganligi sababli natijalar tavsifiy taqqoslash shaklida berildi va statistik ahamiyat bo'yicha sun'iy xulosalar kiritilmadi.

Qattqlik Brinell usulida KASON-59-HBRV universal qattqlik o'lchagich yordamida aniqlandi. Yeyilishbardoshlik mahkamlangan abraziv ta'sirida namunaning massa yo'qotishiga asoslangan nisbiy ko'rsatkich bilan baholandi. Bazaviy, borsiz eritmaning yeyilishbardoshligi 1,00 deb qabul qilindi. Agar bazaviy namunaning massa yo'qotishi Δm_0 , i-variantniki esa Δm_i bo'lsa, nisbiy yeyilishbardoshlikni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta m_0}{\Delta m_i} \quad (1)$$

$\varepsilon_i > 1$ bo'lishi i-variant bazaviy po'latga nisbatan kamroq massa yo'qotganini, demak, uning abraziv yeyilishga qarshiligi yuqoriroq ekanini bildiradi. Bor ta'sirini sonli taqqoslash uchun qattqlikning nisbiy o'zgarishi, donalar maydalanish darajasi va yeyilishbardoshlikning ortishi ham hisoblandi:

$$\Delta H_i = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$R_{d,i} = \frac{d_{01} - d_i}{d_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_i = (\varepsilon_i - 1) \cdot 100\% \quad (4)$$

Bu yerda H_0 va d_0 – borsiz bazaviy namunadagi qattqlik hamda o'rtacha donalar o'lchami; H_i , d_i va ε_i – mos ravishda bor qo'shilgan variantlarning ko'rsatkichlari. Formulalar (2)–(4) tajriba ma'lumotlarini qayta hisoblash uchun ishlatildi va yangi o'lchov sifatida emas, balki mavjud natijalarni o'zaro solishtirish vositasi sifatida qo'llandi. Tajriba ishlarining texnologik ketma ketligi 1 – rasmda keltirilgan.

1-jadval.

110G13L bazaviy po'latining tavsiya etilgan kimyoviy tarkibi, massa %

Marka	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
110G13L	1,0–1,5	11,5–15,0	0,3–1,0	≤1,5	≤1,0	≤0,05	≤0,12

2-jadval.

Tajriba eritmalarining kimyoviy tarkibi, massa %

Eritma	C	Mn	Si	S	P	B
1 (bazaviy)	1,25	12,8	0,55	0,03	0,08	0
2	1,22	12,6	0,58	0,03	0,08	0,002
3	1,24	12,9	0,52	0,03	0,09	0,005
4	1,23	12,7	0,56	0,03	0,08	0,009

Shixta va eritish	Oksidsizlantirish	FB17 bilan B kiritish	1420– 1450 °C da quyish	1080 °C, 1,5 soat	Suvda toblash	Metallografiya, HB, yeyilish
-------------------------	-------------------	-----------------------------	----------------------------------	----------------------------	------------------	---------------------------------

1-rasm. Tajriba ishlarining texnologik ketma-ketligi

TAHLIL VA NATIJALAR

Mikrostrukturaviy o'zgarishlar

Borsiz bazaviy 110G13L po'latining quyma holatida yirik austenit dendritlari va donalar chegaralarida karbid tabiatli ajrilmalar kuzatiladi. 1080 °C da austenitlash va suvda toblashdan so'ng tarmoqli karbidlarning asosiy qismi eritilib, ancha bir xil austenitli tuzilma hosil bo'ladi. Shu holatda o'rtacha austenit donasi 178 mkm deb baholangan. Bu qiymat standart issiqlik ishlovi karbid to'rini bartaraf etishga yetarli bo'lsa ham, donalarni chuqur mayda qilish uchun alohida modifikatsiya zarurligini ko'rsatadi.

0,002 % B qo'shilganda issiqlik ishlovidan keyingi o'rtacha donalar o'lchami 118 mkm gacha kamayadi. Formulaga (3) muvofiq, bazaviy variantga nisbatan donalar maydalanish darajasi taxminan 33,7 % ni tashkil etadi. Metallografik tasvirda donalar bir xilroq va nisbatan mayda ko'rinadi. Bu borning juda kichik miqdori ham kristallanish yoki keyingi yuqori haroratli ishlov jarayonida donalar chegarasi migratsiyasiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkinligini anglatadi. Biroq ushbu bosqichda donalar hali 0,005 % B li variantdagidek maksimal maydalanmagan.

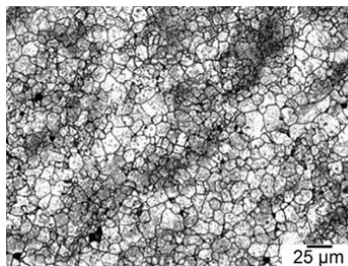
0,005 % B li namuna eng mayda tuzilmani namoyon etdi: o'rtacha donalar o'lchami 66 mkm. Bazaviy 178 mkm qiymatga nisbatan kamayish 62,9 % ni tashkil etadi. Mikrostruktura ko'proq teng o'qli donalardan iborat bo'lib, ayrim chegaralarda mayda ikkilamchi ajrilmalar ko'rinadi. Ularning kimyoviy va fazaviy tabiatini faqat optik mikroskopiya bilan qat'iy aniqlash mumkin emas; shuning uchun ularni borid yoki bor-karbid deb to'liq identifikatsiya qilish uchun SEM-EDS va XRD tekshiruvlari talab etiladi. Shunga qaramay, morfologik jihatdan ajrilmalarning uzluksiz tarmoq hosil qilmagani muhim ijobiy belgi hisoblanadi.

0,009 % B li variantda o'rtacha donalar o'lchami 71 mkm bo'ldi. Bu qiymat bazaviy namunadan 60,1 % kichik, ammo 0,005 % B li variantdan qariyb 7,6 % kattaroq. Demak, bor miqdorini 0,005 % dan 0,009 % gacha oshirish donalarni yanada maydalashga olib kelmagan. Aksincha, donalarni maydalash ta'sirining to'yinganligi kuzatiladi. Manba metallografik tavsifida yuqori B miqdorida donalar chegaralari bo'ylab uzluksizroq ajrilmalar ko'paygani qayd etilgan. Bu holat borning eruvchanlik va segregatsiya chegaralari bilan bog'liq bo'lishi mumkin, biroq faza tarkibini aniqlash bo'yicha qo'shimcha tahlil talab qilinadi. 2 va 3 – rasmlarda tajriba natijalari keltirilgan.

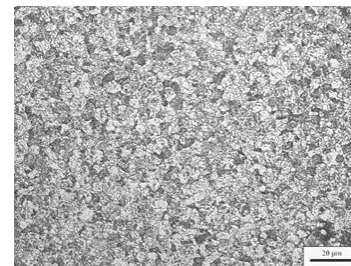
Donalar o'lchamining B miqdoriga bog'liqligi chiziqli emas. 0 dan 0,002 % gacha bor qo'shilishi sezilarli maydalanishni boshlaydi, 0,005 % da minimumga yetadi, 0,009 % da esa yana biroz ortadi. Bu egri chiziqli borning ikki xil raqobatdosh ta'sirini ko'rsatadi: past konsentratsiyada donalar chegarasini pinning va migratsiyani cheklash ustun bo'lsa, yuqoriroq konsentratsiyada bor bilan boy ajrilmalarning yiriklashishi yoki chegaralarda to'planishi yangi donalar paydo bo'lishidan ko'ra ustun kelishi mumkin.



a) 0 % B

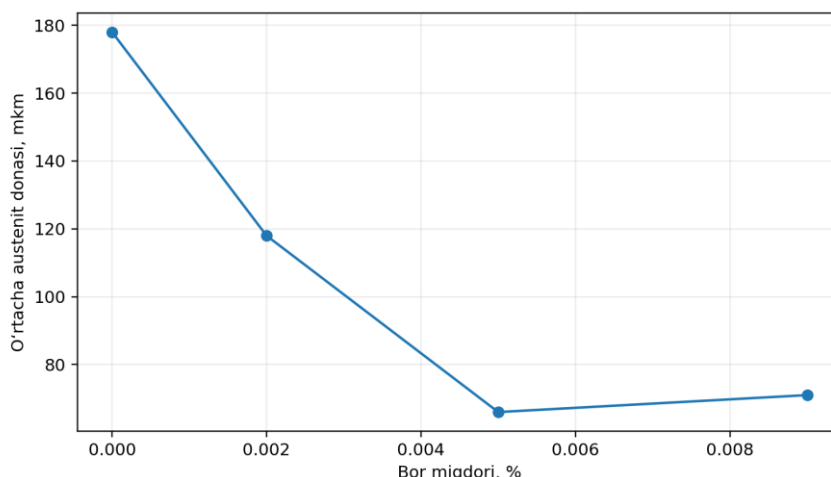


b) 0,002 % B



c) 0,005 % B

2-rasm. Austenitlashdan keyingi mikrostrukturalar: a) 0 % B; b) 0,002 % B; c) 0,005 % B (foydalanuvchi taqdim etgan manba tasvirlari)



3-rasm. Bor miqdorining o'rtacha austenit donasi o'lchamiga ta'siri
Qattqlik va nisbiy yeyilishbardoshlik

Qattqlik qiymatlari bor miqdori ortishi bilan monoton ravishda ko'paygan. Borsiz namunaning qattqligi 210 HB bo'lsa, 0,002 % B da 216 HB, 0,005 % B da 226 HB va 0,009 % B da 236 HB olingan. Formulaga (2) ko'ra, qattqlikning bazaviy holatga nisbatan ortishi mos ravishda 2,9; 7,6 va 12,4 % ni tashkil etadi. Qattqlikdagi uzluksiz o'sish donalar maydalanishi, borning qattiq eritmadagi yoki donalar chegarasidagi ta'siri hamda mayda qattiq ajralmalar mavjudligi bilan izohlanishi mumkin.

Biroq qattqlik bilan yeyilishbardoshlik bir xil qonuniyatda o'zgarmagan. Nisbiy yeyilishbardoshlik bazaviy variant uchun 1,00 deb olindi. 0,002 % B li variantda u 1,16 ga, 0,005 % B da 1,36 ga ko'tarilgan, 0,009 % B da esa 1,29 gacha pasaygan. Demak, tekshirilgan konsentratsiyalar ichida eng yuqori yeyilishbardoshlik 0,005 % B da qayd etilgan. Bu variant borsiz po'latga nisbatan 36 % yuqori nisbiy yeyilishbardoshlikni ko'rsatadi. 0,009 % B li namuna ham bazaviy materialdan 29 % yuqori natijaga ega, biroq qattqligi eng yuqori bo'lishiga qaramay, 0,005 % B li namunadan past natija bergan.

Mazkur farq yeyilish jarayonining faqat bulk qattqlik bilan boshqarilmasligini ko'rsatadi. Abraziv zarracha sirtga botganda mikroqirqish, mikrohaydash, lokal plastik oqim, donalar chegarasida mikroo'pirilish va qattiq ikkilamchi fazalarning uzilishi kabi mexanizmlar birgalikda ishlaydi. Agar qattqlik oshishi donalararo bog'lanishning zaiflashishi bilan birga kechsa, materialning ayrim mikrohajmlari abraziv ta'sirida yulib olinishi osonlashishi mumkin. Shuning uchun optimal yeyilishbardoshlik qattqlik, plastik matritsa uzluksizligi va donalar o'lchami o'rtasidagi muvozanatda hosil bo'ladi.

0,005 % B li variant aynan shu muvozanatni eng yaxshi namoyon etadi: donalar eng kichik, qattqlik bazaviy holatdan yuqori va nisbiy yeyilishbardoshlik maksimal. 0,009 % B da qattqlik yana 10 HB ga ortadi, ammo donalar maydalanishi yaxshilanmaydi va yeyilish ko'rsatkichi 1,36 dan 1,29 gacha tushadi. Bu natija yuqori bor miqdorida qo'shimcha qattqlik foydasi struktura yaxlitligidagi yo'qotishlarni to'liq qoplay olmasligi mumkinligini ko'rsatadi.

Tajriba natijalarini, ya'ni 3, 4 jadvalda va 4 - 5 rasmdagi berilgan ma'lumotlarni adabiyotlar bilan solishtirishda ehtiyotkorlik talab etiladi, chunki turli ishlar turli yeyilish sxemalari, qattqlik shkalalari va issiqlik ishlovlaridan foydalangan. Shunga qaramay, umumiy tendensiya mos: Venturelli va hammualliflar donalar maydalanishi mexanik xossalarni yaxshilashini [1], Dziubek va hammualliflar esa mayda donali va boshqarilgan karbidli tuzilma abraziv yeyilishbardoshlikni 16,4 % oshirganini ko'rsatgan [2]. Bizning ma'lumotlarda 0,005 % B da donalar 62,9 % maydalangan va nisbiy yeyilishbardoshlik 36 % oshgan. Bu o'sish miqdorlarini to'g'ridan-to'g'ri bir-biriga tenglashtirish mumkin emas, biroq donalarni noziklashtirishning umumiy foydali yo'nalishi tasdiqlanadi.

3-jadval.

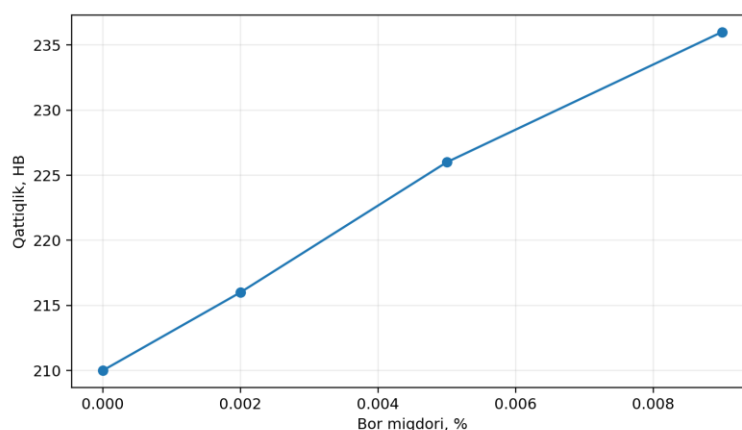
Bor miqdoriga bog'liq holda issiqlik ishlovidan keyingi 110G13L po'lat xossalari

B miqdori, %	Qattqlik, HB	Dona o'lchami, mkm	Nisbiy yeyilishbardoshlik
0	210	178	1,00
0,002	216	118	1,16
0,005	226	66	1,36
0,009	236	71	1,29

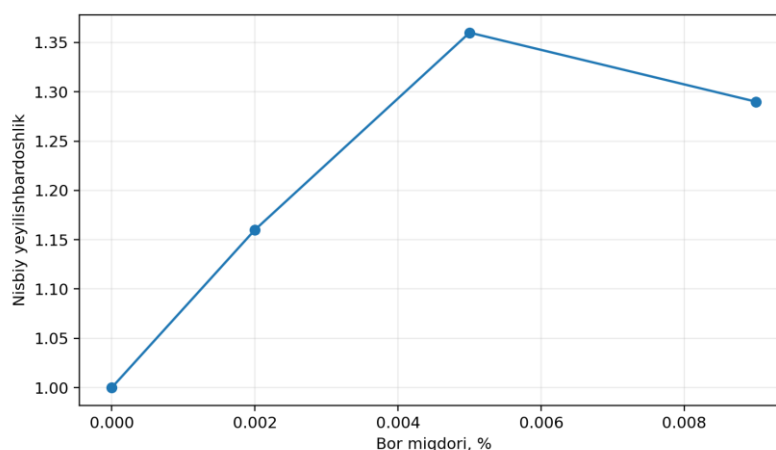
4-jadval.

Bazaviy holatga nisbatan hisoblangan o'zgarishlar

B, %	Qattqlik o'sishi, %	Dona maydalanishi, %	Yeyilishbardoshlik o'sishi, %
0	0	0	0
0,002	2,9	33,7	16
0,005	7,6	62,9	36
0,009	12,4	60,1	29



4-rasm. Bor miqdorining Brinell qattqligiga ta'siri



5-rasm. Bor miqdorining nisbiy yeyilishbardoshlikka ta'siri

NATIJALAR MUHOKAMASI

Olingan natijalar 110G13L po'latda borning ta'siri ikki bosqichli xarakterga ega ekanini ko'rsatadi. Birinchi bosqichda, ya'ni 0,002–0,005 % oralig'ida, donalar o'lchami keskin kamayadi va qattqlik hamda yeyilishbardoshlik birgalikda oshadi. Ikkinchi bosqichda – 0,009 % B da – qattqlikning ortishi davom etsa-da, donalar maydalanishi to'xtaydi va yeyilishbardoshlik maksimal qiymatdan pasayadi. Bunday xulq mikrolegirlovchi elementning donalar chegarasi bilan o'zaro



ta'siriga xos bo'lib, past konsentratsiyadagi chegarani barqarorlashtirish effekti va yuqori konsentratsiyadagi segregatsiya/ajralma hosil bo'lish effekti o'rtasidagi raqobat bilan izohlanishi mumkin.

Donalar maydalanishining mexanik xossalarga ta'sirini klassik Hall–Petch yondashuvi bilan sifat jihatdan tushuntirish mumkin: donalar chegaralari dislokatsiyalar harakatiga qo'shimcha to'siq bo'lib xizmat qiladi. Biroq Hadfield po'latida bu oddiy mexanizm bilan cheklanmaydi. Austenitning stacking-fault energiyasi, egizaklanish va dislokatsion puxtalanish jarayonlari o'zaro bog'langan. Venturelli va hammualliflar donalar maydalanishi egizaklar zichligini oshirishi va shu orqali puxtalanish, plastiklik va qovushqoqlikning birgalikda yaxshilanishiga olib kelishini ko'rsatgan [1]. Shuning uchun 0,005 % B li variantdagi 66 mkm donalar nafaqat boshlang'ich qattqlikni, balki keyingi ekspluatatsion puxtalanishning bir xilroq rivojlanishini ham rag'batlantirishi mumkin.

0,009 % B da qattqlikning maksimal qiymatga yetishi, lekin yeyilishbardoshlikning 0,005 % B ga nisbatan kamayishi alohida ahamiyatga ega. Bu natija qattqlikni yagona optimallashtirish mezoni sifatida qabul qilish mumkin emasligini ko'rsatadi. Moghaddam va hammualliflar yuqori vanadiyli austenit marganesli po'latlarda ham qattiq faza hosil bo'lishi qattqlik va yeyilish ko'rsatkichlariga turlicha ta'sir qilishi mumkinligini ko'rsatgan [6]. Qattiq fazalar mayda va uzlukli bo'lsa, ular abraziv kesishga qarshi samarali to'siq bo'ladi; agar ular donalar chegarasida uzluksiz tarmoq hosil qilsa, darzning tez tarqalishi uchun qulay yo'l paydo bo'lishi mumkin.

Bor bilan bog'liq sirt tadqiqotlari ham faza morfologiyasining ahamiyatini tasdiqlaydi. Hayat va Sezgin yuqori marganesli po'latni borlashda FeB, Fe₂B va MnB fazalarini aniqlagan va yuqori qattqlik hamda yaxshi yeyilishbardoshlikka erishgan [7]. Günen va hammualliflar esa oldindan mexanik ishlov bor diffuziyasini kuchaytirishini ko'rsatib, borning taqsimlanishi mikrostruktura nuqsonlari va donalar chegaralariga bog'liq ekanini isbotlagan [8]. Bizning ishda bor miqdori atigi 0,009 % gacha bo'lsa ham, donalar chegarasiga moyillik yuqori bo'lishi mumkin. Shu sababli 0,009 % B li variantdagi pasayish donalararo ajrilmalarning ko'payishi bilan mantiqan bog'lanadi, ammo bu mexanizمنى to'liq tasdiqlash uchun EDS/XRD/TEM kabi usullar kerak.

Sanoat nuqtai nazaridan 0,005 % B li variantning afzalligi shundaki, u mavjud texnologik zanjirni tubdan o'zgartirishni talab qilmaydi. Bor FB17 ferrobor orqali eritmaga qo'shiladi, quymani olish va 1080 °C da austenitlash rejimi esa bazaviy texnologiyada saqlanadi. Bunday yondashuv ishlab chiqarishda yangi murakkab sirt uskunalarini joriy qilishdan ko'ra soddaroq bo'lishi mumkin. Shu bilan birga, borning juda kichik miqdori sababli dozlash aniqligi, ferroborning o'zlashtirish darajasi va kimyoviy tahlil usulining aniqligi muhim bo'ladi. Amaliy reglamentda faqat qo'shilgan ferrobor massasi emas, balki qotishmadagi haqiqiy qoldiq B miqdori nazorat qilinishi kerak.

Tajriba natijalariga ko'ra 0,005 % B – tekshirilgan nuqtalar ichidagi aniq optimum. Manba matnida taklif etilgan 0,003–0,006 % oralig'i muhandislik jihatdan mantiqiy bo'lsa-da, 0,003; 0,004 va 0,006 % konsentratsiyalar bevosita sinovdan o'tkazilmagan. Shu sababli mazkur maqolada bu oraliq «yakuniy isbotlangan optimum» emas, balki keyingi tajribalar uchun toraytirilgan tavsiya etiladigan interval sifatida talqin qilinadi. Keyingi bosqichda 0,003–0,006 % oralig'ini 0,001 % qadam bilan tekshirish, kamida uch takrorli yeyilish sinovlari va ishonch oralig'ini hisoblash maqsadga muvofiq.

Tadqiqotning yana bir cheklovi zarbiy qovushqoqlik qiymatlarining o'lchanmaganligidir. Hadfield po'latining amaliy ishlash sharoiti ko'pincha zarba va abraziv yeyilishni birlashtiradi, shuning uchun faqat qattqlik va mahkamlangan abrazivdagi massa yo'qotish natijalari yetarli bo'lmaydi. 0,009 % B li namunada ehtimoliy donalararo mo'rtlashish mavjud bo'lsa, bu ayniqsa Charpy yoki instrumentlangan zarba sinovlarida ko'rinadi. Shuning uchun sanoat tavsiyasini mustahkamlash uchun zarbiy qovushqoqlik, uch jisimli abraziv yeyilish va zarba-abraziv sinovlarini kiritish zarur.

Bundan tashqari, fazaviy identifikatsiya ham chuqurlashtirilishi lozim. Optik metallografiya donalar o'lchami va ajrilmalarning morfologiyasini baholash uchun yetarli, ammo ularning kimyoviy tabiatini aniqlamaydi. 0,005 va 0,009 % B variantlari uchun SEM-EDS xaritalash donalar chegarasida B ni bevosita aniqlashda cheklangan bo'lishi mumkin, chunki yengil element sifatida



bor EDS bilan qiyin aniqlanadi; WDS yoki EPMA yaxshiroq natija berishi mumkin. XRD esa yetarli hajmda mavjud borid fazalarni aniqlashga yordam beradi. Zarur bo'lsa, TEM va elektron difraksiya orqali nanometr o'lchamdagi ajrilmalarni tasdiqlash mumkin.

Umuman, natijalar adabiyotlarda kuzatilgan uch asosiy qonuniyat bilan mos keladi. Birinchidan, austenit donasining maydalanishi Hadfield po'latining mexanik va tribologik xossalarni yaxshilashi mumkin [1,2]. Ikkinchidan, yeyilishbardoshlik faqat qattiqlik bilan emas, mikrostruktura va deformatsion puxtalanish mexanizmlari bilan belgilanadi [3–5]. Uchinchidan, bor bilan bog'liq qattiq fazalar yuqori yeyilish qarshiligini ta'minlashi mumkin, biroq ularning uzluksiz yoki mo'rt morfologiyasi salbiy oqibat keltirishi ehtimoli mavjud [7,8]. Shu asosda 0,005 % B li 110G13L po'lat strukturaviy va ekspluatatsion muvozanat nuqtasi sifatida ajralib turadi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

O'tkazilgan tajribalar 110G13L yuqori marganesli po'latni juda kichik miqdorda bor bilan mikrolegirlash uning austenit donalari o'lchami, qattiqligi va abraziv yeyilishga qarshiligiga sezilarli ta'sir qilishini ko'rsatdi. Borsiz va bor miqdori 0,002; 0,005; 0,009 % bo'lgan to'rtta variant bir xil eritish, quyish va 1080 °C da 1,5 soat austenitlashdan keyin taqqoslandi.

Birinchi asosiy natija – donalar maydalanishining kuchli, ammo chiziqli bo'lmagan xarakteridir. O'rtacha austenit donasi borsiz po'latda 178 mkm, 0,002 % B da 118 mkm, 0,005 % B da 66 mkm va 0,009 % B da 71 mkm bo'ldi. Eng yuqori donalar maydalanish darajasi 0,005 % B da – 62,9 % – kuzatildi. 0,009 % B ga o'tishda qo'shimcha maydalanish sodir bo'lmadi, bu bor ta'sirining to'yinganligini ko'rsatadi.

Ikkinchi natija – qattiqlik bor miqdori bilan monoton oshdi: 210 HB dan 216, 226 va 236 HB gacha. Shunga qaramay, maksimal qattiqlik maksimal yeyilishbardoshlik bilan mos kelmadi. Nisbiy yeyilishbardoshlik 0,005 % B da 1,36 ga yetib, eng yaxshi natijani berdi; 0,009 % B da esa 1,29 gacha pasaydi. Bu holat 110G13L po'latni optimallashtirishda qattiqlikdan tashqari donalar o'lchami va donalararo strukturaviy yaxlitlikni ham hisobga olish zarurligini tasdiqlaydi.

Tekshirilgan konsentratsiyalar ichida 0,005 % B texnologik jihatdan eng maqbul variant sifatida tavsiya etiladi. 0,003–0,006 % oralig'i keyingi aniqlashtiruvchi tajribalar uchun istiqbolli muhandislik diapazoni deb qaralishi mumkin, ammo ushbu oraliqdagi barcha nuqtalar hali bevosita sinovdan o'tkazilmagan. Shuning uchun sanoat reglamentini yakuniy tasdiqlashdan oldin oraliq konsentratsiyalarda takroriy sinovlar o'tkazilishi zarur.

Keyingi tadqiqotlarda uchta yo'nalish ustuvor: birinchidan, 0,003–0,006 % B oralig'ini 0,001 % qadam bilan aniqlashtirish va statistik takroriylikni ta'minlash; ikkinchidan, Charpy zarbiy qovushqoqligi, zarba-abraziv hamda uch jismli yeyilish sinovlarini o'tkazish; uchinchidan, 0,005 va 0,009 % B variantlarida donalar chegarasidagi ajrilmalarning fazaviy tabiatini XRD, SEM/WDS yoki EPMA va zarur hollarda TEM orqali aniqlash. Shu tadqiqotlar bajarilganda bor bilan mikrolegirlashning sanoat samaradorligi va xavfsiz konsentratsiya oynasi yanada ishonchli asoslanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Venturelli B. N., Albertin E., Azevedo C. R. de F. The effect of the austenite grain refinement on the tensile and impact properties of cast Hadfield steel. *Materials Research*. 2018. Vol. 21, No. 5. e20180069. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0069.
2. Dziubek M., Rutkowska-Gorczyca M., Dudziński W., Grygier D. Investigation into Changes of Microstructure and Abrasive Wear Resistance Occurring in High Manganese Steel X120Mn12 during Isothermal Annealing and Re-Austenitisation Process. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 7. 2622. DOI: 10.3390/ma15072622.
3. Chen C., Lv B., Ma H., Sun D., Zhang F. Wear behavior and the corresponding work hardening characteristics of Hadfield steel. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 389–399. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.044.
4. Machado P. C., Pereira J. I., Penagos J. J., Yonamine T., Sinatora A. The effect of in-service work hardening and crystallographic orientation on the micro-scratch wear of Hadfield steel. *Wear*. 2017. Vol. 376–377. P. 1064–1073. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.057.



5. Feng X. Y., Zhang F. C., Yang Z. N., Zhang M. Wear behaviour of nanocrystallised Hadfield steel. *Wear*. 2013. Vol. 305, No. 1–2. P. 299–304. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.038.
6. Moghaddam E. G., Varahram N., Davami P. On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 532. P. 260–266. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.089.
7. Hayat F., Sezgin C. T. Wear Behavior of Borided Cold-Rolled High Manganese Steel. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No. 10. 1207. DOI: 10.3390/coatings11101207.
8. Günen A., Lindner T., Karakaş M. S., Unal O., Keddām M., Malachowska A., Lampke T. Effect of vibratory peening pretreatment on boriding kinetics of Hadfield steel by Taylor expansion model. *Surface and Coatings Technology*. 2025. Vol. 514. 132550. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2025.132550.