

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.T.02.04 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ZOKIROV RUSLAN SAMADOVICH

**35XML MARKALI PO‘LATNI ELEKTR YOY PECHIDA
SUYUQLANTIRISHDA QOTISHMANING YEYILISHBARDOSHLIGINI
OSHIRISHNING ILMIY ASOSLARINI YARATISH**

**05.02.01 – Mashinasozlikda materialshunoslik. Quymachilik. Metallarga termik va bosim
ostida ishlov berish. Qora, rangli va noyob metallar metallurgiyasi.**

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Fan doktori (DSc) dissertatsiya avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора наук (DSc)

Content of the dissertation abstract of doctor of science (DSc)

Zokirov Ruslan Samadovich

35XML markali po‘latni elektr yoy pechida suyuqlantirishda qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishning ilmiy asoslarini yaratish.....3

Зокиров Руслан Самадович

Разработка научных основ повышения износостойкости сплава при плавке стали марки 35XML в электродуговой печи.34

Zokirov Ruslan Samadovich

Development of the scientific foundations for improving the wear resistance of the alloy during the melting of 35XML steel in an electric arc furnace.....63

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ

List of published works73

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.T.02.04 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ZOKIROV RUSLAN SAMADOVICH

**35XML MARKALI PO‘LATNI ELEKTR YOY PECHIDA
SUYUQLANTIRISHDA QOTISHMANING YEYILISHBARDOSHLIGINI
OSHIRISHNING ILMIY ASOSLARINI YARATISH**

**05.02.01 – Mashinasozlikda materialshunoslik. Quymachilik. Metallarga termik va bosim
ostida ishlov berish. Qora, rangli va noyob metallar metallurgiyasi.**

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.4.DSc/T665 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uchta tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)). Ilmiy kengashning veb – sahifasida (www.tdtu.uz) va «ZiyoNET» axborot ta’lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Turaxodjaye Nodir Djaxongirovich
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Ziyamuxamedova Umida Alijonovna.
texnika fanlari doktori, professor

Xudayarov Sulaymon Rashidovich
texnika fanlari doktori, dotsent

Parmonov Sarvar Toshpulatovich
texnika fanlari doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Andijon davlat texnika instituti

Dissertatsiya himoyasi Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/2025.27.12.T.02.04 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil “ 13” may soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2-uy. Tel./faks: (99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz.)

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2-uy. Tel.: (99871) 227-10-32.)

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil “30” aprel kuni tarqatildi.
(2025 yil “ 29 ” apreldagi №218 raqamli reestr bayonnomasi).

K.A. Karimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

Sh.B. Tashbulatov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi,
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

N.S.Dunyashin
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy
seminar raisi, texnika fanlari doktori, professor

KIRISH (Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda 35XML markali po'latlardan mashinasozlik detallarini ishlab chiqarishda ularning yeyilishbardoshligini oshirish va mexanik xossalarni yaxshilashni ta'minlash alohida ahamiyat kasb etmoqda. Shu bilan birga 35XML markali po'latlardan mashinasozlik detallarini ishlab chiqarishda qotishmani elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida resurs tejamkorligini ta'minlash, mahsulotga termik ishlov berishda qo'llaniladigan rejimlarning energiya tejamkor va samarali usullarini qo'llash muhim vazifalardan biri hisoblanadi. Bu borada rivojlangan mamlakatlar, jumladan AQSh, Angliya, Germaniya, Gollandiya, Irlandiya, Fransiya, Korea, Yaponiya, Xitoy, Rossiya, Ukraina va boshqa mamlakatlarning ilmiy-tadqiqot markazlarida ushbu marka analoglari hisoblangan po'latlardan mashinasozlik detallarini ishlab chiqarishda ularning mexanik xossalarni ta'minlaydigan texnologiyalarni takomillashtirishga, mahsulotning mexanik xossalarni oshirish va qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda 35XML markali po'latlardan quyma usulda mashinasozlik detallarini olishda ularning yuqori mexanik xossalari va yeyilishbardoshligini oshirishni ta'minlaydigan quyish texnologiyasini ishlab chiqish bo'yicha keng ko'lamda ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan, 35XML markali po'latlar tarkibiga yangi elementlarni kiritish asosida tarkibni takomillashtirish, olingan detallarining mexanik xossalari va yeyilishbardoshligini talab darajasida ta'minlaydigan termik ishlov berish rejimlarini ishlab chiqish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Shu bilan birga, mashinasozlik detallarini ishlab chiqishda keng qo'llaniladigan 35XML markali po'latlardan olingan detallarining xizmat muddatini oshirish uchun samarali va tejamkor texnologiyani ishlab chiqish zarur masala hisoblanadi.

Respublikamizda 35XML markali po'latlardan mahsulotlar ishlab chiqishda ularning yeyilishbardoshligini oshirishda resurs va energiya tejamkorligini ta'minlashga qaratilgan qator chora tadbirlar amalga oshirilmoqda. ¹2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni energiyatejamkorligini ta'minlash» bo'yicha vazifalari belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, 35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirishda qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishda energiya tejamkorligini ta'minlash, shuningdek, ishlab chiqarish korxonalarida birlamchi va ikkilamchi shixta materiallaridan foydalanib sifatli quyma mahsulotlar olish texnologiyalarini ishlab chiqish hamda suyuq metalga pechdan tashqari ishlov berish orqali metallning mexanik va quymakorlik xossalarni yaxshilash muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 6-iyuldagi "2022-2026-yillarda O'zbekiston Respublikasining innovatsion rivojlanish strategiyasini tasdiq

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60 sonli Farmon

lash to'g'risida"gi PQ-307-sonli Qarori, shuningdek, 2022-yil 24-yanvardagi PQ-99-sonli "Respublikada ishlab chiqarishni rivojlantirish va sanoat kooperatsiyasini kengaytirishning samarali tizimini yaratish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori, 2021-yil 24-iyundagi PQ-5159-sonli "Kon-metallurgiya sanoati va unga bog'liq sohalarni rivojlantirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori xamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy xujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. "Energetika, energiya va resurstejamkorlik" ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi¹.

35XML markali po'latni eritish va termik ishlov berish texnologiyasini ishlab chiqish jarayonida qotishmaning quymakorlik xossalarini oshirishga qaratilgan keng qamrovli ilmiy izlanishlar amalga oshirilmoqda. Bu izlanishlar dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalarining hamkorligi bilan olib borilmoqda. 35XML markali po'latni eritish va termik ishlov berish texnologiyasini ishlab chiqishda qotishmani quymakorlik xossalarini oshirish texnologiyalarini ishlab chiqishga yo'naltirilgan keng qamrovli ilmiy izlanishlar dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalari, jumladan: School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing (Xitoy), Structural Metals Center, National Institute for Materials Science Nippon Steel and Sumikin Metal Products, Department of Architecture, Nishinippon Institute of Technology (Yaponiya), Paris-Saclay Universiteti (Frantsiya), Rogante Engineering Office (Italiya), Pohang Science and Technology Universiteti (Janubiy Koreya), Advanced Nano Technology (Irlandiya), Paton Electric Welding Institute (Ukraina), Delft Texnologiya Universiteti, (Gollandiya) Rogante Engineering Office (Italiya), Universite Paris-Sud, Universite Paris-Saclay (Frantsiya), Advanced Nano Technology (Irlandiya) Pohang University of Science and Technology (Koreya), G.V.Kurdyumov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine va NanoMedTech LLC (Ukraina), Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (Ukraina), Massachusetts Texnologiya Instituti (MIT) – innovatsion materiallar va po'lat texnologiyalari sohasida yetakchi tadqiqotlar olib boruvchi muassasa. Kembrij Universiteti – metallurgiya va materialshunoslik bo'yicha xalqaro miqyosda mashhur ilmiy markaz, zamonaviy quvurlar va qotishmalarni o'rganish ustida tadqiqotlar olib boradi. Utrecht Universiteti (Gollandiya) – materiallar va ularning xossalari bo'yicha ilmiy izlanishlar olib boradigan muassasa. Tokio Universiteti (Yaponiya) – metallurgiya va energiya samaradorligi bo'yicha ilg'or tadqiqotlar olib boradi.

² Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy – tadqiqotlar sharhi: <https://www.researchgate.net/publication>; <http://www.ijirset.com/upload>; www.sciencedirect.com; https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations; <https://iopscience.iop.org/article>; www.mdpi.com/journal/materials; <https://www.researchgate.net/figure/The-fracture-surface-of-a-plane-strain-tensile-specimen-of-an-ultra-high-strength-steel>; <http://www.tohoku.ac.jp>; <https://ttu.edu.kz>; <https://www.uq.edu.au> va boshqa manbalar asosida ishlab chiqilgan.

RWTH Aachen Universiteti (Germaniya) – metallurgiya va qayta ishlash texnologiyalari sohasida ilg‘or tadqiqotlar amalga oshiradi. Stevenson Universiteti (AQSh) – materiallar va qotishmalarni qayta ishlash texnologiyalarini rivojlantirishda hamkorlik qiladi. Bu kabi tadqiqotlar global muammolarni hal qilish, yangi mahsulotlar va texnologiyalarni ishlab chiqish, shuningdek, iqtisodiy rivojlanishni va jamiyatning umumiy farovonligini oshirishga qaratilgan. Har bir tadqiqot muassasasi o'z maqsadlariga erishish uchun o'ziga xos uslublar va metodlarni ishlatadi. Ushbu ilmiy markazlar va oliy ta'lim muassasalari bilan birgalikda olib boriladigan tadqiqotlar 35XML markali po‘latning quymakorlik xossalarini yaxshilash va undan foydalanish samaradorligini oshirish maqsadida innovatsion yondashuvlar va texnologiyalarni ishlab chiqishga xizmat qiladi. Bu jarayon natijasida qoliplangan po‘latning sifatini oshirish, energiya samaradorligini ta’minlash va resurslardan tejamkor foydalanish imkonini beradi.

Dunyoda po‘latlarga termik ishlov berishning yuqori mustahkamlikka ega kam legirlangan po‘latlar mikrostrukturasi va xususiyatlariga ta’siri o‘rganilgan. Normallashtirish ishlov berishiga qaraganda, termo-mexanik nazorat jarayoni qo‘llanilishi yuqori mustahkamlik xususiyatlarini ta’minlaydi, lekin keyingi yuqori haroratli ishlov berishda kamroq barqarorlikni ko‘rsatadi. Yuqori haroratli ishlov berish davrida struktura barqarorligi bir qancha omillar, jumladan, qizdirish harorati va ushlab vaqti, donadorlikning o‘sishi, to‘plangan deformatsiya, deformatsiya teksturasi mavjudligi, po‘latni oksidlanishdan tozalash va cho‘kindi zarralarning erishi nazoratdan tashqari o‘sishi bilan boshqarilishi, yuqori mustahkamlikka ega kam legirlangan po‘latlarining yuqori haroratli ishlov berishga chidamliligi, normallashtirilgan po‘lat yuqori haroratli ishlov berishga ko‘proq bardoshli bo‘lib, issiqlik ta’sirida mexanik xususiyatlarini saqlab qolishi, yuqori darajadagi mustahkamlikka ega bo‘lsa-da, ularni 650 °C dan yuqori haroratda ishlatish tavsiya etilmasligini Paris-Saclay Universiteti (Fransiya), Rogante Engineering Office (Italiya), Pohang Science and Technology Universiteti (Janubiy Koreya), Advanced Nano Technology (Irlandiya), Paton Electric Welding Institute (Ukraina), Delft Texnologiya Universiteti, (Gollandiya) Rogante Engineering Office (Italiya), Universite Paris-Sud, Universite Paris-Saclay (Fransiya), Advanced Nano Technology (Irlandiya) Pohang University of Science and Technology (Koreya), G. V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine va NanoMedTech LLC (Ukraina), Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (Ukraina) olimlari hamkorlikda ilmiy tadqiqotlar olib bordilar.

Mikrostrukturali modifikatsiyalashning 34CrMo4 markali po‘latlarning zarbiy abraziv yeyilishga bardoshligiga ta’siri, 34CrMo4 markali po‘latning mikrostrukturaviy o‘zgartirishlar orqali uning zarbiy yeyilishga bardoshligini oshirish mumkin ekanligi, bunda termik ishlov berish, fazaviy o‘zgarishlar, karbidlarning taqsimlanishini boshqarish va yuzaki ishlov berish kabi usullar yordamida materialning charchoq, darz ketish va yeyilishga qarshi qarshiligi oshirilishi, bu asosan, yuqori mexanik talablar ostida ishlaydigan xrom molibden tarkibli po‘latlarning ishlash muddatini uzaytirishini va ishonchliligini yaxshilashi mumkin ekanligi ustida Diffraction Group Institut Laue-Langevin, Grenobl

(Fransiya), Metallurgiya va Materialshunoslik Kafedrası, Yaqin Sharq Texnika Universiteti (Ankara, Turkiya), va Frakto Materiallar Texnologiyasi Tadqiqot va Rivojlanish Kompaniyasi (Ankara, Turkiya) olimlari hamkorlikda ilmiy tadqiqotlar olib bordilar.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Bugungi kunda ishlab chiqarish sanoatida 35XML markali po'latlarni suyuqlantirib olish jarayonida qotishmaning quymakorlik xususiyatlarini oshirish texnologiyalarini yaratishda va qotishmaga pechda hamda pechdan tashqari ishlov berishda salmoqli hissalarini qo'shgan taniqli olimlar e'tirof etiladi. Massimo Rogante (Italiya), Thierry Baudin (Fransiya), Hyoung Seop Kim (Janubiy Koreya), Mark Heaton (Irlandiya), Anatoliy Zavdoveev (Ukraina), Valeriy Poznyakov (Ukraina) kabi olimlar ilmiy tadqiqot ishlarida yuqori mustahkamlikka ega po'latlarga termik bilan ishlov berishning mikrostrukturasi va xususiyatlariga ta'siri o'rganilgan.

Xitoy olimlar Shuai Zhu, Xianfeng Zhen, Guangshun Wang, Chunyu Ma, Changfa Cao kabi olimlar SCM435 markali po'lat (35XML markali po'latning Janubiy Korea davlatidagi analogi) boshlang'ich mikrostrukturasi va toblash jarayonining mikrostruktura va quymakorlik xossalariga ta'sirini, sementit zarrachalarining hajmi va miqdorini boshqarish orqali po'latda sezilarli mustahkamlash effekti hosil qilish mumkin ekanligi matematik modellashtirish va sanoat ishlab chiqarish jarayonlari o'rtasidagi farqlarni tahlil qilish orqali turli korxonalar va uskunalar uchun toblash jarayonini shakllantirishga oid ko'rsatmalar ishlab chiqilgan.

MDH davlatlaridan bo'lgan olimlar, jumladan G.V. Kurdyumov (Ukraina): Po'latlarning fazaviy o'zgarishlari va issiqlik bilan ishlov berish jarayonlarini o'rganishda katta hissa qo'shgan. Xrom-molibden tarkibli qotishmalarning yuqori haroratda ishlash qobiliyatini yaxshilash usullarini ishlab chiqqan. I.M. Butorov (Rossiya): Xrom-molibden po'latlarining zarbiy bardoshlilik va uzoq muddatli ishlash xususiyatlarini o'rganish bo'yicha tadqiqotlar olib borgan. Po'latlarning mikrostrukturaviy o'zgarishlarini chuqur o'rganib, yuqori haroratli sanoat sharoitlariga moslashuvchanligini oshirish usullarini taklif qilgan. V.N. Gridnev (Belarus): Yuqori haroratli xrom-molibden qotishmalarning termik barqarorligini o'rganib, ushbu materiallarning uzoq muddat ishlashga chidamliligini oshirish bo'yicha ishlagan. M.L. Skryabin (Rossiya): Xrom-molibden po'latlarning suyuqlantirish va qotishma tarkibini optimallashtirish bo'yicha tadqiqot olib borgan. Modifikatorlardan foydalanish orqali po'lat sifatini oshirishga doir ishlari bilan tanilgan. A.V. Vtorov va I.V. Dorofeyev (Qozog'iston): Energetika va neft-gaz sanoatida qo'llaniladigan xrom-molibden po'latlarning kimyoviy tarkibini va ishlov berish texnologiyalarini optimallashtirish ustida ishlaganlar.

Shuningdek, O'zbekistonda po'lat qotishmalarini suyuqlantirishda resurstejamkorlikni ta'minlaydigan, yuqori quymakorlik xossalariga ega mashinasozlikning og'ir sharoitlarida yuqori yuklanishda ishlaydigan po'latlar ishlab chiqarish texnologiyalar bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borgan va o'z ilmiy jamoasini yaratgan olimlar orasida N.D. Turaxodjeyev, O.A. Muxamedov, N.M. Saidmaxamatov, U. Raxmonov, Z. Bobodo'stov, R. Xudayberganov kabi

mutaxassislar alohida o'rin tutadi. Ular po'lat qotishmalarini suyuqlantirish va termik ishlov berish rejimlari, modifikatsiyalash texnologiyalarining o'ziga xos usullarni ishlab chiqishda muhim hissalar qo'shgan.

Hozirgi kunga qadar quymakorlik ishlab chiqarish korxonalarida sifatli quyma mahsulotlari olish va po'lat qotishmasini suyuqlantirish jarayonida uning tarkibidagi elementlarning kuyishi va quyma mahsulotlarga salbiy ta'sirini kamaytirish, yeyilishbardoshligi, karroziyabardoshligini oshirish muammosi hali to'liq hal etilmagan. Suyuq metall tarkibidagi zararli elementlarni ajratib olish texnologiyasini takomillashtirish zarurati mavjud.

Ilmiy tadqiqot mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy – tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti qoshidagi O'zbekiston – Yaponiya yoshlar innovatsiya markazi ilmiy – tadqiqot ishlari rejalariga muvofiq “NKMK” AJ bilan tuzilgan 2023 yil 06 iyundagi №05/2023 – МИМ “35XML markali po'latni eritish va termik ishlov berish texnologiyasini ishlab chiqish” va 2023 yil 06 iyundagi №06/2023 – МИМ “Rudalarni maydalash uskunalari uchun NMZ ishlab chiqarish zavodi sharoitida xrom-molibden tarkibli po'latdan quyma mahsulotlar ishlab chiqarish” mavzularidagi xo'jalik shartnoma asosida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi Respublikamiz ishlab chiqarish korxonalarida ko'p foydalaniladigan 35XML markali po'latni, elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayoni parametrlarini optimallashtirish va uning kimyoviy tarkibini modifikatsiyalash orqali qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishning ilmiy asoslarini yaratishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritish texnologiyasini ishlab chiqish.

35XML markali po'latni bor elementining optimal miqdordagi modifikator bilan modifikatsiyalangan tarkibini ishlab chiqish.

35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni kamaytirish.

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida termodinamik qonuniyatga asoslanib suyuqlantirish texnologiyasini ishlab chiqish

Quymaning shakli va murakkablik darajasiga bog'liq holda suyuq metallni quyib olishda foydalaniladigan qum – gilli qolipning issiqlik o'tkazuvchanligi, siqilishdagi mustahkamligidan kelib chiqib tanlash.

Quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasini ishlab chiqish.

Tadqiqotning obyekti “NKMK” AJ NMZ korxonasining “Rangli metallarni suyuqlantirish” sexida suyuqlantirib olinayotgan 35XML markali po'lat va undan quyib olinadigan venets quymalari olingan.

Tadqiqotning predmetini po'lat tarkibidagi asosiy va qo'shimcha elementlarning optimal nisbati, modifikatorlar ta'sirida mikrostruktura shakllanishi va nuqsonlarning kamaytirilishi, resurstejamkor usullar yordamida 35XML markali

po'latni suyuqlantirish texnologiyasi, metall tarkibidan zararli qo'shimchalarni ajratib olish usullari, turli termik ishlov berish texnologiyalarining 35XML markali po'latning mexanik va strukturaviy xossalriga ta'siri, 35XML markali po'latning quymakorlik xossalarini yaxshilash usullari, sifatli quyma mahsulotlar olish uchun texnologik jarayonlarni takomillashtirish tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida namunalar kimyoviy tarkibini aniqlash uchun S9 Atlantis Optik emissiya spektroskopiya jihozi ishlatilgan. Qotishmalarning mikrostrukturasi va ularning tarkibidagi elementlarning hajm bo'ylab taqsimotini tahlil qilish uchun Nikon Eclipse MA200 tezkor metallurgik mikroskopi va Carl Zeiss Ultra Plus Field Emission skanerlovchi elektron mikroskopidan foydalanilgan. Qattqlik ko'rsatkichlarini aniqlash uchun esa Hardness tester TB 2109 jihozi qo'llanilgan. Bundan tashqari, qotishmalarning fizik-mexanik xususiyatlari va ekspluatatsion ko'rsatkichlarini baholashda tegishli davlat standartlariga asoslangan holda ish olib borilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritishning nazariy asoslari ishlab chiqilib, metall tarkibida bor atomlarining diffuziya va fazaviy taqsimlanish mexanizmlari ilmiy jihatdan asoslab berilgan;

bor elementining optimal miqdorini aniqlash orqali 35XML po'lat tarkibini modifikatsiyalashning ilmiy asoslangan modeli ishlab chiqildi hamda borning mikrotuzilma shakllanishiga va yeyilishbardoshlikka ta'sir etish qonuniyatlari ochib berilgan;

elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni kamaytirishning termodinamik va kinetik qonuniyatlari aniqlanib, ularning metall sifatiga ta'sir etish mexanizmlari aniqlashtirilgan;

termodinamik muvozanat holatlari asosida 35XML po'latni suyuqlantirish texnologiyasining nazariy modeli taklif etilib, bu model asosida suyuqlanish jarayonining optimal parametrlarini aniqlash imkoniyati yaratilgan;

quyma jarayonida suyuq metallning issiqlik almashinuvi va sovish tezligiga qum-gilli qolipning issiqlik o'tkazuvchanligi va mexanik mustahkamligining ta'siri ilmiy asoslab berilib, quyma shakli va murakkablik darajasiga qarab qolip materialini tanlash nazariy mezonlari ishlab chiqilgan;

quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan issiqlik oqimini nazorat qilish, qizdirish va sovitish jarayonlarining termokinetik parametrlarini optimallashtirish orqali optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasi ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

35XML markali po'latni bor elementining optimal miqdordagi modifikator bilan modifikatsiyalangan tarkibi ishlab chiqilgan;

quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni 4 bosqichda kamaytirish texnologiyasi ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi eksperimental tadqiqotlar natijalarini statistik qayta ishlash ma'lumotlariga asoslanadi, tajribalar va yarim sanoat sinovlari jarayonida olingan barcha laboratoriya texnologik parametrlari sertifikatlangan o'lchash asboblari va uskunalari yordamida, tadqiqot natijalarini o'rganish uchun zamonaviy usullar va qurilmalardan foydalangan holda amalga oshirildi (UV-VIS-nir optik spektroskopiyasi, Empyrean Malvern Panalytical diffraktometri, elektron mikroskopni skanerlash Carl Zeiss EVO-MA-10) deb nomlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati po'lat qotishmalariga pechda hamda pechdan tashqari ishlov berish, suyuq metall tarkibidagi gazlar va nometall qo'shimchalarni kamaytirish omollari ilmiy asoslangan.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati 35XML markali po'lat qotishmasini suyuqlantirish jarayonida, pechda va pechdan tashqari ishlov berish natijasida qotishmaning quymakorlik xossalarning yaxshilanishi ulardan olingan detallarning xizmat muddatini oshishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. 35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirishda qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishning ilmiy asoslarini yaratish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritish texnologiyasi "NKMK" AJ qoshidagi "NMZ" ICHB korxonasi joriy etilgan ("NKMK AJ" korxonasi 2025 yil 8 oktyabrdagi 02-07/02/10453-son ma'lumotnomasi). Natijada borning kuyish miqdori 17-19% ga kamaygan;

35XML markali po'latni bor elementining optimal miqdordagi modifikator bilan modifikatsiyalangan tarkibi "NKMK" AJ qoshidagi "NMZ" ICHB korxonasi joriy etilgan ("NKMK AJ" korxonasi 2025 yil 8 oktyabrdagi 02-07/02/10453-son ma'lumotnomasi). Natijada qotishmaning maydalangan donadorligi 10-15% ga oshgan;

quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasi "NKMK" AJ qoshidagi "NMZ" ICHB korxonasi joriy etilgan ("NKMK AJ" korxonasi 2025 yil 8 oktyabrdagi 02-07/02/10453-son ma'lumotnomasi). Natijada detal yuzasining yeyilishbardoshligi 20-25% ga oshgan;

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida termodinamik qonuniyatga asoslanib suyuqlantirish texnologiyasi ishlab chiqilgan va bu texnologiya "NKMK" AJ qoshidagi "NMZ" ICHB korxonasi joriy etilgan ("NKMK AJ" korxonasi 2025 yil 8 oktyabrdagi 02-07/02/10453-son ma'lumotnomasi). Natijada suyuq metall tarkibidagi elementlarni hajm bo'ylab tarqalishi 12-15 % ga yaxshilangan;

quyning shakli va murakkablik darajasiga bog'liq holda suyuq metallni quyib olish texnologiyasi "NKMK" AJ qoshidagi "NMZ" ICHB korxonasi joriy etilgan ("NKMK AJ" korxonasi 2025 yil 8 oktyabrda 02-07/02/10453-son ma'lumotnomasi). Natijada quyma yuzasining qattiqligi 18-20% ga oshgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 9 ta, jumladan 9 ta xalqaro ilmiy – amaliy anjumanlarida va simpoziumlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 28 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyasining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 19 ta maqola, jumladan 10 tasi Respublika va 9 tasi yuqori impact faktorli, 3 tasi scopus bazasidagi xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tuzilishi kirish, beshta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 200 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida o'tkazilgan ilmiy tadqiqot ishlalarining dolzarbligi va zaruratiga asoslangan bo'lib, tadqiqot ishining maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari tavsiflangan, respublikamizda fan, texnika va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **35XML markali po'lat qotishmalarini suyuqlantirish, termik ishlov berish va qotishma strukturasi optimallashtirishning sifatli quyma mahsulot olishga ta'sirini tadqiq etish** deb nomlangan birinchi bobida po'lat tarkibidagi nometal qo'shimchalarning mexanik xossalarga va detallarning detallning xizmat muddatiga ta'sirini tahlil qilish, termik ishlov berishning turli texnologiyalar bilan ishlov berilgan yuqori mustahkamlikka ega kam legirlangan po'latlarning mexanik xossalarga va mikrostrukturasi ta'siri, 35XML markali po'latning po'latining boshlang'ich mikrostrukturasi va yumshatish jarayonining strukturaviy xususiyatlariga ta'siri va subkritik toblash haroratining 35XML markali po'latining mikrostrukturasi va mexanik xususiyatlariga ta'siri ustida ilmiy tadqiqotlar tahlil qilinadi va ilmiy xulosalardan kelib chiqib sifatli quyma mahsulotlar olish talab etiladi. Sifati yaxshilangan quyma mahsulotlarni yeyilishbardoshligi ijobiy natijalar ko'rsatib uzoq muddat xizmat qilishi taminlanadi.

Zararli elementlar va aralashmalarni kamaytirish, tarkibni boshqarish ya'ni metall tarkibidagi fosfor, oltingugurt kabi zararli elementlarni kamaytirish orqali uning mexanik va fizik xossalarni yaxshilash mumkin. Gazlarni chiqarish ya'ni kislorod va azot miqdorini kamaytirish suyuq metallni g'ovaklardan tozalashda muhim ahamiyatga ega. Metallning oquvchanligini oshirish uchun suyuq metallga

legirlangan elementlar, masalan, kremniy yoki marganets qo‘shiladi. Metallni quyish jarayonida harorat va bosimni nazorat qilish ham kerakli sifatga erishishda muhimdir. Yoriqlar hosil bo‘lishining oldini olish uchun esa sovutish jarayonini nazorat qilish, metallning notekis sovishi ichki kuchlanishlarni kamaytiradi. Issiqlik ishlovi va aniq quvvat beruvchi rejimlar yordamida deformatsiya va charchashga chidamlilikni oshirish mumkin. Tozalangan metall tarkibiga ega bo‘lish quyma mahsulotlarning xizmat muddatini uzaytiradi. Nozik geometrik shakl va yuqori mexanik xossalarni ta‘minlash uchun zamonaviy quyish texnologiyalari qo‘llanilgan.

Qo‘shimchalar, jumladan, SiO₂ (kremniy oksidi), Al₂O₃ (alyuminiy oksidi), va plastilangan marganets sulfidlari (MnS), charchashga chidamlilik chegarasi, charchash yoriqlari tarqalish tezligi, yorilish chidamliligi, g‘ovaklar hosil bo‘lishga qarshi chidamliligi, cho‘zilishga qarshilik xossalari va bu xossalarning uzunlik yo‘nalishiga nisbatan anizotropiyasiga ta‘sir qiladi. MnS ayniqsa anizotropiyaga ta‘sir qiladi, chunki uning uzunlik yo‘nalishida issiq shakllantirishdan keyin morfologiyasi uzayadi. Shuning uchun, agar izotropik xossalar faraz qilinsa, buzilishlar uchun sezilarli potensial mavjud. Metallurgik va fraktografik texnikalar yoriqlarning qaysi yo‘nalish bo‘yicha tarqalishini aniq aniqlashda samarali bo‘lilshi aniqlangan.

35XML markali po‘latning bir necha analoglari boshlang‘ich mikrostrukturasi va yumshatish jarayonining strukturaviy xususiyatlariga ta‘siri o‘rganilgan. 35XML markali po‘lat boshlang‘ich mikrostrukturasi toblash jarayonida mikrostruktura va xossalar o‘zgarishini o‘rganish maqsadida ikkita turdagi boshlang‘ich mikrostrukturali 35XML markali po‘latdan foydalanilib, toblash, yumshatuvchi toblash va ichki kuchlanishlarni bartaraf etuvchi toblash jarayonlari matematik modellar asosida simulyatsiya qilingan.

35XML markali po‘latining modifikatsiyalash yordamida qoldiq kuchlanishi va strukturaviy xarakteristikasini ilmiy tahlil qilingan. Asosiy ishlar 35XML po‘latining turli xil qalinlikda yuzaga ishlov berish bo‘yicha qoldiq kuchlanish va mikrostruktura xususiyatlarini o‘rganishga qaratilgan. Yuzaga ishlov berish ta‘sirida qoldiq kuchlanish taqsimoti chuqurlik oshishi bilan oshishi aniqlandi. 5 daqiqa ishlov berilgan namunada qoldiq kuchlanish to‘liq bo‘lib qoladi. Maksimal siqilish kuchi -600 MPa bo‘lib, 25 μm chuqurlikda o‘lchangan. Mikrostrukturaviy o‘zgarishlar turli elektron mikroskopiya texnologiyalari yordamida tahlil qilingan. Eng mayda donadorlik eng yuqori yuza qatlamida kuzatilgan. Donadorlikni yanada mayda qilishning aniq ko‘rinishi deformatsiya qatlamida kuzatilgan.

Dissertatsiyaning **“Ilmiy tadqiqot usullarini ishlab chiqish va tadqiqot obyektini tanlash”** deb nomlangan ikkinchi bobida tadqiqot obyektini tanlash, qo‘llaniladigan mahsulotlarning asosiy fizikaviy va kimyoviy hossalarni yoritib berish hamda fizik-mexanik, kimyoviy va fizikaviy xossalarni o‘rganishda zamonaviy usul va jihozlardan (infraqizil pirometr, optik mikroskop, skanerlovchi elektron mikroskop) foydalanilganlik haqida ma‘lumotlar keltirilgan.

Tadqiqot obyektlari sifatida “NKMK” AJ korxonasi suyuqlantirib 35XMLI markali po‘lat va undan quyib olinadigan venets detali tanlangan. Dissertatsiya

ishining asosiy tadqiqot usullari: po‘latlarni suyuqlantirib elektr yoy pechi, suyuq metallni haroratini o‘lchash uchun pirometr va termopara, namunalarga ishlov berish uchun “Struers Tegramin – 30” markali jihozi yordamida sifatli quyma mahsulotlarni suyuqlantirib olishga qaratilgan. Shu sababli tadqiqotlarda kimyoviy, fizik-kimyoviy va fizik-mexanik xossalarni o‘rganishda optic mikroskop, skanerlovchi elektron mikroskop, qotishmani tahlil qilish va boshqa turli zamonaviy tadqiqot usullaridan foydalanilgan. Tadqiqotni olib borishda NMZ sharoitida yordamchi jihozlar sifatida: namunani yuzasini silliqlash uchun jilvirlash jihozi, shixta materiallarini suyuqlantirish uchun 6 tonnali elektr yoy pechidan foydalanilgan.

Dissertatsiyaning **“35XML markali po‘lat qotishmalarini suyuqlantirish texnologiyasini optimallashtirish”** deb nomlangan uchinchi bobida Quyma tarkibini barqarorlashtirish. Bor elementining qotishmaning mexanik va strukturaviy xossalariga ta’siri o‘rganilgan. 35XML markali po‘latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida legirlovchi elementlarni suyuq metall tarkibiga kiritish texnologiyasini ishlab chiqilgan. DSP-6 elektr yoyli pechda eritish sharoitlari va parametrlarining nazorati ilmiy tahlillar asosida amalga oshirilgan va “NKMK” AJ korxonasiining “Rangli metallarni suyuqlantirish” sexida DSP-6 elektr yoy pechida suyuqlantirib olingan 35XML markali po‘lat qotishmalari suyuqlantirish jarayonidan avval qotishmalarning quymakorlik xossalarini yaxshilash hamda nuqsonsiz, yuqori sifatli quyma mahsulotlar olish maqsadida tegishli texnologik jarayon ketma ketligi ishlab chiqilgan. 35XML markali po‘latning asosiy elektr pechida oksidlanish yo‘li bilan eritish texnologiyasi ishlab chiqilgan.

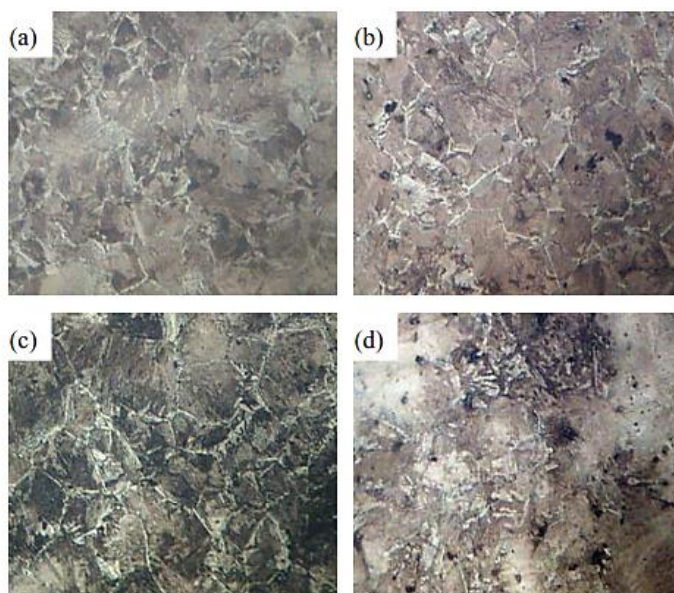
Bor elementining quymakorlik xossalariga ta’siri po‘lat va cho‘yan qotishmalarida juda muhim. Chunki bor juda kichik odatda 0,001–0,005% miqdorda bo‘lsa ham, qotishmaning mikrostrukturasi, fizik-mexanik xossalari va texnologik ishlov berilish jarayonlarini sezilarli darajada o‘zgartiradi. Bor don chegaralarida to‘planib, kristallanish jarayonini tartibga soladi, donlarning yiriklashishini oldini oladi va oquvchanlikni oshiradi. Natijada, murakkab shaklli va yupqa devorli quyma detallarni nuqsonsiz olish, sovuq mo‘rtlikni kamaytirish va yeyilishbardoshlikni oshirish mumkin bo‘ladi. Biroq, bor miqdorining ortib ketishi qattiq va mo‘rt boridlar hosil bo‘lishiga olib keladi. Bu esa metallning plastiklik va zarbaga chidamliligini pasaytiradi.

Bor elementining quymakorlik xossalariga ta’siri po‘lat va cho‘yan qotishmalarida juda muhim. Chunki bor juda kichik odatda 0,001–0,005% miqdorda bo‘lsa ham, qotishmaning mikrostrukturasi, fizik-mexanik xossalari va texnologik ishlov berilish jarayonlarini sezilarli darajada o‘zgartiradi. Bor don chegaralarida to‘planib, kristallanish jarayonini tartibga soladi, donlarning yiriklashishini oldini oladi va oquvchanlikni oshiradi. Natijada, murakkab shaklli va yupqa devorli quyma detallarni nuqsonsiz olish, sovuq mo‘rtlikni kamaytirish va yeyilishbardoshlikni oshirish mumkin bo‘ladi. Biroq, bor miqdorining ortib ketishi qattiq va mo‘rt boridlar hosil bo‘lishiga olib keladi. Bu esa metallning plastiklik va zarbaga chidamliligini pasaytiradi.

35XML markali po'lat yuqori mexanik xossalar talab etiladigan sohalarda qo'llash uchun tanlanadi. Barcha o'rta uglerodli po'latlar avtomobilsozlikning keng turdagi qo'llanmalari uchun mos keladi. 35XML markali po'lat yuqori mustahkamlik darajasi va yaxshiroq bir xillik muhim bo'lgan yuqori yuklanishda ishlaydigan detallar uchun ishlatiladi.

Bor atom radiusi kichik bo'lgan interstitsial element bo'lib, α -temirning qattiq eritmasida eruvchanligi juda past ($<0,003\%$ B). Po'lat tarkibiga kiritilgan bor atomlari, asosan, don chegaralarida yoki karbid fazalari bilan kompleks birikmalar holida uchraydi. Issiqlik bilan ishlov beriladigan po'latlarda bor qo'shishning asosiy vazifasi-martensitik qotishish qobiliyatini oshirishdir. Bu hodisa bor atomlarining austenite-ferrit o'tishida don chegaralariga segregatsiyalanib, ferrit yadrolanish jarayonini sekinlashtirishi natijasida yuzaga keladi. Natijada po'latning kritik sovutish tezligi pasayadi, to'liq martensit tuzilma olish imkoniyati ortadi va po'latning qattiqligi hamda mustahkamligi oshadi. Bor qo'shilgan po'latlar, iqtisodiy jihatdan legirovchi elementlarni (masalan, nikel, xrom, molibden) ma'lum darajada kamaytirish imkonini berib, xarajatlarni optimallashtirish hamda resurslarni tejash afzalligiga ega. Shunga teng qattqlikka ega, ammo bor qo'shilmagan po'latlar bilan solishtirilganda, borli po'latlar yuqori plastik deformatsiyaga chidamlilik (cho'ziluvchanlik) va yaxshilangan ishlov berish qobiliyati (kesish, frezlash, shtamplash jarayonlarida) bilan ajralib turadi.

Bo'shatilgan po'latlarning mikrostrukturaviy tahlili (1-rasmda keltirilganidek) asosan martensit fazasidan iborat. Po'lat tarkibida borning mavjudligi ularning qattiqligini oshiradi, bu esa mikrostrukturada martensit fazasi tarkibining ortishi bilan izohlanadi.



1-rasm. Termik ishlov berilgan po'latning mikrotuzilishi (termik ishlov harorati 260°C, 30 minut) 100×. (a) Borsiz; (b) 0,00066% B; (c) 0,0023% B; (d) 0,0055% B.

Zarba chidamliligining bor miqdoriga bog'liq o'zgarishi 1-rasmda keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, bor miqdori 0,0023% gacha bo'lganda uning zarba chidamliligiga ta'siri juda sezilarli, biroq bor miqdori oshib 0,0055% gacha yetganda bu ta'sir asta-sekin kamayadi. Buning sababi, bor samaradorligining 0,0030% dan so'ng pasayishi hamda 0,0055% B tarkibli po'latda titan miqdorining yetarli bo'lmasligidir.

Bor ta'sirining samaradorligini baholash maqsadida ishlab chiqarilgan barcha po'latlarning qattqlik ko'rsatkichlari tahlil qilindi. Qattqlik o'lchovlari Vickers usuli bo'yicha amalga oshirilib, quyidagi natijalar olindi: erkin bor qo'shilmagan po'lat uchun 352 HV, 0,00066% B qo'shilganda 360 HV, 0,0023% B miqdorida legirlanganda 372 HV, hamda 0,0055% B tarkibida 400 HV. Natijalar shuni ko'rsatadiki, borning miqdori oshgani sari po'latning qattqligi sezilarli ravishda ortib borgan. Bu holat borning don chegaralarida diffuziya jarayonlarini sekinlashtirishi va shu orqali martensit hosil bo'lish jarayonini kuchaytirishi bilan izohlanadi. Ayniqsa, 0,0023–0,0055% B oralig'ida bor eng samarali ta'sir ko'rsatib, po'lat qattqligi 10–15% gacha oshgan.

Biroq, yuqori miqdordagi bor (0,0055% B) qattqlikni sezilarli darajada oshirgan bo'lsa-da, bu bilan birga metallning mo'rtligi ham ortishi mumkinligi qayd etiladi. Shu sababli optimal diapazon sifatida 0,0023% B atrofidagi qiymat tanlanadi, chunki u metallning qattqligi va mustahkamligini oshirib, mo'rtlikni nazorat ostida saqlaydi.

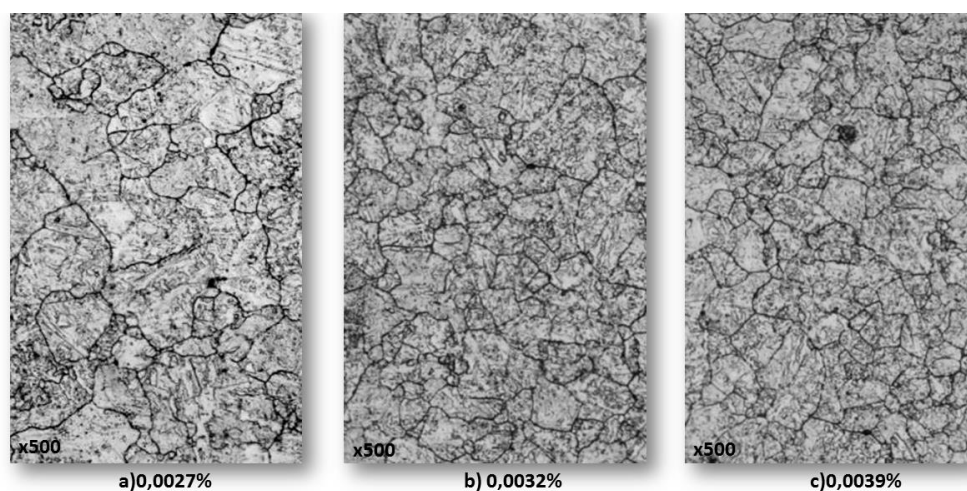
Tadqiqot davomida FeB17 ferroburi eritish jarayonida beshta granulometriya oralig'ida qo'shildi: 1–5 mm, 5–15 mm, 20–30 mm, 30–40 mm, 40–50 mm va katta granulalar ≥ 80 mm. 1–5 mm granulalar eng yaxshi natija berdi va optimal granulometriya hisoblandi — bor tez eriydi, suyuq metallga bir xil tarqaladi va foydali o'zlashtirilish yuqori bo'ladi. 5–15 mm oralig'idagi granulalar ham 1–5 mm ga yaqin samaradorlik ko'rsatdi. Sanoat sharoitida bu diapazon ham qabul qilinishi mumkin. 20–50 mm va ≥ 80 mm kabi yirik granulalar sekinroq eriydi, natijada o'zlashtirish samaradorligi pastroq va mikrostruktura hajm bo'ylab tarqalish yomonlashishi mumkin. < 0.5 mm (kukunga yaqin) granulometriya texnologik jihatdan yomon natija berdi: metallning qattqligi va mustahkamligi keskin oshishi bilan birga mo'rtligi ham sezilarli ko'tarildi. Shuningdek, juda mayda fraksiya qo'shilganda borning kuyib ketish xavfi ortadi va foydali o'zlashtirish darajasi pasayadi. Shu sababli kukun yoki juda mayda granulalardan foydalanish tavsiya etilmaydi. Texnologik tavsiya: FeB17 qo'shishda 1–5 mm granulalardan foydalanish eng optimal. Agar ishlab chiqarish jihatidan zarur bo'lsa, 5–15 mm oralig'i ham maqbul alternativ hisoblanadi. Juda mayda (< 0.5 mm) yoki juda yirik (≥ 80 mm) fraksiyalarni kelgusida cheklash yoki oldindan qayta ishlash (masalan, granula sinfi bilan tartiblash) tavsiya etiladi.

1-jadval. FeB17 ni besh xil o'lchamda kiriish va quymadagi o'zlashtirish miqdori.

O'lcham	Qotishma tarkibida qolgan Bor miqdori (O'zlashtirishi) (%)	FB17 (kg) (0.002% B)	FB17 % qotishma tarkibidagi miqdor (0.002% B)	FB17 kg (0.003% B)	FB17 % qotishma tarkibidagi miqdor (0.003% B)
1-5 mm	80	0.718	0.001471%	1.076	0.002206%
20-30 mm	65	0.883	0.001810%	1.325	0.002715%
30-40 mm	55	1.044	0.002139%	1.566	0.003209%
40-50 mm	45	1.276	0.002614%	1.914	0.003922%
>80 mm	25	2.296	0.004706%	3.445	0.007059%

2-jadval. 35XML markali po'latdan olingan beshta na'munaning kimyoviy tarkibi.

Eritma №	Material nomlanishi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B	Cu
5286	35XMLI (kovsh 1)	0.34	0.21	0.62	0.021	0.019	0,7	0.28	0.19	0,0022	0.25
5288	35XMLI (kovsh 1)	0.32	0.33	0.67	0.019	0.02	0.91	0.2	0.13	0,0027	0.19
5288	35XMLI (kovsh 2)	0.3	0.33	0.67	0.018	0.02	0.92	0.21	0.14	0,0032	0.19
5289	35XMLI (kovsh 1)	0.34	0.46	0.57	0.019	0.018	0.99	0.21	0.13	0,0039	0.18
5289	35XMLI (kovsh 2)	0.32	0.42	0.41	0.019	0.017	0.95	0.21	0.13	0,0070	0.18



2-rasm. Bor miqdorining mikrostrukturadagi donadorlikka ta'siri.

Bor po'lat mikrostrukturasi donalarining o'sish jarayoniga sezilarli ta'sir ko'rsatadigan mikrolegirlovchi elementlardan biridir. Rasmda bor miqdori 0,0027%, 0,0032% va 0,0039% bo'lgan namunalar mikrostrukturasi taqqoslangan. a) 0,0027% B — Bor miqdori nisbatan past bo'lganda donalar ancha yirik va chegaralari aniq ko'rinadi. Bu holatda bor yetarli emasligi sababli, u donalar chegarasida karbidlar yoki borid fazalar hosil qilib, don o'sishini cheklay olmaydi. Natijada donalar nisbatan yirik shakllanadi. b) 0,0032% B — Bor miqdori oshirilganda, u donalar chegaralarida joylashib, don o'sishini sekinlashtiradi. Bu

donalarning maydalanishiga, ya'ni mikrostrukturada bir tekis, mayda donalar hosil bo'lishiga olib keladi. Bu holat optimal bor konsentratsiyasi deb qaraladi. c) 0,0039% B — Bor miqdori ortiqcha bo'lganda, u boshqa elementlar (masalan, Fe, Cr, C) bilan birikib, borid fazalar (Fe_2B , CrB , FeB) hosil qiladi. Bu fazalar don chegaralarida to'planadi va donalarning o'sishini qisman to'xtatadi, lekin haddan tashqari bor konsentratsiyasi struktura notekisligiga olib keladi. Shuning uchun donalar biroz qo'polroq, ayrim joylarda qattiq borid zarralari kuzatiladi.

Dissertatsiyaning **“35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishning nazariy asoslari, ilmiy asoslari va texnologiyasini ishlab chiqish”** deb nomlangan 4-bobida 35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirishda nometal qo'shimchalar va zararli elementlardan tozalashning texnologiyasini ilmiy asosda ishlab chiqilgan. Bunda 35XML po'latni zararli elementlar — ayniqsa oltingugurt (S) va fosfor (P) dan tozalash uchun to'rt bosqichli texnologiya ishlab chiqilgan. Har bir bosqichda CaO , $CaSi$, CaC_2 , Mg kabi reagentlar va argon/azot bilan aralashtirish qo'llanilib, S ning boshlang'ich 0.06% dan 0.011% gacha tushirilishi natijasida ~80% samaradorlikka erishilgan. Kislorod va azot bilan bog'langan reaksiyalarning oldini olish uchun deoksidlanish va denitrogenizatsiya jarayonlari optimallashtirilgan. Mikrotahlillar shuni ko'rsatdiki, nometal qo'shimchalar asosan Al_2O_3 (~40%), SiO_2 (~14%), Cr_2O_3 (~20%) va boshqa oksidlardan iborat. Nometall qo'shimchalar hajmi 0.28% ni tashkil etdi, ulardan 2 μm dan kichik zarralar eng ko'p ulushga (0.079%) ega ekanligi kichik va oval shakldagi qo'shimchalar charchash mustahkamligiga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatmasligi aniqlangan.

Ushbu bobda Venets detalida mexanik ishlov berilgandan so'ng uning tishlariga yuqori chastotali tok bilan ishlov berish texnologiyasi ishlab chiqilgan, Bunda 1 dan 15 daqiqagacha TVCH bilan ishlov berilgan namunalar uchun qoldiq kuchlanish tahlillari, Venets tishlarining faqat sirt qatlami (2–4 mm chuqurlikda) qizdirilib, tez sovutilishi orqali yuqori qattqlik (50–60 HRC) va yeyilishbardoshlik ta'minlanganligi, tishlarning har biri uchun sarflangan vaqt 4–5 daqiqa, butun venets (126 tish) uchun 8–9 soatni tashkil etganligi, TVCH vaqti 1 daqiqadan 5 daqiqagacha oshirilganda, qoldiq kuchlanish 600 MPa gacha ortadi va 2–4 mm chuqurlikda maksimal qiymatga erishishi, 5 daqiqadan ortiq ishlov berish samarasiz ekanligi, qoldiq kuchlanish deyarli o'zgarmasligi, sirt qatlamida ipsimon martensit va nanodonali tuzilma shakllanishi, bu qattqlikni oshirishga xizmat qilishi, Namunada 100 μm chuqurlikgacha bo'lgan zonada donalarning kuchli maydalanishi va dislokatsiya zichligining oshishi kuzatilganligi, chuqurlik oshgani sayin 20–80 μm donalar kattalashishi, deformatsiya kamayishi va mikrostruktura asosiy matritsaga o'tishi keltirilgan. Yeyilishbardoshlik, charchoqqa chidamlilik va zarbiy mustahkamlik sezilarli darajada oshirilgan.

35XML markali po'latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida legirovchi elementlarni yo'qotilishini kamaytirish bo'yicha termodinamik qonuniyatga asoslanib suyuqlantirish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Gibbs erkin

energiyasi (ΔG) asosida qurilgan termodinamik model yordamida xrom (Cr) va uglerod (C) o'rtasidagi oksidlanish muvozanati aniqlangan. Taklif etilgan texnologiya yordamida xrom yo'qotilishi 65% gacha kamaygan.

Po'lat tarkibidagi oltingugurt va fosfor odatda zararli aralashma sifatida qaraladi, chunki u po'latning quyidagi xossalari salbiy ta'sir ko'rsatadi: plastiklik, zarbiy qovushqoqlik, korroziyaga chidamlilik va yeyilishbardoshlik. Shu sababli oltingugurt deyarli barcha turdagi po'latlarda qat'iy cheklangan, ammo turli darajalarda.

Ikkilamchi po'latni tozalash bosqichida oltingugurtdan tozalash jarayoni shlak metal reaksiyasi asosida amalga oshirilganda yana bir qo'shimcha samaraga erishiladi. Bunda po'lat va shlakning deoksidlanish darajasi juda yuqori bo'ladi ya'ni kislorod miqdori juda past bo'ladi va natijada po'latning tozaligi mukammal darajaga yetadi.

Dissertatsiyadagi 4.1-rasmda 35XML po'lat markalari uchun qo'llaniladigan oltingugurtdan tozalash strategiyasi ko'rsatilgan. Umumiy oltingugurtdan tozalash jarayoni suyuq po'lat ishlab chiqarish bosqichlari o'rtasida taqsimlanadi. Bu bosqichlar quyidagilardan iborat: Suyuq po'latni oltingugurtdan tozalash. Kislorod bilan qayta ishlash, Ikkilamchi metallurgiya jarayonlari, quyish bosqichi. 35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni kamaytirishni biz to'rt bosqichda amalga oshirildi.

35XML markali po'lati o'rtacha uglerodli va kam legirlangan po'lat hisoblanadi. 35XML markali po'lat yuqori mustahkamlik, qattqlik va yeyilishga bardoshlilik talab etiladigan og'ir ish sharoitlarida ishlatiladi. Bu uning quyidagi asosiy mexanik xossalari bilan bog'liq. Yuqori yeyilishbardoshlik qobiliyati, zarbiy qovushqoqlik xususiyati, past darajadagi mo'rtlanishga moyillik va yaxshi korroziyaga chidamlilik. Materiallarning ishlash samaradorligini oshirishda yuzaki ishlov berish keng qo'llaniladi, masalan, kontakt yuzalarni puxtaligini oshirish materialni og'ir muhitlardan himoya qilish. Kuchli plastik deformatsiya, masalan, tishlarga yuqori chastotali tok bilan termik ishlov berish ya'ni tishlarni TVCh qilish. Tishlarni yuqori chastotali tok bilan ishlov berishi ta'sir chuqurligi taxminan bir necha mm qalinlikkacha bo'lishi mumkin. 35XML markali po'latdan quyilgan quyma mahsulot venets detalini mexanik ishlov berilgandan keyin uning ishlarini TVCh qilish tadqiqotning yana bir asosiy maqsadlaridan biri hisoblanadi. TVCh – bu yuqori chastotali tok yordamida metallning yuzaki qatlamini qizdirib, keyin uni tez sovitish odatda suv, moy yoki havo yordamida asosida amalga oshiriladigan induksion yuzaki toblash jarayonidir. "Tok Vysokoy Chastoty" (TVCh) atamasi rus ilmiy adabiyotlaridan o'tgan bo'lib, xalqaro adabiyotlarda Induction Hardening deb yuritiladi. Jarayonda metallning butun hajmi emas, balki faqat yuza qatlami (2–10 mm) qiziydi va qattqligi oshadi. Ichki qism esa avvalgi mexanik mustahkamlikni saqlab qoladi.

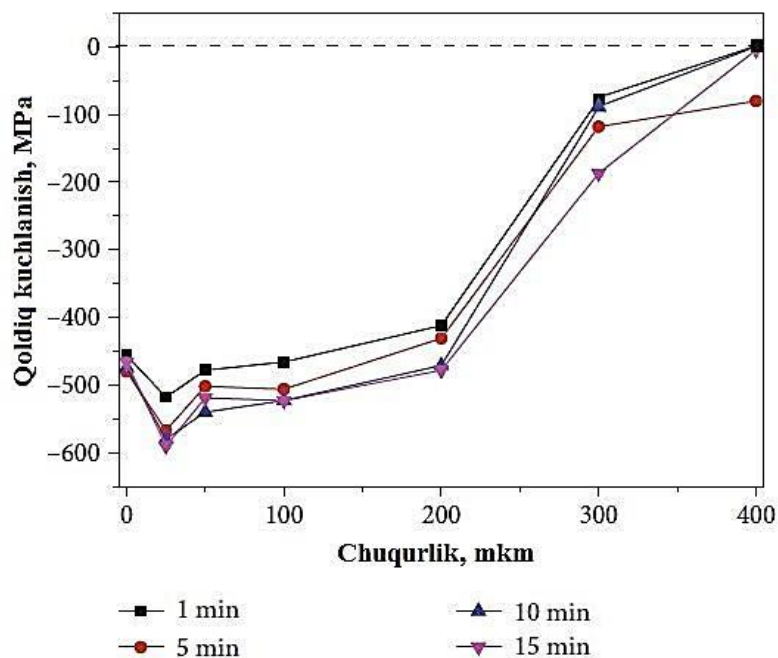
TVCh toblash induksion qizdirish jihozlarida amalga oshiriladi. Asosiy qismlari: Induksion generator 1000 Hz – 500 kHz chastota oralig'ida ishlaydi. Yuqori chastotali elektr tok hosil qiladi. Induktor sopol izolyatsiya bilan qoplangan

mis spiral tok o'tganda elektromagnit maydon hosil qiladi va detaldagi toklarni induksiyalaydi. Sovitish tizimi suv, moy yoki emulsiyalar qizdirilgan yuzani tez sovitadi. Avtomatlashtirilgan boshqaruv bloki – vaqt, tok, chastota va sovitish tezligini nazorat qiladi. 4880 kg li venets kran, ekskavator yoki metallurgiya jihozlari uchun katta tishli g'ildirak yoki quyushtirgichlar misolida ishlatiladi. Venets yuzasining faqat tishlari yuza qatlami (2–4 mm chuqurlikda) qattiqashtirilishi kerak. Har bir tish induktor yordamida 4–5 daqiqa qizdiriladi. Sovitish suyuqligi purkash yo'li bilan beriladi. 126 ta tishga ishlov berish uchun umumiy vaqt 8–9 soat davom etadi. Yuza qatlam (martensit) qattiqligi 50–60 HRC gacha ko'tariladi. Bu esa detallarning zarbiy yuklanishlariga va yeyilishga chidamliligini oshiradi. Ilmiy asoslar keltiradigan bo'lsak, Induksion qizdirish natijasida yuzada tok zichligi yuqori bo'ladi Joul-Lens qonuniga asosan issiqligi yuzaga keladi. Qizigan yuzani tez sovitishda martensit fazasi hosil bo'ladi va qattqlik ortadi. Qatlam qalinligi tok chastotasiga bog'liq. 1000–5000 Hz → chuqur 5–10 mm qizdirish, 10–500 kHz → yupqa qatlam 1–4 mm qizdirish. Venets detalida kerakli chuqurlik 2–4 mm, o'rta chastota 10–50 kHz ishlatiladi. Yuza qattqligi oshadi, ichki qism egiluvchan qoladi. Yeyilishga, charchoqqa va zarbaga chidamlilik oshadi. Qattiqashtirish faqat tishning yuza qismlarida amalga oshiriladi. Metall sarfi va vaqt jihatidan samarali. 4880 kg li venets detali uchun TVCh ishlov berish yuqori yuklamali tishli uzatmalarning xizmat muddatini uzaytirishning eng samarali usullaridan biri hisoblanadi. TVCh ishlov berilgan venetslarning xizmat muddatini 1,8–2,2 baravar oshirishi tadqiqot davomida aniqlandi.

TVCH natijasida, yuzaga yaqin qatlamda yuza qattqligi oshadi va mikrostrukturada o'zgarishlar yuzaga keladi. Bu esa materialning charchoqqa chidamliligini va yuzaki xossalarni yaxshilaydi. Shu sababli, deformatsiyalangan qatlamning yuqori yuzasidan matritsagacha bo'lgan mikrostrukturaviy evolyutsiyani tahlil qilish juda muhimdir.

Qoldiq kuchlanishni chuqurlik bo'yicha o'lchash uchun ta'sirlangan yuzadan taxminan 400 μm chuqurlikkacha material bosqichma-bosqich elektroximik jilvirlash orqali olib tashlandi. Kesim bo'yicha namunalar jilvirlash orqali tayyorlandi. Yuzani tozalash uchun 10% perxlorad kislotasi va 90% sirka kislotasi foydalanildi. Tadqiqot uchun ishlatilgan 35XML markali po'lat qo'llanildi. Kimyoviy tarkibi nominal tarkibga mos keladi va asosan (massa foizi bo'yicha): 0,3–0,37% C, 0,9–1,2% Cr, 0,15–0,3% Mo, 0,6–0,9% Mn, $\leq 0,035\%$ S, $\leq 0,4\%$ Si, $\leq 0,025\%$ P, qolgan qismi Fe. Ishlov berishdan oldin namuna yuzasi SiC metallografik qog'oz yordamida 2000 gritgacha silliqlandi. TVCH jarayoni 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10 va 15 daqiqa davomida amalga oshirildi. Ushbu tadqiqotda berilgan qalinlik va chuqurlik qiymatlari mutlaq aniqlikda emas, $\pm 5\%$ xatolik chegarasiga ruxsat beriladi. TVCH dan keyingi qoldiq kuchlanishning chuqurlik bo'yicha taqsimoti tahlil qilindi. TVCH vaqti oshishi bilan qoldiq kuchlanish 1 daqiqadan 5

daqiqagacha ortadi. Ammo TVCH vaqti 5 dan 15 daqiqagacha oshirilganda, u ko'paymaydi. Qoldiq kuchlanishning maksimal qiymati 600 MPa bo'lib, namunada taxminan 2-4 mm chuqurlikda kuzatildi (3-rasm).



3-rasm: 1 dan 15 daqiqagacha TVCH bilan ishlov berilgan namunalar uchun qoldiq kuchlanish tahlili.

Shuning uchun 35XML markali po'latda qoldiq kuchlanish 5 daqiqalik TVCH dan keyin to'yingan deb hisoblanadi va kuchliroq ishlov berish samarasizdir. 4.19-rasmda 35XML markali po'lat matritsasining mikrostrukturasi: keng ko'rinishda optik mikroskop (chap tomonda) tasviri, SEM tasvirida (o'ng tomonda) don chegaralari ko'rsatilgan bo'lib, don hajmi 30 μm gacha, ko'rinadi. Namunada odatiy termik ishlangan martensit, bir xil ferrit don tuzilmasi kuzatiladi. Ipsimon martensit donalari - bu martensitning maxsus mikrostrukturasi bo'lib, po'lat toblanganda (tez sovutilganda) austenit donlari ichida paydo bo'ladi. Ipsimon martensit uzunchoq, ingichka plastinkachalar yoki novdachalar ko'rinishida bo'ladi. Ular odatda bir-biriga parallel yoki yarim parallel joylashadi. Bir nechta parallel iplar hosil qiladi.

Qoldiq kuchlanishlarning taqsimlanishi va ta'sir chuqurligi TVCH jarayonida ortishi kuzatildi. 5 daqiqa davomida TVCH qilingan namunada qoldiq kuchlanish to'yingan holatda bo'ldi. Maksimal siquvchi kuchlanish qiymati 600 MPa bo'lib, u namunada 25 μm chuqurlikda qayd etildi. Materialda qoldiq kuchlanish bo'lishi charchoqqa chidamlilikni oshiradi. Yeyilishbardoshlikni oshiradi va materialning zarbiy mustahkamligi ortadi.



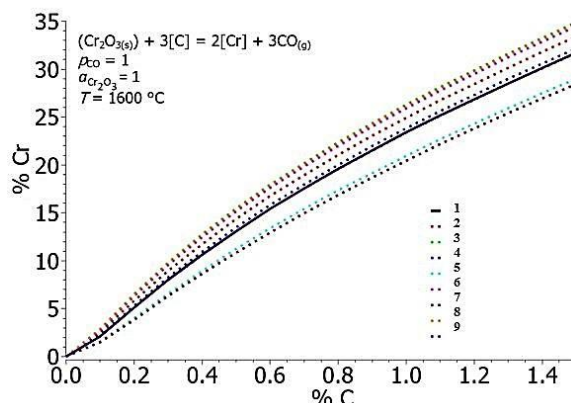
4-rasm. NMZ ICHB da mexanik ishlov berilgandan so'ng, tishlarni yuqori chastotali tok bilan termik ishlov berish jarayoni.

Mikrostruktura evolyutsiyasi turli elektron mikroskopiya texnologiyalari yordamida tahlil qilindi. Eng yuqori qatlamda nanodonalar kuzatildi. Donalarning maydalanishi va maydaroq bo'lishi o'rta qatlamda ravshan ko'rindi. Bu natijalar 35XML markali po'latning TVCH yordamida mexanik xossalarini mustahkamlash, donalarning maydalashishi orqali qattqlik va yeyilishga bardoshlilikni oshirish hamda fazaviy o'zgarishlarning nazorat qilinishi imkonini beradi.

Suyuq metal tarkibidagi xrom (Cr) va uglerod (C) elementlarining muvozanatdagi eruvchanligi NMZda ishlab chiqarilayotgan 35XML markali yeyilishbardosh po'lat uchun Gibbs erkin energiyasi qiymatlari asosida hisoblab chiqildi. Gibbs erkin energiyasining (ΔG°) jadvalda keltirilgan ma'lumotlari asosida tahlil olib borildi. Hisob-kitoblarda Gibbs erkin energiyalaridan tashqari, elementlarning suyuq temir eritmasida erish energiyasi (ΔG_{dis}) ham inobatga olindi. Ya'ni, qattiq holatdan suyuq temir tarkibida erigan holatga o'tish jarayonida yuzaga keladigan energiya o'zgarishlari % standart holat bo'yicha baholandi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, Gibbs erkin energiyasi yig'indisi ortgani sari suyuq temir eritmasidagi xromning muvozanatdagi eruvchanligi kamayadi. Boshqacha aytganda, termodinamik jihatdan energiya barqarorligi oshgani sari, xromning eritmadagi faol konsentratsiyasi pasayadi.

Masalan, 1590 °C haroratda va 0,8% uglerod mavjud bo'lgan sharoitda xromning muvozanatdagi konsentratsiyasi 22,35% Cr ni tashkil etadi. Boshqa manbalarda esa shu sharoit uchun 16,85% Cr qiymati qayd etilgan. Keyingi hisob-kitoblarda entalpiya (ΔH) va entropiya (ΔS) qiymatlari HSC Chemistry 8.1 dasturiy bazasidan olindi. Ushbu dasturiy ma'lumotlar asosida qurilgan muvozanat egri chizig'i o'rtacha yaqinlashuv natijasini ko'rsatadi va amaliy qiymatlar bilan yaxshi muvofiqlikda bo'ladi. HSC 8.1 ma'lumotlariga ko'ra, 1600 °C haroratda va 0,81% uglerod mavjudligida xromning muvozanatdagi konsentratsiyasi 19,61% Cr ni tashkil etadi. Bu qiymatlar NMZda ishlab chiqilayotgan 35XML markali yeyilishbardosh po'lat uchun Fe–Cr–C–O tizimining muvozanat holati va termokimyoviy barqarorligini tavsiflab beradi. Xulosa qilib aytganda, Gibbs erkin energiyasi va erish energiyasi ΔG_{dis} qiymatlarini hisobga olgan termodinamik yondashuv 35XML markali yeyilishbardosh po'latni elektr yoy pechida eritish

jarayonida xrom yo‘qotilishini minimallashtirish hamda legirlovchi elementlarning muvozanatdagi taqsimotini nazorat qilish imkonini beradi.



5-rasm. Turli Gibbs erkin energiyalarini hisobga olgan holda suyuq po‘latdagi Cr va C ning muvozanatdagi eruvchanligi.

1610°C haroratda HSC 8.1 ma’lumotlar bazasidan olingan Gibbs erkin energiyasi va turli o‘zaro ta’sir parametrlar asosida C va Cr ning muvozanatdagi konsentratsiya egri chiziqlari ko‘rsatilgan.

Dissertatsiyaning 4-bobi doirasida ishlab chiqarilgan 35XML markali yeyilishga bardoshli po‘latni metallurgik tozalash, termik ishlov va sirtini mustahkamlash jarayonlarini kompleks tahlil qilish asosida po‘latning strukturaviy, mexanik va ekspluatatsion xossalarini takomillashtirish bo‘yicha ilmiy asoslangan natijalar olingan.

To‘rt bosqichli metallurgik tozalash texnologiyasi ishlab chiqildi va joriy etildi. Ushbu bosqichlarda CaO, CaSi, CaC₂ va Mg reagentlari, shuningdek argon/azot aralashtirish texnologiyasi qo‘llanilgan. Natijada po‘lat tarkibidagi oltingugurt (S) miqdori 0.06% dan 0.011% gacha, ya’ni ~80% kamaytirildi. Bu jarayon fosfor (P) va boshqa zararli elementlarning miqdorini pasaytirib, po‘latning yeyilishga bardoshligini oshirishga xizmat qildi.

Deoksidlanish va denitrogenizatsiya jarayonlari optimallashtirildi. Bu orqali kislorod va azot bilan bog‘langan zararli reaksiyalarning oldi olindi, natijada po‘lat mikrostrukturasi barqarorlashdi va mexanik xossalar yaxshilandi.

Nometall qo‘shimchalar tahlili natijasida ularning asosiy qismini Al₂O₃ (~40%), SiO₂ (~14%), Cr₂O₃ (~20%) va boshqa oksid fazalar tashkil etishi aniqlandi. Ularning umumiy hajmi 0,28% bo‘lib, 2 mkm dan kichik zarralar (0,079%) eng katta ulushni egalladi. Kichik va oval shaklli qo‘shimchalar charchoqqa chidamlilikka sezilarli salbiy ta’sir ko‘rsatmasligi isbotlandi.

Termik ishlov berish natijasida 200°C haroratda toblangan namunalar eng yuqori qattqlik (409 HV) va cho‘zilish mustahkamligi (1335 MPa) ko‘rsatkichlariga ega bo‘ldi. Harorat ortishi bilan (600°C gacha) qattqlik 258 HV gacha, mustahkamlik esa 836 MPa gacha pasaydi. Bu esa martensitli mikrostrukturadan temperlangan ferrit-perlitli fazaga o‘tish bilan bog‘liq ekanligi aniqlangan.

Sirtni mustahkamlash va TVCh qizdirish natijalari shuni ko'rsatdiki, venets tishlarining 2–4 mm chuqurlikkacha qizdirilib, tez sovutilishi 50–60 HRC qattiqlikni ta'minlaydi. Bunda qoldiq kuchlanish 600 MPa gacha ortadi, sirt qatlamda ipsimon martensit va nanodonali tuzilma shakllanadi. Natijada yeyilishga bardoshlilik, zarbiy mustahkamlik va charchashga chidamlilik sezilarli ravishda oshadi. Tajribalar ko'rsatdiki, venets tishlarining xizmat muddati 1,8–2,2 baravar uzaydi.

Termodinamik modellashtirish asosida Gibbs erkin energiyasi (ΔG) hisoblangan model yordamida xrom (Cr) va uglerod (C) o'rtasidagi oksidlanish muvozanati aniqlangan. Model shuni ko'rsatdiki, 1650°C dan yuqori haroratlarda hamda 0,5–2% kremniy (Si) mavjudligida xrom yo'qotilishi minimal bo'ladi. CaO/MgO nisbatini boshqarish va CO qisman bosimini pasaytirish orqali uglerodning ustun oksidlanishi ta'minlanadi va xrom yo'qotilishi 65% gacha kamayadi.

Umuman olganda, 4-bobda olingan ilmiy natijalar 35XML markali yeyilishga bardoshli po'latni ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirish uchun mustahkam ilmiy asos yaratdi. To'rt bosqichli tozalash, sirtni TVCh bilan mustahkamlash va termodinamik boshqaruv tizimlarini uyg'unlashtirish orqali po'latning mikrostrukturasi barqarorlashdi, mexanik xossalari yaxshilandi va yeyilishga qarshi turg'unligi 2 martagacha oshirildi. Bu ilmiy yondashuv korxonalarda yuqori sifatli, yeyilishga bardoshli 35XML markali po'lat ishlab chiqarishning energiya tejankor, barqaror va innovatsion texnologik modelini yaratishga xizmat qiladi.

Dissertatsiyaning **“Elektr-yoy pechida suyuqlantirilgan 35XML markali po'latning mexanik va quymakorlik xossalarini oshirish jarayonlarini matematik modellashtirish va simulyasiya qilish”** deb nomlangan 5-bobida entropiya o'zgarishini hisoblangan, Issiqlik effekti va entropiyaning o'lchamlarini hisobga olgan holda Gibbs energiyasining o'zgarishi hisoblangan, 35XML markali po'latni quyish jarayonida suyuq metallning issiqlik almashinuvi va sovish tezligiga qum-gilli qolipning issiqlik o'tkazuvchanligi va mexanik mustahkamligining ta'siri aniqlangan, matematik model asosida 35XML po'lat qotishmasining yeyilishbardoshligini o'zgarishini optimallashtirilgan.

Ilmiy tadqiqot ishini bajarish davomida NMZ ICHB Rangli metallarni suyuqlantirish sexida, zavod markaziy laboratoriyasida va Metallar texnologiyalari kafedrasida laboratoriyasida tajribada 35XML po'latdan quyib olingan plastinkalar qum gilli qolipga quyildi. Tadqiqot davomida qolipning harorat maydoni hamda qotayotgan quyma sovish egri chizig'i qayd etildi. Tajribaning batafsil tafsilotlari 1-rasmda keltirilgan. 2-rasmda termojuftlar o'rnatilgan qum qolip ko'rsatilgan, 3-rasmda esa tadqiq qilingan tizimning harorat maydoni tasvirlangan.

1-jadvalda hisoblash jarayonida ishlatilgan “quyma–qolip” tizimining material xossalari keltirilgan. Qotish jarayonining tajribada o'lchangan vaqti analitik (1)-formula orqali hisoblangan natijalar bilan taqqoslandi.

$$\sqrt{t_{q.v.}} = \frac{\sqrt{\pi M c}}{2F_b(T_c - T_a)} (L_c + C_c \cdot T)$$

M_C va F - quyma massasini va sovitish yuzasini bildiradi.

b - qolip materiali issiqlikni to'plash koeffitsienti.

λ_M - qolipning issiqlik o'tkazuvchanligi, va

C_M - issiqlik sig'imi

ρ_M - zichligi.



6-rasm. Quyishdan oldingi tajriba qolipi. Qolip bo'shlig'ida va qolip tanasida o'rnatilgan termojuftlar (harorat o'lchagichlar) ko'rinib turibdi.

3-jadvalda hisob-kitoblar davomida ishlatilgan 35XML markali po'latning ning termo-fizik xossalari va geometrik o'lchamlari hamda qolipning zichligi keltirilgan.

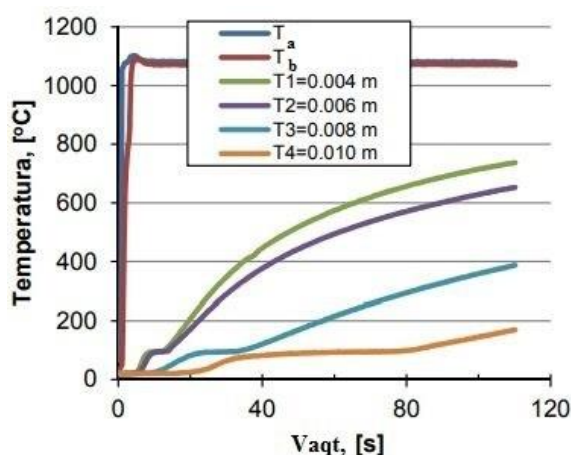
3-jadvalda. 35XML (35CrMo4) markali po'lat quyma namunasi va qolip materiali uchun termofizik hamda geometrik xossalari.

Ko'rsatkich – Belgilash [O'lchov birligi]	Qiymati
Suyuq po'lat zichligi [kg/m ³]	7000
Qattiq po'lat zichligi [kg/m ³]	7850
Eritilish haroratiga yaqin suyuq holatdagi po'latning issiqlik sig'imi	780
Kristallanish (qotish) yashirin issiqligi [J/kg]	$2,72 \times 10^5$
Eritma ortiqcha qizdirilishi – ΔT [K]	30
Po'lat kristallanishining o'rtacha harorati – T [°C]	1490
Quyma plastina o'lchamlari [mm]	$162 \times 162 \times 158$
Qum-gilli qolip zichligi [kg/m ³]	1550
Qolipning boshlang'ich harorati T [°C]	20
Tajriba davomida o'lchangan qotish (qattiqlashish) vaqti – t [s]	240

35XML po'lati tarkibida xrom va molibden mavjudligi tufayli issiqlik o'tkazuvchanligi misga nisbatan pastroq, lekin mexanik xossalari yuqoriroq. Kristallanish harorati taxminan 1480–1500°C. Qum-gilli qolipning issiqlik o'tkazuvchanligi 0,9–1,2 W/(m·K) atrofida bo'lib, bu po'latning sekinroq sovishini

ta'minlaydi. Qotish vaqti 240 soniya atrofida, bu quymaning shakli va hajmiga bog'liq holda o'zgaradi.

Tadqiq qilingan qolip qumining issiqlik tarqaluvchanligining haroratga bog'liqligi issiqlik tarqaluvchanlik koeffitsienti taxminan 100°C atrofida keskin o'zgaradi; bu esa suvning bug'lanishi jarayoni bilan bog'liq. Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti 14 dan $0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gacha bo'lgan oraliqda o'zgaradi. Bu holat qotib borayotgan quyma tomonidan qolipning dastlabki qizdirilishi davrida kuzatiladi. Ushbu davrda, shuningdek, suvning bug'lanishi va bug'ning qolip yuzasidan ichki qatlamlariga harakatlanishi sodir bo'ladi. Shundan so'ng issiqlik o'tkazuvchanlik qiymati barqarorlashadi va asta-sekin $0,5\text{--}0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gacha chiziqli kamayadi.



7-rasm. Tadqiq qilingan “quyma–qolip” tizimidagi harorat maydoni.

Bu grafikda quyma–qolip tizimida vaqt davomida haroratning o'zgarishi ko'rsatilgan. Grafikdan issiqlik oqimi va haroratning tarqalish jarayoni aniq ko'rinadi. Quyidagi chiziqlar har biri ma'lum nuqtadagi harorat o'zgarishini bildiradi:

T_a - Bu chiziq quymaning markaziy qismidagi haroratni bildiradi. Dastlab juda tez ko'tariladi (1000°C dan yuqori), so'ngra deyarli o'zgarmaydi. Bu shuni ko'rsatadiki, quyma ichida metall suyuq holatda bo'lib, asta-sekin soviydi, ammo qolip devorlariga nisbatan issiqlik chiqishi sekin.

T_b - Bu quyma sirtidagi harorat. Quyish paytida darhol oshadi, keyin barqarorlashadi. Bu sirt orqali issiqlik qolipga o'tishini bildiradi.

$T_1 = 0.004\text{m}$ - Bu qolip sirtidan 4 mm chuqurlikdagi nuqtaning harorati. Harorat tez oshadi, so'ngra sekin o'sishni davom ettiradi. Bu sathda suyuq metallning issiqligi to'g'ridan-to'g'ri ta'sir qiladi.

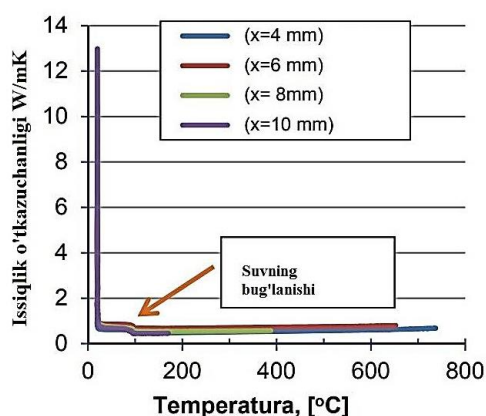
$T_2 = 0.006$ – Bu 6 mm chuqurlikdagi harorat. Isish nisbatan sekinroq kechadi. Bu issiqlik qolip materiali orqali tarqalayotganini ko'rsatadi.

$T_3 = 0.008\text{m}$ - Bu 8 mm chuqurlikdagi nuqtaning harorati. Isish yanada sekin, cho'qqi qiymat pastroq. Bu chuqurlikda issiqlik oqimi allaqachon so'nayotgan bosqichda.

$T_4 = 0.010\text{m}$ – Bu qolip ichkarisidagi 10 mm chuqurlikdagi nuqta. Harorat juda past, asta-sekin ko‘tariladi. Bu qolipning issiqlik o‘tkazuvchanligi past ekanini bildiradi.

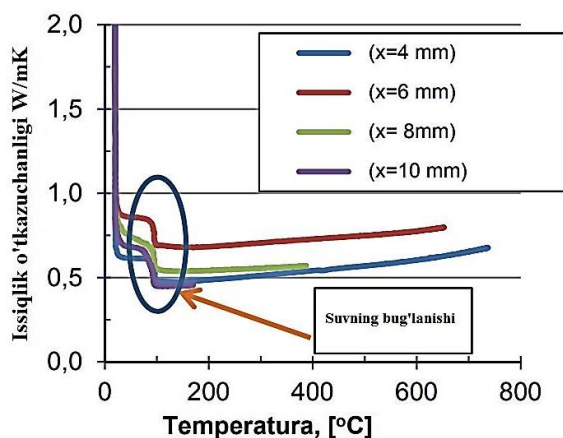
Umumiy tahlil: Dastlabki 10–20 soniyada issiqlik quyma sirtidan qolipga tez o‘tadi. 0.004 m va 0.006 m da haroratning o‘shishi kuchli, bu issiqlik tarqalish tezligini ko‘rsatadi. 0.010 m da esa harorat sekin o‘sadi — bu qolip materiali issiqlikni sekin o‘tkazishini bildiradi. Bu grafikdan ko‘rinadiki, quymaning markazida va sirtida issiqlik o‘zgarishi juda keskin, qolip ichkarisida esa issiqlik tarqalishi sekin kechadi, bu esa qum-gilli qoliplarning past issiqlik o‘tkazuvchanligidan dalolat beradi.

Sinovdan o‘tkazilgan qumning issiqlik o‘tkazuvchanligining haroratga bog‘liqligi 8-rasmda, va uning kattalashtirilgan ko‘rinishi 9-rasmda keltirilgan.



8-rasm. Quyma usuli tajribasida tekshirilgan qum namunasi uchun issiqlik o‘tkazuvchanlik va harorat o‘rtasidagi bog‘liqlik keltirilgan.

Issiqlik o‘tkazuvchanlik modda issiqlikni o‘tkazish qobiliyatini ifodalaydigan fizik kattalikdir. Birligi: $W/(m \cdot K)$. Bunda harorat farqi 1 K yoki 1 °C bo‘lgan holda, 1 m qalinlikdagi materialning har bir 1 m² yuzasidan 1 sekundda 50 J issiqlik o‘tadi. $W/m \cdot K$ 1 watt quvvatdagi issiqlik oqimi 1 metr masofa orqali, harorat farqi 1 kelvin bo‘lganda o‘tadigan miqdorni bildiradi.



9-rasm. Quyish usuli tajribasida o‘rganilgan qum uchun olingan issiqlik o‘tkazuvchanlik va harorat o‘rtasidagi bog‘liqlik.

Xuddi issiqlik diffuzivligi holatidagi kabi, issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti suv bug'lanish harorati atrofida keskin kamayadi. Namlikning qolip yuzasi qatlamlari orqali harakati issiqlik o'tkazuvchanlik qiymatini oshiradiro Buni $x=4$ mm va $x=6$ mm egri chiziqlarini solishtirganda ko'rishimiz mumkin. Keyinchalik issiqlik o'tkazuvchanlik qiymatlari barqarorlashadi, biroq 400–500 °C dan yuqori haroratlarda ular yana ortadi, bu esa donalararo issiqlik uzatilishini hisobiga sodir bo'ladi. Bunday issiqlik uzatilishi asosan qolipning yuza qatlamlarida kuzatiladi.

Shuningdek, qolipning turli qismlaridagi o'rtacha issiqlik o'tkazuvchanlik qiymatlari ham bir-biridan farq qiladi, bu holat 7-rasmda yaqqol ko'rsatilgan.

Kuzatilgan farqlar, jumladan, boshlang'ich namlik miqdori hamda eritilgan metallning quyilish harorati bilan bog'liq namlik harakat tezligiga ham bog'liq. Keltirilgan natijalarga asoslanib quyidagi xulosalarga kelish mumkin:

Quyma usuli qumning issiqlik-fizik xossalarining haroratga bog'liqligini aniq darajada aniqlashning imkonini beradi.

Quyma usuli haqiqiy sharoitlarda, ya'ni eritilgan metall bilan bevosita aloqada, metallning dastlabki sovish davrida gidrostatik bosim ostida, shuningdek nam qolipdagi suvning bug'lanishi holatida amalga oshiriladi.

Qumning o'rtacha issiqlik o'tkazuvchanligi qiymatlaridan sonli modellashtirish va hisoblashlarda foydalanish katta xatoliklarga olib kelishi mumkin. Qumning o'rtacha issiqlik o'tkazuvchanligi qiymatlaridan foydalanilganda qotish vaqti haqiqiy qiymatdan 10–40% gacha farq qilishi mumkin.

Shu sababli, matematik hisoblashlarda yuqori aniqlikka erishish uchun qumning issiqlik-fizik xossalarining haqiqiy haroratga bog'liqligi, ayniqsa issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti, matematik algoritmlarga kiritilishi zarur.

Yakuniy xulosa sifatida shuni aytish mumkinki, faqat ishlab chiqilgan quyma usuli sonli modellashtirish va hisoblashlarda talab etiladigan yuqori aniqlikdagi ma'lumotlarni olish imkonini beradi.

Ishlab chiqarish sharoitida murakkab amaliy tajribalar asosida olingan natijalarni matematik modelashtirish – regression model yordamida olish imkonini yaratamiz. 35XML markali po'latning yeyilishbardoshligiga uning tarkibidagi bor va xrom elementlari miqdorining ta'sirini matematik modellashtiramiz. Olinadigan yuqori aniqlikdagi matematik model tajriba tadqiqotlarini sezilarli darajada yengillashtirish imkonini beradi.

35XML po'lat tarkibiga kiritilgan bor (1 – 0,005 %, 2 – 0,0025 %, 3 – 0,004 %, 4 – 0,008 %, 5 – 0,010 %, 6 – 0,012 %) va xrom elementlarining qotishmaning yeyilishbardoshligiga ta'siri (Tajriba natijalari grafigi shu yerda joylashadi). 5.2 – rasmda keltirilgan sonli ko'rsatkichlarni matematik interpretatsiya qilish maqsadida, matematik modellashtirish asosida grafik ko'rinishidagi ma'lumotlardan funksiya ko'rinishidagi ko'phadlarni olish mumkin. Buning uchun 35XML po'lat tarkibiga kiritilgan bor va xrom elementlarining qotishmaning yeyilishbardoshligiga ta'sirini matematik modellashtirish masalasini ko'rib chiqamiz. Umumiy nazariyalarga ko'ra, ushbu masala Lagranj interpolyatsion

35XML markali po'latning yeyilishbardoshligiga uning tarkibidagi bor elementlari miqdorining ta'sirini matematik modellashtiramiz. Olinadigan yuqori aniqlikdagi matematik model tajriba tadqiqotlarini sezilarli darajada yengillashtirish imkonini beradi.

N ₂	Material nomi	Bor miqdori, %	Yeyilishbardoshligi (gr/soat)
0	35XML (Bazaviy)	0.0005	17.10
1	35XML	0.0025	11.04
2	35XML	0.0040	13.50
3	35XML	0.0080	14.46
4	35XML	0.0100	14.10
5	35XML	0.0120	11.70

4-Jadval. 35XML po'lat tarkibidagi bor miqdorining yeyilishbardoshlik ko'rsatkichlariga ta'siri

4-jadvalda keltirilgan sonli ko'rsatkichlarni matematik interpretatsiya qilish maqsadida, matematik modellashtirish asosida jadval ko'rinishidagi ma'lumotlardan funksiya ko'rinishidagi ko'phadlarni olish mumkin. Buning uchun 35XML po'lat tarkibiga kiritilgan bor elementlarining qotishmaning yeyilishbardoshligiga ta'sirini matematik modellashtirish masalasini ko'rib chiqamiz. Umumiy nazariyalarga ko'ra, ushbu masala Lagranj interpolyatsion ko'phadini hosil qilish bilan amalga oshiriladi. Chiziqli algebra nuqtai – nazariga ko'ra, chiziqli algebraik tenglamalar sistemasini yechish orqali maqsad funksiyasi hosil qilinadi.

Lagranj interpolyatsion ko'phadini $P(B)$ desak, $P(B_i)=Y_i$ tenglamalar sistemasini yechish lozim bo'ladi. Bu yerda B – Bor miqdori (%), Y – Yeyilishbardoshlik (gr/saat). Oshkor ko'rinishda bu tenglamalar sistemasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\begin{aligned}
 a_0 + a_1B_1 + a_2B_1^2 + a_3B_1^3 + a_4B_1^4 + a_5B_1^5 &= Y_1 \\
 a_0 + a_1B_2 + a_2B_2^2 + a_3B_2^3 + a_4B_2^4 + a_5B_2^5 &= Y_2 \\
 a_0 + a_1B_3 + a_2B_3^2 + a_3B_3^3 + a_4B_3^4 + a_5B_3^5 &= Y_3 \\
 a_0 + a_1B_4 + a_2B_4^2 + a_3B_4^3 + a_4B_4^4 + a_5B_4^5 &= Y_4 \\
 a_0 + a_1B_5 + a_2B_5^2 + a_3B_5^3 + a_4B_5^4 + a_5B_5^5 &= Y_5 \\
 a_0 + a_1B_6 + a_2B_6^2 + a_3B_6^3 + a_4B_6^4 + a_5B_6^5 &= Y_6
 \end{aligned}$$

Shuningdek, bu tenglamalar sistemasini $Ax=Y$ vektor tenglama ko'rinishida ham ifodalash mumkin. Endi ushbu tenglamalar sistemasi yordamida yuqorida jadvalda keltirilgan tajriba natijalari asosida olingan sonli qiymatlarni funksiya, ya'ni, maqsad funksiyasi ko'rinishiga keltiramiz. Tajriba tadqiqotlarida bor miqdorining 0.0005% dan 0.012% gacha bo'lgan oltita nuqtasi mavjud.

Ushbu koeffitsientlarning aniqlangan qiymatlariga ko'ra, bor elementining foiz ulushini ortib borishi bilan qotishmaning yeyilishbardoshligining o'zgarishini aniqlab beradigan maqsad funksiyasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$Y(B)=17.10-4440B+1.99167\times 106B^2-3.38\times 108B^3+2.66\times 1010B^4-7.7\times 10^{11}B^5$$

ifoda tarkibidagi B o'zgaruvchi qotishma tarkibidagi Bor (B) miqdorini (%) ifodalasa, Y(B) qotishmaning yeyilishbardoshligini (gr/soat) xarakterlaydi. Shunday qilib, (5.16) ifoda orqali 35XML po'lat tarkibidagi bor miqdori 0.0005% dan 0.012% gacha bo'lganda, bor miqdorining ortib borishi bilan hosil qilingan qotishmaning yeyilishbardoshligining o'zgarib borishi bir qiymatli aniqlanadi.

Ushbu model orqali nafaqat 5.2 – jadvalda keltirilgan hollar, bundan tashqari jadvalda keltirilmagan ixtiyoriy oraliq (masalan, 0.006%) uchun yeyilishbardoshlikning o'zgarishini bir qiymatli yuqori aniqlikda hisoblash imkoniga ega bo'lamiz. (5.16) ifodadagi funksiyaning ishonchliligi regression modeldagi maxsus mezonlar, masalan, R^2 (aniqlik koeffitsienti) bilan tekshirilganda, modelning aniqligi 100% ko'rsatkichiga ega ekanligi aniqlandi (chunki model 6 ta nuqta orqali aniq interpolyatsiya qiladi). Bu esa ishlab chiqilgan matematik model ishlab chiqarish sharoitida murakkab amaliy tajribani yetarlicha yengillashtirib, keyingi analog tajribalar natijalarini shu tajribalarni amalga oshirmasdan aniqlash imkonini beradi. Bu esa yuqori iqtisodiy samaradorlikni kafolatlaydi.

Matematik model tuzildi. $Y(B) = 17.10 - 4440.00B + 1.99\times 10^6 B^2 - 3.38\times 10^8 B^3 + 2.66\times 10^{10} B^4 - 7.77\times 10^{11} B^5$ formulasi orqali biz 0.0005% dan 0.012% gacha bo'lgan har qanday bor miqdori uchun yeyilishbardoshlikni aniq hisoblashimiz mumkin.

35XML po'latning yeyilishbardoshligi (gr/soat) uning tarkibidagi bor miqdori (%) ga bog'liqligini ifodalovchi beshinchi darajali ko'phad hosil qilindi. Model Lagranj interpolyatsiyasi asosida qurilib, 6 tajriba nuqtasi (0.0005% dan 0.012% gacha) bo'yicha aniq moslashtirilgan. $R^2 = 100\%$ – model berilgan nuqtalarda mukammal interpolyatsiya qiladi. Fisher mezonlari va boshqa statistik ko'rsatkichlar modelning ishonchliligi va aniqligini tasdiqlaydi.

Model yordamida 0.0005% dan 0.012% gacha bo'lgan istalgan bor miqdori uchun yeyilishbardoshlikni oldindan hisoblash mumkin. Bu sanoat tajribalarini qisqartirish, vaqt va resurslarni tejash imkonini beradi. Model yordamida eng yuqori yeyilishbardoshlik minimal yeyilish tezligi beradigan optimal bor konsentratsiyasini aniqlash mumkin. Tajribaviy ma'lumotlar asosida bu qiymat 0.0025% B atrofida ekanligi aniqlandi. Matematik model yordamida qimmatbaho va vaqt talab qiladigan amaliy tajribalarni qisqartirish orqali ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish mumkin. Model ishlab chiqarish jarayonini optimallashtirish va sifat nazoratini osonlashtirish imkoniyatini yaratadi.

XULOSA

“35XML markali po‘latni elektr-yoy pechida suyuqlantirishda qotishmaning yeyilishbardoshligini oshirishning ilmiy asoslarini yaratish” mavzusidagi texnika fanlari doktori (DSc) dissertatsiya bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar natijalari asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

35XMJI markali po‘latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritishning nazariy asoslari ishlab chiqilib, metall tarkibida bor atomlarining diffuziya va fazaviy taqsimlanish mexanizmlari ilmiy jihatdan asoslab berilgan;

bor elementining optimal miqdorini aniqlash orqali 35XMJI po‘lat tarkibini modifikatsiyalashning ilmiy asoslangan modeli ishlab chiqildi hamda borning mikrotuzilma shakllanishiga va yeyilishbardoshlikka ta’sir etish qonuniyatlari ochib berilgan;

elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni kamaytirishning termodinamik va kinetik qonuniyatlari aniqlanib, ularning metall sifatiga ta’sir etish mexanizmlari aniqlashtirilgan;

termodinamik muvozanat holatlari asosida 35XMJI po‘latni suyuqlantirish texnologiyasining nazariy modeli taklif etilib, bu model asosida suyuqlanish jarayonining optimal parametrlarini aniqlash imkoniyati yaratilgan;

quyma jarayonida suyuq metallning issiqlik almashinuvi va sovish tezligiga qum-gilli qolipning issiqlik o‘tkazuvchanligi va mexanik mustahkamligining ta’siri ilmiy asoslab berilib, quyma shakli va murakkablik darajasiga qarab qolip materialini tanlash nazariy mezonlari ishlab chiqilgan;

quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan issiqlik oqimini nazorat qilish, qizdirish va sovitish jarayonlarining termokinetik parametrlarini optimallashtirish orqali optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

35XML markali po‘latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida bor elementini suyuq metall tarkibiga kiritish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Bu ishlab chiqarish sharoitida borning kuyish miqdorini kamaytirish imkonini berdi;

35XML markali po‘latni bor elementining optimal miqdordagi modifikator bilan modifikasiyalangan tarkibi ishlab chiqilgan. Bu ishlab chiqarish sharoitida qotishmaning maydalangan donadorligini oshishi imkonini beradi;

quyma usulida olingan detalning sirtini yuqori chastotali tok bilan optimal qalinlikda ishlov berish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Bu ishlab chiqarish sharoitida qotishmadan olinadigan detal yuzasining yeyilishbardoshligini oshishini taminlab beradi;

35XML markali po‘latni elektr-yoy pechida suyuqlantirish jarayonida termodinamik qonuniyatga asoslanib suyuqlantirish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Bu ishlab chiqarish sharoitida suyuq metall tarkibidagi elementlarni hajm bo‘ylab tarqalishini yaxshilash imkonini beradi;

quymaning shakli va murakkablik darajasiga bog‘liq holda suyuq metallni quyib olishda foydalaniladigan qum – gilli qolipning issiqlik o‘tkazuvchanligi,

siqilishdagi mustahkamligidan kelib chiqib tanlangan. Bu texnologiya asosida ishlab chiqarish sharoitida quyma yuzasining qattiqligini oshirish imonini beradi;

35XML markali po'latni elektr yoy pechida suyuqlantirish jarayonida qotishma tarkibidagi zararli elementlarni to'rt bosqichli kamaytirish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Bu zararli elementlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/2025.27.12.T.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ТАШКЕНТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Зокиров Руслан Самадович

**Разработка научных основ повышения износостойкости сплава
при плавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи**

**05.02.01 – Материаловедение в машиностроении. Литейное производство.
Термическая обработка и обработка металлов давлением. Металлургия черных,
цветных и редких металлов.**

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК (DSc)**

Ташкент – 2026

Тема докторской диссертации (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан под номером B2025.4.DSc/T665

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу: (www.tdtu.uz) и информационно-образовательном портале Ziyonet по адресу: www.ziyonet.uz.

Научный консультант: **Тураходжаев Нодир Джахонгирович**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Зиямухамедова Умида Алиджановна,**
доктор технических наук, профессор

Худаяров Сулайман Рашидович,
доктор технических наук, доцент

Парманов Сарвар Ташпулатович,
доктор технических наук, доцент.

Ведущая организация: **Андижанский государственный технический институт**

Защита диссертации состоится 13 мая 2026 года в 10:00. на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.04. при Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университет, д.2. Тел./факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова (зарегистрирован за №. 258). (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университет, д.2. Тел./факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz).

Автореферат диссертации разослан 30 апреля 2026 года.
(Протокол реестра № 218 от 29 апреля 2026 года)

К.А. Каримов
Председатель Научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н, профессор

Ш.Б. Ташбулатов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению
учёных степеней, д.ф. по техническим наукам (PhD), доцент

Н.С. Дуняшин
Председатель научного семинара при научном совете по
присуждению учёных степеней, д.т.н, профессор

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мировом масштабе повышение износостойкости и улучшение механических свойств при производстве машиностроительных деталей из стали марки 35ХМЛ имеет особое значение. При этом одной из важных задач при производстве деталей из стали марки 35ХМЛ является обеспечение ресурсосбережения в процессе плавления сплава в электродуговой печи и применение энергосберегающих и эффективных режимов термической обработки продукции.

В этой области в научно-исследовательских центрах развитых стран, включая США, Великобританию, Германию, Нидерланды, Ирландию, Францию, Корею, Японию, Китай, Россию, Украину и другие государства, особое внимание уделяется совершенствованию технологий производства машиностроительных деталей из аналогов этой марки стали с целью обеспечения их механических свойств, повышения эксплуатационных характеристик продукции и износостойкости сплава.

В мировом масштабе ведутся широкомасштабные научные исследования по разработке технологии литья машиностроительных деталей из стали марки 35ХМЛ, обеспечивающей высокие механические свойства и износостойкость. В этом направлении, в частности, важное значение имеет совершенствование состава стали марки 35ХМЛ за счет введения новых элементов, а также разработка режимов термической обработки, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств и износостойкости получаемых деталей. Кроме того, при производстве машиностроительных деталей из стали марки 35ХМЛ необходимо разработать эффективные и ресурсосберегающие технологии, обеспечивающие увеличение срока службы изготавливаемых деталей.

В Узбекистане ведутся масштабные научные исследования, направленные на эффективное использование вторичных шихтовых материалов, а также на модифицирование железа и его сплавов при плавлении в электродуговых печах для получения износостойких и качественных литых изделий на основе ресурсосберегающих технологий. С точки зрения повышения износостойкости сплава при плавлении стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи, а также разработка технологий получения качественных литых изделий с использованием первичных и вторичных шихтовых материалов на предприятиях, наряду с внепечной обработкой жидкого металла для улучшения механических и литейных свойств, имеют важное научно-практическое значение. Постановление Президента Республики Узбекистан от 6 июля 2022 года № ПК–307 «О подтверждении стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022–2026 годы», а также постановление от 24 января 2022 года № ПК–99 «О мероприятиях по созданию эффективной системы развития производства и

расширения промышленной кооперации» постановление от 24 июня 2021 года № ПК-5159 «О дополнительных мерах по развитию горно-металлургической промышленности и связанных с ней отраслей» направлены на развитие металлургической и литейной промышленности Узбекистана, внедрение инновационных технологий и более эффективное использование ресурсов. В соответствии с задачами, определёнными в этих постановлениях, данное диссертационное исследование в определённой степени выполняет практическое и научное служение этим целям.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Настоящее исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан — раздел II: «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. В процессе разработки технологии плавки и термической обработки стали марки 35ХМЛ проводятся масштабные научные исследования, направленные на повышение литейных свойств сплава. Эти исследования осуществляются в сотрудничестве с ведущими мировыми научными центрами и высшими учебными заведениями. Комплексные исследования по совершенствованию технологии плавки и термической обработки стали марки 35ХМЛ, направленные на улучшение литейных свойств сплавов, выполняются при участии ведущих мировых научных центров и университетов, включая: School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing (Китай), Structural Metals Center, National Institute for Materials Science Nippon Steel and Sumikin Metal Products, Department of Architecture, Nishinippon Institute of Technology (Япония), Université Paris-Saclay (Франция), Rogante Engineering Office (Италия), Pohang University of Science and Technology (Южная Корея), Advanced Nano Technology (Ирландия), Paton Electric Welding Institute (Украина), Delft University of Technology (Нидерланды), Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay (Франция), G.V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine, NanoMedTech LLC (Украина), а также Massachusetts Institute of Technology (США) — ведущий центр по исследованиям в области инновационных материалов и технологий стали, Кембриджский университет (Великобритания) — признанный международный научный центр в области металлургии и материаловедения, проводящий исследования современных сплавов и трубных сталей, Утрехтский университет (Нидерланды) — центр исследований свойств материалов, Токийский университет (Япония) — лидер в области металлургии и энергоэффективности, RWTH Aachen University (Германия) — один из ведущих европейских вузов в сфере металлургии и переработки материалов, Stevenson University (США) — научное учреждение, участвующее в разработке технологий переработки материалов и сплавов.

Подобные исследования направлены на решение глобальных задач, разработку новых продуктов и технологий, а также на повышение

экономического развития и общего благосостояния общества. Каждое исследовательское учреждение применяет собственные методики и подходы для достижения поставленных целей. Совместные научные исследования с вышеуказанными центрами и университетами способствуют созданию инновационных подходов и технологий, направленных на улучшение литейных свойств стали марки 35ХМЛ и повышение эффективности её применения. В результате этих процессов обеспечивается повышение качества литой стали, энергоэффективности и рациональное использование ресурсов.

Во время высокотемпературной обработки стабильность структуры зависит от ряда факторов: температуры нагрева и выдержки, роста зерна, накопленной деформации, текстуры деформации, очистки стали от оксидов и растворения карбонитридных частиц. Устойчивость низколегированных сталей повышенной прочности к высокотемпературной обработке проявляется в сохранении их механических свойств при температурах до 650 °С. Однако сталь, изготовленная по термомеханически контролируемому процессу (S460M), теряет прочность при температурах выше 750 °С, в то время как нормализованная сталь (S355J2) сохраняет стабильность структуры.

Влияние микроструктурной модификации на стойкость против ударно-абразивного износа сталей марки 34CrMo4 также активно изучалось. Было установлено, что путём изменения микроструктуры можно повысить износостойкость этой стали. Такие методы, как термическая обработка, фазовые превращения, контроль распределения карбидов и поверхностная обработка, способствуют увеличению сопротивления усталости, растрескиванию и износу материала. Это, в свою очередь, повышает долговечность и надёжность хромомолибденовых сталей, работающих при высоких механических нагрузках.

Указанные исследования проводились учёными Diffraction Group Institut Laue-Langevin (Гренобль, Франция), Кафедрой металлургии и материаловедения Ближневосточного технического университета (Анкара, Турция) и Frakto Materials Technology Research and Development Co. (Анкара, Турция).

Степень изученности проблемы. В настоящее время в производственной промышленности при плавке стали марки 35ХМЛ ведутся научные исследования, направленные на создание технологий повышения литейных свойств сплава, а также на совершенствование процессов обработки как в печи, так и вне её. Существенный вклад в развитие данного направления внесли известные учёные, такие как Массимо Роганте (Италия), Тьерри Боден (Франция), Хён Соп Ким (Южная Корея), Марк Хитон (Ирландия), Анатолий Завдоев (Украина) и Валерий Позняков (Украина), которые в своих исследованиях изучали влияние термической обработки на микроструктуру и свойства высокопрочных сталей.

Китайские учёные Shuai Zhu, Xianfeng Zhen, Guangshun Wang, Chunyu Ma, Changfa Cao проводили исследования стали марки SCM435 (аналог стали

35ХМЛ в Южной Корее). Ими изучались начальная микроструктура стали, влияние закалки на микроструктуру и литейные свойства, а также возможность достижения значительного упрочняющего эффекта за счёт управления размером и количеством частиц цементита. На основе математического моделирования и анализа различий между промышленными процессами и лабораторными условиями были разработаны рекомендации по оптимизации режимов термической обработки для различных предприятий и видов оборудования.

Среди учёных стран СНГ значительный вклад в изучение структуры и свойств хромомолибденовых сталей внесли: Г.В. Курдюмов (Украина) — внёс большой вклад в исследование фазовых превращений в сталях и процессов термической обработки, разработал методы повышения работоспособности хромомолибденовых сплавов при высоких температурах; И.М. Буторов (Россия) — занимался исследованием ударной вязкости и долговечности хромомолибденовых сталей, а также методами повышения их устойчивости в условиях высокотемпературного производства; В.Н. Гриднев (Беларусь) — изучал термическую стабильность высокотемпературных хромомолибденовых сплавов и разрабатывал пути повышения их долговечности; М.Л. Скрябин (Россия) — проводил исследования по оптимизации состава сплавов и процесса плавки хромомолибденовых сталей, известен своими работами по использованию модификаторов для повышения качества стали; А.В. Второв и И.В. Дорофеев (Казахстан) — занимались оптимизацией химического состава и технологии обработки хромомолибденовых сталей, применяемых в энергетике и нефтегазовой промышленности.

В Узбекистане также сформировалась школа учёных, проводящих исследования в области металлургии, направленные на создание ресурсосберегающих технологий плавки сталей и производство сплавов с высокими литейными свойствами для машиностроения, работающего в условиях повышенных нагрузок. Среди них особое место занимают Н.Д. Тураходжаев, О.А. Мухамедов, Н.М. Саидмахаматов, У. Рахмонов, З. Бободустов, Р. Худайберганов. Эти специалисты внесли значительный вклад в разработку режимов плавки и термической обработки сталей, а также в усовершенствование технологий модифицирования сплавов.

На сегодняшний день проблема получения высококачественных литых изделий при плавке стальных сплавов, снижения выгорания легирующих элементов и минимизации их негативного влияния на свойства литой продукции остаётся нерешённой до конца. Существует необходимость совершенствования технологий удаления вредных элементов из жидкого металла для повышения износо- и коррозионной стойкости сплавов.

Связь темы научного исследования с планом научно-исследовательских работ высшего учебного или научного учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Узбекско-японского центра инноваций для молодежи при Ташкентском

государственном техническом университете имени Ислама Каримова, а также в рамках хоздоговорных тем, заключённых с АО «НГМК»:
договор №05/2023–МиМ от 6 июня 2023 года — «Разработка технологии плавки и термической обработки стали марки 35ХМЛ»;
договор №06/2023–МиМ от 6 июня 2023 года — «Производство литых изделий из хромомолибденовой стали в условиях Навоийского машиностроительного завода (НМЗ) для оборудования дробления руд».

Цель исследования. Заключается в разработке научных основ повышения износостойкости сплава марки 35ХМЛ, широко используемого на промышленных предприятиях нашей Республики, путем оптимизации параметров процесса плавки в электродуговой печи и модифицирования его химического состава.

Задачи исследования:

разработать технологию введения элемента бора в состав жидкого металла при плавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи;

определить оптимальный состав сплава 35ХМЛ, модифицированного борсодержащим элементом;

снизить содержание вредных элементов в составе сплава при плавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи;

Разработать технологию плавки стали марки 35ХМЛ на основе термодинамических закономерностей;

в зависимости от формы и сложности литой детали подобрать оптимальный песчано-глинистый формовочный материал с учётом его теплопроводности и прочности при сжатии;

разработать технологию поверхностной обработки деталей, полученных литьём, с использованием токов высокой частоты для достижения оптимальной толщины упрочнённого слоя.

Объект исследования. Объектом исследования является сталь марки 35ХМЛ, выплавляемая в цехе «Плавка цветных металлов» Навоийского машиностроительного завода (НМЗ) акционерного общества «НГМК», а также литые вечные заготовки, полученные из данного сплава.

Предмет исследования. Предмет исследования включает: оптимальное соотношение основных и легирующих элементов в составе стали; формирование микроструктуры под воздействием модификаторов и снижение количества дефектов; технологию плавки стали марки 35ХМЛ с применением ресурсосберегающих методов; способы удаления вредных примесей из жидкого металла; влияние различных режимов термической обработки на механические и структурные свойства стали марки 35ХМЛ; методы улучшения литейных свойств данной стали; совершенствование технологических процессов для получения высококачественных литых изделий.

Методы исследования. В ходе исследования для определения химического состава образцов использовался оптический эмиссионный спектрометр S9 Atlantis. Для анализа микроструктуры сплавов и

распределения элементов по объёму применялись металлографический микроскоп Nikon Eclipse MA200 и сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss Ultra Plus Field Emission. Твёрдость определялась с помощью прибора Hardness Tester ТВ 2109. Кроме того, при оценке физико-механических и эксплуатационных характеристик сплавов использовались методы, основанные на соответствующих государственных стандартах (ГОСТ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны теоретические основы введения элемента бора в состав жидкого металла при выплавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи, а также научно обоснованы механизмы диффузии и фазового распределения атомов бора в структуре металла;

разработана научно обоснованная модель модифицирования состава стали 35ХМЛ путем определения оптимального содержания бора, а также выявлены закономерности влияния бора на формирование микроструктуры и износостойкость;

установлены термодинамические и кинетические закономерности снижения содержания вредных элементов в составе сплава в процессе выплавки в электродуговой печи, а также уточнены механизмы их влияния на качество металла;

предложена теоретическая модель технологии выплавки стали 35ХМЛ на основе термодинамических равновесных состояний, позволяющая определять оптимальные параметры процесса плавления;

научно обосновано влияние теплопроводности и механической прочности песчано-глинистой формы на теплообмен и скорость охлаждения жидкого металла в процессе литья, а также разработаны теоретические критерии выбора материала формы в зависимости от конфигурации и степени сложности отливки;

разработана технология обработки поверхности детали, полученной методом литья, с оптимальной глубиной упрочненного слоя за счет оптимизации термокинетических параметров контроля теплового потока, нагрева и охлаждения при обработке токами высокой частоты.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана технология внедрения бора в состав жидкого металла при плавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи;

создан оптимизированный модифицированный состав стали 35ХМЛ с введением борсодержащего модификатора;

разработана технология поверхностной обработки деталей, полученных литьём, с применением высокочастотного нагрева, обеспечивающая формирование упрочнённого слоя оптимальной толщины;

разработана четырёхстадийная технология снижения содержания вредных элементов при плавке стали 35ХМЛ в электродуговой печи.

Достоверность результатов исследования. Результаты исследования подтверждены экспериментальными данными, полученными с

использованием современных приборов. Температура жидкого металла измерялась пирометром, выполнены металлографические и рентгеноструктурные анализы, определены состав элементов, показатели макро- и микротвёрдости. Измерены жидкотекучесть, линейная и объёмная усадка металла. Полученные результаты сопоставлены с известными экспериментальными данными и подвергнуты анализу. В ходе исследования были изготовлены экономически доступные и высококачественные литые изделия, внедрённые в промышленную практику, что является одним из важных достижений работы.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость определяется анализом исследований, выполненных ведущими учёными, и экспериментальными результатами, полученными в работе.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты обеспечивают улучшение литейных свойств стального сплава 35ХМЛ при его выплавке и обработке как в печи, так и вне печи, что способствует повышению срока службы литых изделий.

Внедрение результатов исследования. На основании полученных научных результатов, направленных на создание научных основ повышения износостойкости стали марки 35ХМЛ при выплавке в электродуговой печи:

технология введения элемента бора в жидкий металл при плавке стали 35ХМЛ внедрена на предприятии АО «НМЗ» при АО «НГМК» (Справка АО «НГМК» №02-07/02/10453 от 8 октября 2025 года). В результате содержание потерь бора при плавке уменьшилось на 17–19 %;

оптимальный состав стали 35ХМЛ, модифицированный борсодержащим элементом, внедрён на предприятии «АО «НМЗ» при АО «НГМК» (Справка АО «НГМК» №02-07/02/10453 от 8 октября 2025 года). В результате мелкозернистость сплава увеличилась на 10–15 %;

технология поверхностной обработки литых деталей с применением высокочастотных токов внедрена на предприятии АО «НМЗ» при АО «НГМК» (Справка АО «НГМК» №02-07/02/10453 от 8 октября 2025 года). В результате износостойкость поверхности деталей увеличилась на 20–25 %;

технология плавки стали 35ХМЛ, основанная на термодинамических закономерностях, внедрена на предприятии АО «НМЗ» при АО «НГМК» (Справка АО «НГМК» №02-07/02/10453 от 8 октября 2025 года). В результате равномерность распределения элементов по объёму улучшилась на 12–15 %;

методика выбора песчано-глинистой формы в зависимости от формы и сложности отливки внедрена на предприятии АО «НМЗ» при АО «НГМК» (Справка АО «НГМК» №02-07/02/10453 от 8 октября 2025 года). В результате твёрдость поверхности отливок увеличилась на 18–20 %.

Апробация результатов исследования. Результаты проведённых исследований были представлены в виде 9 докладов и прошли обсуждение на 9 международных научно-практических конференциях и симпозиумах, где получили положительную оценку специалистов в области металлургии и материаловедения.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано всего 28 научных работ, из них 19 статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. В том числе: 10 статей опубликованы в республиканских научных журналах; 9 статей в зарубежных изданиях с высоким импакт-фактором, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 200 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость проведения научных исследований, определены цель и задачи работы, объект и предмет исследования. Показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий Республики, раскрыта научная новизна и практические результаты работы, отражено научное и прикладное значение полученных данных, приведены сведения о внедрении результатов в производство, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Исследование влияния процессов плавления, термической обработки и оптимизации структуры стального сплава марки 35ХМЛ на получение качественных литых изделий»**, проведён анализ влияния неметаллических включений в стали на её механические свойства и долговечность деталей. Рассмотрено воздействие различных режимов термической обработки на механические характеристики и микроструктуру низколегированных сталей высокой прочности. Исследованы особенности начальной микроструктуры стали 35ХМЛ и влияние процесса отжига на структурные изменения, а также влияние субкритического отпуска на микроструктуру и механические свойства стали 35ХМЛ. На основе анализа экспериментальных и литературных данных определены научные подходы к получению качественных литых изделий с повышенной износостойкостью, что обеспечивает увеличение срока службы готовых деталей.

Показано, что снижение содержания вредных элементов и примесей, таких как фосфор и сера, способствует улучшению механических и физических свойств стали. Уменьшение содержания газов (кислорода и азота) играет важную роль в удалении пор из расплава. Для повышения текучести расплава в него вводятся легирующие элементы, такие как

кремний и марганец. Контроль температуры и давления в процессе литья является важным условием получения требуемого качества продукции. Для предотвращения образования трещин необходимо регулировать процесс охлаждения, что снижает внутренние напряжения. Применение оптимальных режимов термообработки позволяет повысить сопротивление деформации и усталости. Использование очищенного металлического расплава способствует увеличению срока службы литых изделий, а внедрение современных технологий литья обеспечивает точную геометрию и высокие механические характеристики деталей.

Установлено, что такие неметаллические включения, как SiO_2 (оксид кремния), Al_2O_3 (оксид алюминия) и MnS (сульфид марганца), оказывают влияние на предел выносливости, скорость распространения усталостных трещин, трещиностойкость, сопротивление образованию пор, прочность на растяжение и анизотропию этих свойств относительно продольного направления. В частности, включения MnS способствуют анизотропии, так как после горячей деформации они приобретают вытянутую форму. При предположении изотропности материала это создаёт потенциальную возможность локальных разрушений. Показано, что использование металлографических и фрактографических методов анализа позволяет точно определить направление распространения трещин и механизмы их зарождения.

Были исследованы аналоги стали 35ХМЛ с различной исходной микроструктурой, чтобы определить влияние отжига на структурные характеристики. Для изучения влияния термических режимов (закалки, отпусков и снятия остаточных напряжений) на изменение микроструктуры и свойств использовались математические модели и численные симуляции. Отдельное внимание уделено влиянию модифицирования стали 35ХМЛ на остаточные напряжения и структурные характеристики. Основные исследования были направлены на изучение распределения остаточных напряжений и особенностей микроструктуры при различных режимах поверхностной обработки. Установлено, что распределение остаточных напряжений увеличивается с глубиной, а при 5-минутной обработке максимальные сжимающие напряжения достигают -600 МПа на глубине 25 мкм. Микроструктурные изменения изучались с использованием современных электронно-микроскопических методов, при этом на поверхности наблюдалась наимельчайшая зернистость, а зона деформации характеризовалась формированием сверхмелкозернистой структуры.

Таким образом, первая глава диссертации раскрывает научные основы улучшения качества литых изделий из износостойкой стали марки 35ХМЛ, демонстрируя влияние неметаллических включений, термических режимов и микроструктурных преобразований на механические свойства и эксплуатационную надёжность продукции.

Во второй главе диссертации, «Разработка методов научных исследований и выбор объекта исследования», приведены сведения о выборе объекта исследования, раскрыты основные физические и химические

свойства используемых материалов, а также описано применение современных методов и оборудования (инфракрасный пирометр, оптический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп) при изучении физико-механических, химических и физико-химических свойств.

В качестве объектов исследования были выбраны сталь марки 35ХМЛ, выплавленная в условиях АО «НГМК», и получаемая из неё деталь типа венец. Основные методы исследования в диссертационной работе включают: выплавку стали в электродуговой печи, измерение температуры жидкого металла с использованием пирометра и термопары, а также механическую обработку образцов на установке «Struers Tegramin – 30» с целью получения качественных литых заготовок.

В ходе исследований для изучения химических, физико-химических и физико-механических свойств сплава применялись оптический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп, методы структурного анализа сплава и другие современные экспериментальные подходы. В условиях НМЗ в качестве вспомогательного оборудования использовались: установка для шлифовки поверхности образцов, а также 6-тонная электродуговая печь для плавки шихтовых материалов.

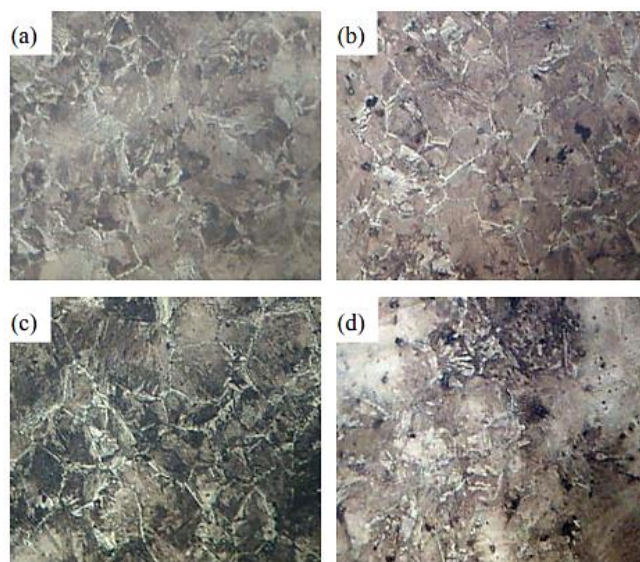
В третьей главе диссертации, озаглавленной **«Оптимизация технологии выплавки стальных сплавов марки 35ХМЛ»**, рассмотрены вопросы стабилизации состава литой стали и влияния бора на механические и структурные свойства сплава. Разработана технология введения легирующих элементов в состав жидкого металла при выплавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи. Условия и параметры плавки в дуговой сталеплавильной печи ДСП-6 контролировались на основе научных анализов. На предприятии АО «НГМК» в цехе «Плавка цветных металлов» проведены промышленные эксперименты по выплавке стали марки 35ХМЛ в печи ДСП-6. До начала плавки была разработана последовательность технологических операций, направленных на улучшение литейных свойств сплава и получение высококачественных, бездефектных литых изделий. Также была предложена технология окислительного переплава стали 35ХМЛ в основной электродуговой печи.

Влияние бора на литейные свойства стали и чугуна имеет существенное значение. Несмотря на то, что бор вводится в очень малых количествах (0,001–0,005 %), он существенно изменяет микроструктуру, физико-механические свойства и технологичность обработки сплава. Бор концентрируется на границах зерен, регулирует процесс кристаллизации, предотвращает укрупнение зерен и повышает жидкотекучесть. Это позволяет получать сложные и тонкостенные отливки без дефектов, снижать хладноломкость и повышать износостойкость. Однако избыточное количество бора приводит к образованию твердых и хрупких боридов, что снижает пластичность и ударную вязкость металла. Сталь марки 35ХМЛ применяется в областях, где требуются высокие механические характеристики. Как и другие среднеуглеродистые стали, она используется в различных отраслях машиностроения, особенно в автомобилестроении и при

изготовлении высоконагруженных деталей, где важны высокая прочность и однородность структуры.

Бор является элементом с малым атомным радиусом и обладает очень низкой растворимостью в α -железе ($< 0,003\% \text{ B}$). В составе стали атомы бора в основном располагаются на границах зерен или в составе карбидных фаз. В закаливаемых сталях основная функция бора — повышение прокаливаемости. Это явление связано с тем, что атомы бора, сегрегируя на границах аустенит-ферритного превращения, замедляют зарождение феррита, что приводит к снижению критической скорости охлаждения, формированию полностью мартенситной структуры и, как следствие, повышению твердости и прочности стали.

Бористые стали обладают экономическим преимуществом, так как позволяют сократить количество дорогостоящих легирующих элементов (таких как никель, хром, молибден), что способствует оптимизации затрат и повышению ресурсной эффективности. По сравнению со сталями без бора, борсодержащие сплавы характеризуются высокой стойкостью к пластической деформации (удлинению) и улучшенной обрабатываемостью при механической обработке (резании, фрезеровании, штамповке). Микроструктурный анализ отпущенных сталей (как показано на рисунке 1) показывает, что структура в основном состоит из мартенситной фазы. Присутствие бора в стали повышает её твердость, что объясняется увеличением доли мартенситной составляющей.



На рисунке 1 представлена микроструктура термически обработанной стали (температура термообработки — $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка — 30 мин) при увеличении $100\times$: (a) без добавления бора; (b) $0,00066\% \text{ B}$; (c) $0,0023\% \text{ B}$; (d) $0,0055\% \text{ B}$.

Изменение ударной вязкости в зависимости от содержания бора показано на рисунке. Как видно, при увеличении содержания бора до $0,0023\%$ его влияние на ударную вязкость стали становится весьма заметным, однако при дальнейшем повышении концентрации до $0,0055\%$ эффект

постепенно снижается. Это объясняется уменьшением эффективности действия бора при содержании выше 0,0030 %, а также недостаточным количеством титана в стали с содержанием 0,0055 % В.

Для оценки эффективности влияния бора были проанализированы показатели твердости всех полученных образцов стали. Измерения проводились по методу Виккерса, и были получены следующие результаты: для стали без добавления бора 352 HV, при содержании 0,00066%В 360 HV, при 0,0023 %В 372 HV, при 0,0055 % В 400 HV. Результаты показывают, что с увеличением содержания бора твердость стали возрастает, что объясняется тем, что бор замедляет диффузионные процессы на границах зерен, усиливая образование мартенситной фазы. Особенно выраженный эффект наблюдается в диапазоне 0,0023–0,0055 % В, где твердость увеличивается на 10–15 %. Однако при более высоком содержании бора (0,0055 % В) наряду с ростом твердости отмечается повышение хрупкости стали. Поэтому оптимальным считается содержание около 0,0023 % В, при котором обеспечивается рост прочности и твердости без существенного ухудшения пластичности.

В ходе исследований ферробор FeB_{17} добавлялся в расплав в пяти диапазонах гранулометрического состава: 1–5 мм, 5–15 мм, 20–30 мм, 30–40 мм, 40–50 мм и крупные гранулы ≥ 80 мм. Лучшие результаты показали гранулы 1–5 мм, которые признаны оптимальными: бор быстро растворяется, равномерно распределяется в жидком металле и обеспечивает высокий коэффициент усвоения. Гранулы 5–15 мм также показали близкие результаты и могут использоваться в промышленных условиях.

Более крупные фракции (20–50 мм и ≥ 80 мм) растворяются медленнее, что приводит к снижению эффективности усвоения и ухудшению равномерности распределения бора по объему микроструктуры. Очень мелкая фракция ($< 0,5$ мм, близкая к порошкообразной) показала неудовлетворительные технологические результаты: при резком увеличении твердости и прочности наблюдался значительный рост хрупкости. Кроме того, при использовании слишком мелких гранул возрастает риск выгорания бора и снижается его полезное усвоение. Технологическая рекомендация: при легировании ферробором FeB_{17} предпочтительно использовать гранулы размером 1–5 мм, допустимым альтернативным вариантом является диапазон 5–15 мм. Применение слишком мелких ($< 0,5$ мм) или чрезмерно крупных (≥ 80 мм) фракций следует ограничить или предварительно подвергать гранулометрическому сортированию.

Таблица 1. Введение ферробора FeB₁₇ различных фракций и степень его усвоения в отливке.

O'lcham	Qotishma tarkibida qolgan Bor miqdori (O'zlashtirishi) (%)	FB17 (kg) (0.002% B)	FB17 % qotishma tarkibidagi miqdor (0.002% B)	FB17 kg (0.003% B)	FB17 % qotishma tarkibidagi miqdor (0.003% B)
1-5 mm	80	0.718	0.001471%	1.076	0.002206%
20-30 mm	65	0.883	0.001810%	1.325	0.002715%
30-40 mm	55	1.044	0.002139%	1.566	0.003209%
40-50 mm	45	1.276	0.002614%	1.914	0.003922%
>80 mm	25	2.296	0.004706%	3.445	0.007059%

Таблица 2. Химический состав пяти образцов стали марки 35ХМЛ, полученных после модифицирования.

Eritma №	Material nomlanishi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B	Cu
5286	35ХМЛ (kovsh 1)	0.34	0.21	0.62	0.021	0.019	0,7	0.28	0.19	0,0022	0.25
5288	35ХМЛ (kovsh 1)	0.32	0.33	0.67	0.019	0.02	0.91	0.2	0.13	0,0027	0.19
5288	35ХМЛ (kovsh 2)	0.3	0.33	0.67	0.018	0.02	0.92	0.21	0.14	0,0032	0.19
5289	35ХМЛ (kovsh 1)	0.34	0.46	0.57	0.019	0.018	0.99	0.21	0.13	0,0039	0.18
5289	35ХМЛ (kovsh 2)	0.32	0.42	0.41	0.019	0.017	0.95	0.21	0.13	0,0070	0.18

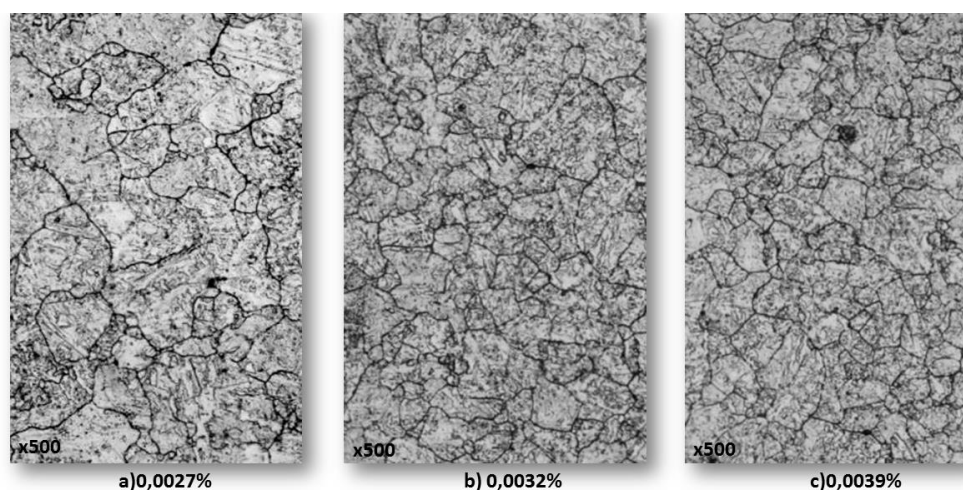


Рисунок 2. Влияние содержания бора на зернистость микроструктуры.

Бор является одним из микролегирующих элементов, оказывающих значительное влияние на процесс роста зерен в микроструктуре стали. На рисунке приведено сравнение микроструктуры образцов с содержанием бора 0,0027%, 0,0032% и 0,0039%. а) 0,0027% В — при относительно низком содержании бора зерна крупнее и имеют чётко выраженные границы. В этом случае количество бора недостаточно для образования карбидных или боридных фаз по границам зерен, что ограничивает торможение их роста, вследствие чего структура получается более крупнозернистой. б) 0,0032% В — при повышении содержания бора он концентрируется по границам зерен, замедляя их рост. Это приводит к измельчению структуры и формированию равномерных мелких зерен. Данное содержание считается

оптимальной концентрацией бора. в) 0,0039% В — при избыточном содержании бора он взаимодействует с другими элементами (Fe, Cr, C), образуя боридные фазы (Fe_2B , CrB, FeB). Эти соединения концентрируются по границам зерен, частично подавляя их рост, однако избыточная концентрация вызывает структурную неоднородность. Поэтому наблюдаются несколько более крупные зерна и участки с твёрдыми боридными включениями.

В третьей главе диссертации, посвящённой оптимизации технологии плавки износостойкого сплава стали марки 35ХМЛ в условиях НМЗ, научно обоснованы процессы совершенствования состава и структуры сплава. Проведённые исследования были направлены на повышение износостойкости стали за счёт улучшения её микроструктуры, химического состава и механических свойств. Полученные результаты подтверждены термодинамическими, металлографическими и механическими анализами. Установлено, что добавление бора в пределах 0,0023–0,0027% существенно улучшает механические свойства и износостойкость стали 35ХМЛ. Оптимальное содержание бора повышает микроструктурную стабильность, способствует измельчению и упрочнению зерен. При содержании 0,0025% В скорость абразивного износа снизилась на 35,4%, твёрдость увеличилась с 189 до 255 НВ (на 34,9%), предел прочности возрос на 17,4%, а ударная вязкость — также на 17,4%.

Разработана эффективная технология введения ферробора FeB_{17} в процессе плавки стали в электродуговой печи DSP-6. Оптимальным признано добавление ферробора с гранулометрией 1–5 мм после основной стадии раскисления. Введение под слоем шлака с продувкой аргоном позволило повысить степень усвоения бора до 70–95%. Предварительный подогрев ковша до 800–850 °С уменьшал тепловой удар металла на 40%, обеспечивая равномерную структуру и целостность отливки.

Расчёты по свободной энергии Гиббса системы Fe–Cr–C показали, что поддержание 95–98% хрома в металлической фазе достигается при правильном управлении термодинамическим равновесием. Оптимальная температура плавления составляет 1595–1620 °С, а температура разливки — 1550–1570 °С, что способствует формированию мелкозернистой, равномерной структуры и повышению износостойкости стали.

Путём регулирования основности шлака (соотношение CaO/MgO) и ограничения подачи кислорода потери хрома снижены до 2–5%, при этом усвоение элементов Cr, Mo, Ni достигло 98–100%. Модифицирование бором ограничивает образование боридных фаз Fe_2B и CrB, стабилизируя диффузионные процессы по границам зерен.

В результате проведённой оптимизации износостойкость стали 35ХМЛ увеличена на 35,4%, прочность и ударная вязкость — на 17,4% каждая. Это

обеспечило увеличение срока службы деталей экскаваторов, горнодобывающего и металлургического оборудования.

В целом, исследования, выполненные в третьей главе, создали научную основу для совершенствования технологии плавки, модифицирования и термодинамического управления производством износостойкой стали марки 35ХМЛ в условиях НМЗ. Такой подход минимизировал потери хрома, стабилизировал микроструктуру, улучшил механические свойства и существенно повысил износостойкость сплава.

В четвёртой главе диссертации, **«Разработка теоретических, научных основ и технологии повышения износостойкости сплава стали марки 35ХМЛ при плавке в электродуговой печи»**, изложены результаты научных исследований, направленных на разработку и обоснование технологических решений по повышению качества и эксплуатационных свойств стали 35ХМЛ.

В данной главе научно обоснована технология очистки жидкого сплава 35ХМЛ от неметаллических включений и вредных элементов в процессе плавки в электродуговой печи. Для удаления вредных примесей, особенно серы (S) и фосфора (P), разработана четырёхступенчатая технология рафинирования. На каждом этапе применялись реагенты CaO, CaSi, CaC₂, Mg, а также перемешивание аргоном и азотом. В результате содержание серы снижено с 0,06% до 0,011%, что обеспечило эффективность очищения около 80%.

Для предотвращения реакций, связанных с кислородом и азотом, процессы раскисления и денитрогенизации были оптимизированы. Микроанализ показал, что неметаллические включения в основном состоят из Al₂O₃ (~40%), SiO₂ (~14%), Cr₂O₃ (~20%) и других оксидов. Их общий объём в сплаве составил 0,28%, при этом на долю частиц размером менее 2 мкм приходится 0,079% — такие мелкие и овальные включения не оказывают существенного отрицательного влияния на усталостную прочность стали.

В главе также описана разработанная технология высокочастотной закалки зубьев венцовой детали после механической обработки. Для образцов, обработанных токами высокой частоты (ТВЧ) в течение от 1 до 15 минут, проведён анализ остаточных напряжений. Установлено, что при нагреве и быстром охлаждении нагревается только поверхностный слой зубьев (на глубину 2–4 мм), в результате чего достигается высокая твёрдость (50–60 HRC) и повышенная износостойкость. Время обработки одного зуба составило 4–5 минут, а всего венца (126 зубьев) — 8–9 часов. При увеличении времени ТВЧ-обработки с 1 до 5 минут остаточные напряжения возрастали до 600 МПа и достигали максимума на глубине 2–4 мм; при более длительной обработке прироста не наблюдалось. В поверхностном слое формировалась волокнистая мартенситная и нанозернистая структура, что способствовало росту твёрдости. В зоне до 100 мкм происходило интенсивное измельчение зёрен и повышение плотности

дислокаций, тогда как с увеличением глубины (20–80 мкм) наблюдалось укрупнение зёрен и переход структуры к основной матрице. Это обеспечило значительное повышение износостойкости, усталостной прочности и ударной вязкости.

Кроме того, на основе термодинамических закономерностей разработана технология плавки, направленная на снижение потерь легирующих элементов. С использованием модели, построенной по свободной энергии Гиббса (ΔG), определено равновесие между окислением хрома (Cr) и углерода (C). В результате применения предложенной технологии потери хрома снижены до 65%.

Поскольку сера и фосфор являются вредными элементами, оказывающими негативное влияние на пластичность, ударную вязкость, коррозионную стойкость и износостойкость стали, их содержание должно быть строго ограничено. В процессе вторичной металлургической очистки рафинирование от серы проводилось на основе реакции металл-шлак, что обеспечило дополнительный эффект — высокий уровень раскисления и, следовательно, максимальную чистоту стали.

На рисунке представлена стратегия десульфурации для сталей марки 35ХМЛ. Общий процесс очистки от серы распределяется между несколькими стадиями производства жидкой стали: десульфурация расплава; обработка кислородом; вторичные металлургические процессы; стадия разливки. В рамках настоящего исследования очистка сплава 35ХМЛ от вредных элементов в электродуговой печи осуществлялась в четыре этапа, что позволило достичь высокой степени рафинирования и создать предпосылки для формирования однородной, плотной и износостойкой структуры сплава.

Сталь марки 35ХМЛ относится к среднеуглеродистым и низколегированным сталям. Она используется в условиях высоких нагрузок, где требуются повышенная прочность, твёрдость и износостойкость. Такие свойства стали определяются её основными механическими характеристиками: высокой износостойкостью, ударной вязкостью, низкой склонностью к хрупкому разрушению и хорошей коррозионной стойкостью. Для повышения эксплуатационной эффективности изделий из стали 35ХМЛ широко применяются методы поверхностного упрочнения, в частности — термообработка контактных поверхностей, предназначенная для повышения твёрдости и защиты материала от агрессивных сред. Одним из наиболее эффективных методов является обработка токами высокой частоты (ТВЧ), применяемая, например, для закалки зубьев венцовых колёс.

При ТВЧ-обработке глубина воздействия составляет несколько миллиметров, и именно поэтому данный метод использовался как один из основных этапов исследования при упрочнении венцовой детали, отлитой из стали 35ХМЛ. После механической обработки зубья венца подвергались ТВЧ-нагреву.

ТВЧ (ток высокой частоты) — это процесс индукционной поверхностной закалки, при котором поверхность металла быстро

нагревается за счёт токов высокой частоты, а затем охлаждается (водой, маслом или воздухом). Термин «ТВЧ» происходит из русской научной литературы, а в международной практике используется термин Induction Hardening. При этом нагревается только поверхностный слой металла толщиной 2–10 мм, тогда как внутренняя часть сохраняет исходную прочность и вязкость. Процесс ТВЧ проводится на индукционных установках, которые включают: Индукционный генератор, работающий в диапазоне 1000 Гц – 500 кГц, создаёт ток высокой частоты; Индуктор — медная спираль, покрытая керамической изоляцией, при прохождении тока создаёт электромагнитное поле, индуцируя токи в детали; Система охлаждения — подача воды, масла или эмульсии для быстрого охлаждения нагретой поверхности; Автоматизированный блок управления — регулирует параметры: время, ток, частоту и скорость охлаждения.

Примером применения является венец массой 4880 кг, используемый в конструкциях кранов, экскаваторов и металлургического оборудования. ТВЧ-обработка проводится только на зубьях, где требуется высокая твёрдость на глубину 2–4 мм. Каждый зуб нагревается индуктором в течение 4–5 минут, охлаждение выполняется распылением жидкости. Общая продолжительность обработки 126 зубьев составляет 8–9 часов. После ТВЧ-твёрдости поверхностного слоя достигают 50–60 HRC, что значительно повышает ударную и износную стойкость деталей. С научной точки зрения, при индукционном нагреве токовая плотность в поверхностных слоях возрастает, и по закону Джоуля–Ленца выделяется тепло. При быстром охлаждении формируется мартенситная структура, обеспечивающая рост твёрдости. Толщина упрочнённого слоя зависит от частоты тока: при 1000–5000 Гц — нагрев на глубину 5–10 мм, при 10–500 кГц — на глубину 1–4 мм. Для венцовой детали оптимальной является глубина 2–4 мм, что соответствует средней частоте 10–50 кГц. В результате наружный слой упрочняется, а внутренняя часть сохраняет пластичность. Это приводит к росту износостойкости, усталостной прочности и ударной вязкости. Закалка проводится только на рабочих поверхностях зубьев, что делает процесс экономичным по времени и расходу материала. Для венца массой 4880 кг ТВЧ-обработка признана наиболее эффективным методом продления срока службы зубчатых передач, работающих под большими нагрузками. Исследования показали, что после ТВЧ-обработки ресурс работы венцов увеличивается в 1,8–2,2 раза. После ТВЧ в поверхностном слое наблюдается повышение твёрдости и изменение микроструктуры, что способствует улучшению усталостной прочности и трибологических характеристик материала. Поэтому важным этапом стало исследование микроструктурной эволюции от поверхности до основной матрицы.

Для измерения остаточных напряжений по глубине проводилось последовательное электрохимическое шлифование слоя толщиной до 400 мкм от поверхности. Для очистки поверхности применялся раствор, содержащий 10% хлорной кислоты и 90% уксусной кислоты. В исследовании использовалась сталь 35ХМЛ со следующим химическим

составом (в мас.%): 0,30–0,37 С; 0,9–1,2 Cr; 0,15–0,3 Мо; 0,6–0,9 Мн; $\leq 0,4$ Si; $\leq 0,035$ S; $\leq 0,025$ P; Fe — остальное. Перед ТВЧ поверхность шлифовалась наждачной бумагой до 2000 зернистости. ТВЧ-процесс проводился при различных временах выдержки: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10 и 15 минут. Установлено, что остаточные напряжения увеличиваются при увеличении времени ТВЧ от 1 до 5 минут, достигая 600 МПа на глубине 2–4 мм. Дальнейшее увеличение времени (до 15 мин) не даёт заметного эффекта — напряжения стабилизируются. Эти результаты подтверждают, что оптимальное время ТВЧ составляет 4–5 минут, обеспечивая максимальное упрочнение без чрезмерного внутреннего напряжения.

Поэтому в стали марки 35ХМЛ остаточные напряжения после 5-минутной ТВЧ-обработки считаются насыщенными, и дальнейшая, более интенсивная обработка нецелесообразна, так как не приводит к дополнительному эффекту упрочнения.

На рисунке представлена микроструктура матрицы стали 35ХМЛ: слева — изображение в оптическом микроскопе, справа — в растровом электронном микроскопе (SEM), где отчётливо видны границы зёрен. Средний размер зёрен составляет до 30 мкм. В образце наблюдается типичная структура отпущенного мартенсита с равномерным распределением ферритных зёрен. Игольчатый мартенсит представляет собой особую микроструктуру, возникающую при закалке стали (быстром охлаждении), когда в аустенитных зёрнах формируются тонкие, удлинённые пластинки или волокна мартенсита. Эти волокна располагаются параллельно или полупараллельно друг другу, образуя характерные пучки игл.

В процессе ТВЧ-обработки наблюдалось увеличение распределения и глубины проникновения остаточных напряжений. После 5 минут ТВЧ у образца зафиксировано насыщенное состояние остаточных напряжений. Максимальное значение сжимающих напряжений составило 600 МПа и наблюдалось на глубине около 25 мкм. Наличие остаточных напряжений в материале способствует повышению его усталостной прочности, износостойкости, а также ударной вязкости, что в целом улучшает эксплуатационные характеристики стали 35ХМЛ.



Рисунок 3. Процесс ТВЧ-закалки зубьев после механической обработки в условиях НМЗ.

Эволюция микроструктуры была проанализирована с использованием различных технологий электронной микроскопии. В поверхностном слое наблюдались наноразмерные зёрна, при этом дробление и измельчение зёрен наиболее отчётливо проявлялось в среднем слое. Полученные результаты показывают, что применение ТВЧ-обработки к стали 35ХМЛ способствует упрочнению её механических свойств, повышению твёрдости и износостойкости за счёт измельчения зёрен, а также позволяет контролировать фазовые превращения в структуре материала.

Равновесная растворимость элементов хрома (Cr) и углерода (C) в жидком металле для производимой на НМЗ износостойкой стали марки 35ХМЛ была рассчитана на основе значений свободной энергии Гиббса (ΔG°). Анализ проводился с использованием табличных данных свободной энергии Гиббса. В расчётах, помимо ΔG° , учитывалась также энергия растворения элементов (ΔG_{dis}) в жидком железе, то есть изменение энергии при переходе элемента из твёрдого состояния в растворённое состояние в жидком железе. Оценка проводилась относительно стандартного состояния (%). Результаты анализа показали, что по мере увеличения суммарной свободной энергии Гиббса, равновесная растворимость хрома в жидком железе снижается. Иными словами, с ростом термодинамической устойчивости системы активная концентрация хрома в расплаве уменьшается.

Например, при температуре 1590 °С и содержании углерода 0,8 %, равновесная концентрация хрома составляет 22,35 % Cr, тогда как в других источниках для аналогичных условий приводится значение 16,85 % Cr. В последующих расчётах использовались значения энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS), взятые из базы данных программы HSC Chemistry 8.1. На основе этих данных была построена кривая равновесия, показавшая хорошее совпадение с экспериментальными результатами. Согласно данным HSC 8.1, при 1600 °С и содержании углерода 0,81 %, равновесная концентрация хрома составляет 19,61 % Cr. Эти результаты характеризуют состояние равновесия и термохимическую стабильность системы Fe–Cr–C–O для производимой на НМЗ износостойкой стали марки 35ХМЛ.

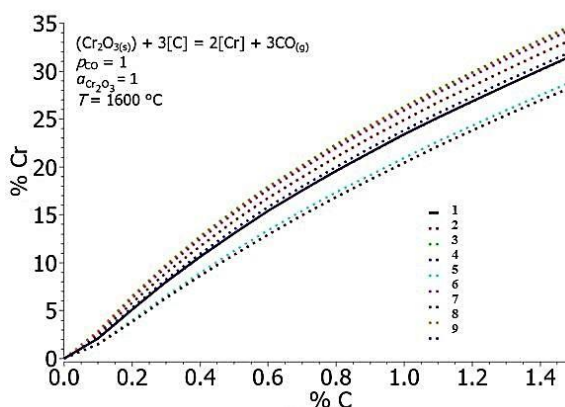


Рисунок 4. Равновесная растворимость Cr и C в жидкой стали с учётом различных значений свободной энергии Гиббса.

Рисунок 4 показывает кривые равновесной концентрации углерода и хрома при температуре 1600 °С, построенные на основе данных о свободной энергии Гиббса из базы HSC 8.1 и различных параметров взаимного взаимодействия элементов. В рамках четвёртой главы диссертации были получены научно обоснованные результаты, направленные на совершенствование структурных, механических и эксплуатационных свойств износостойкой стали марки 35ХМЛ, производимой в условиях НМЗ, путём комплексного анализа процессов металлургической очистки, термической обработки и поверхностного упрочнения.

Была разработана и внедрена четырёхступенчатая технология металлургической очистки. На каждой стадии применялись реагенты CaO, CaSi, CaC₂ и Mg, а также технология барботажа аргоном/азотом. В результате содержание серы (S) в стали было снижено с 0,06 % до 0,011 %, то есть примерно на 80 %. Этот процесс также способствовал снижению содержания фосфора (P) и других вредных примесей, что привело к повышению износостойкости стали. Процессы деоксидирования и денитрогенизации были оптимизированы, что позволило предотвратить вредные реакции с участием кислорода и азота. В результате микроструктура стали стабилизировалась, а её механические свойства улучшились. Анализ неметаллических включений показал, что они в основном состоят из Al₂O₃ (~40 %), SiO₂ (~14 %), Cr₂O₃ (~20 %) и других оксидных фаз. Их общий объём составил 0,28 %, при этом частицы размером менее 2 мкм (0,079 %) составляли наибольшую долю. Установлено, что мелкие овальные включения не оказывают значительного отрицательного влияния на усталостную прочность стали. После термической обработки образцы, отпущенные при 200 °С, показали максимальные значения твёрдости (409 HV) и временного сопротивления разрыву (1335 МПа). При повышении температуры отпуска до 600 °С твёрдость снизилась до 258 HV, а прочность — до 836 МПа. Это связано с переходом мартенситной структуры в отпущенную феррито-перлитную фазу.

Результаты поверхностного упрочнения ТВЧ показали, что при нагреве зубьев венца на глубину 2–4 мм и последующем быстром охлаждении достигается твёрдость 50–60 HRC. При этом остаточные напряжения увеличиваются до 600 МПа, а в поверхностном слое формируются волокнистый мартенсит и нанозернистая структура. Это обеспечивает существенное повышение износостойкости, ударной вязкости и усталостной прочности. Экспериментально установлено, что срок службы зубьев венца увеличивается в 1,8–2,2 раза. На основе термодинамического моделирования с использованием свободной энергии Гиббса (ΔG) было определено равновесие окисления между Cr и C. Модель показала, что при температурах выше 1650 °С и содержании 0,5–2 % Si потери хрома минимальны. Управляя отношением CaO/MgO и снижая парциальное давление CO, можно обеспечить преимущественное окисление углерода и снизить потери хрома до 65 %.

В целом, результаты, полученные в четвёртой главе, создали надёжную научную основу для совершенствования технологии производства износостойкой стали марки 35ХМЛ. Комплексное сочетание четырёхступенчатой очистки, поверхностного упрочнения ТВЧ и термодинамического управления позволило стабилизировать микроструктуру, улучшить механические свойства и повысить износостойкость стали в 2 раза.

Данный научный подход обеспечивает создание энергоэффективной, стабильной и инновационной технологической модели производства высококачественной износостойкой стали 35ХМЛ в промышленных условиях.

В пятой главе диссертации, под названием **«Математическое моделирование и симуляция процессов повышения механических и литейных свойств стали марки 35ХМЛ, выплавляемой в электродуговой печи»**, представлены результаты теоретических и вычислительных исследований, направленных на оптимизацию параметров кристаллизации и упрочнения сплава. В рамках этой главы были: рассчитаны изменения энтропии в системе при охлаждении и затвердевании сплава; на основе данных о тепловом эффекте и энтропийных характеристиках вычислено изменение энергии Гиббса (ΔG); определено влияние теплопроводности и механической прочности песчано-глинистой формы на процесс теплообмена и скорость охлаждения жидкого металла при литье стали 35ХМЛ; разработана математическая модель оптимизации изменения износостойкости сплава 35ХМЛ в зависимости от условий охлаждения и структуры закалки.

Экспериментальные исследования выполнялись в условиях НМЗ — в цехе плавки цветных металлов, центральной заводской лаборатории и лаборатории кафедры технологии металлов. Во время экспериментов пластины из стали 35ХМЛ отливались в песчано-глинистые формы. В процессе эксперимента фиксировались температурное поле формы и кривая охлаждения затвердевающего слитка. В диссертации подробная схема эксперимента представлена на рисунке 1, а рисунок 2 демонстрирует форму с установленными термопарами, измеряющими температуру в различных точках. На рисунке 3 показано распределение температуры в исследуемой системе.



Рисунок 5. Опытная литейная форма перед заливкой. Видны термопары (датчики температуры), установленные в полости формы и в теле формы.

В связи с наличием в составе стали 35ХМЛ хрома и молибдена её теплопроводность ниже, чем у меди, однако механические свойства значительно выше. Температура кристаллизации составляет примерно 1480–1500 °С. Теплопроводность песчано-глинистой формы находится в пределах 0,9–1,2 Вт/(м•К), что обеспечивает более медленное охлаждение стали. Время затвердевания составляет около 240 с, изменяясь в зависимости от формы и объёма отливки. Зависимость температуропроводности исследуемого формовочного песка от температуры показывает, что коэффициент температуропроводности резко изменяется в области около 100 °С, что связано с процессом испарения влаги. Коэффициент теплопроводности изменяется в диапазоне от 1,4 до 0,7 Вт/(м•К). Это явление наблюдается на стадии начального нагрева формы затвердевающим расплавом. В этот период происходит испарение влаги и перемещение пара от поверхности формы к её внутренним слоям. После этого значение теплопроводности стабилизируется и постепенно линейно снижается до 0,5–0,7 Вт/(м•К).

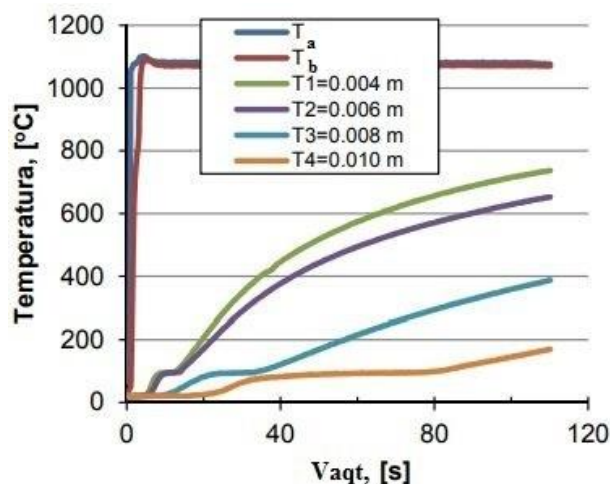


Рисунок 6. Температурное поле в исследуемой системе «отливка–форма».

На данном графике показано изменение температуры во времени в системе «отливка–форма». Из графика ясно прослеживаются процессы теплового потока и распространения температуры. Каждая линия на графике отражает изменение температуры в определённой точке:

T_a — температура в центральной части отливки. В начале она быстро повышается (выше 1000 °С), затем остаётся почти постоянной. Это указывает на то, что металл в центре отливки остаётся в жидком состоянии и остывает медленно, так как отвод тепла к стенкам формы происходит постепенно.

T_b — температура поверхности отливки. Во время заливки она резко возрастает, затем стабилизируется, что свидетельствует о передаче тепла от поверхности отливки к форме.

$T_1 = 0,004$ м — температура на глубине 4 мм от поверхности формы. Наблюдается быстрое повышение температуры, затем — более медленный рост. Это объясняется непосредственным воздействием тепла жидкого металла.

$T_2 = 0,006$ м — температура на глубине 6 мм. Рост температуры происходит медленнее, что указывает на постепенное распространение тепла через материал формы.

$T_3 = 0,008$ м — температура на глубине 8 мм. Повышение температуры ещё более замедленное, а максимальные значения ниже. Это зона, где тепловой поток уже ослабевает.

$T_4 = 0,010$ м — температура на глубине 10 мм внутри формы. Температура низкая и повышается очень медленно, что указывает на низкую теплопроводность формовочного материала.

Общий анализ: в первые 10–20 с тепло интенсивно передаётся от поверхности отливки к форме. На глубинах 0,004 м и 0,006 м наблюдается быстрый рост температуры, что отражает высокую скорость теплопередачи. На глубине 0,010 м рост температуры замедляется — форма проводит тепло медленно.

Так же, как и в случае с тепловой диффузией, коэффициент теплопроводности резко снижается в области температур, соответствующих испарению влаги. Движение влаги через поверхностные слои формы приводит к увеличению значения теплопроводности. Это можно наблюдать при сравнении кривых для $x = 4$ мм и $x = 6$ мм. В дальнейшем значения теплопроводности стабилизируются, однако при температурах выше 400–500 °С они вновь начинают расти, что связано с усилением теплопередачи по границам зёрен. Подобная теплопередача преимущественно наблюдается в поверхностных слоях формы. Наблюдаемые различия связаны, в том числе, с начальным содержанием влаги и скоростью её перемещения, зависящей от температуры заливаемого расплавленного металла.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы: Метод литья позволяет с высокой точностью определить температурную зависимость теплофизических свойств песка. Метод литья отражает реальные условия процесса — непосредственный контакт расплавленного металла с формой в начальной стадии охлаждения под действием гидростатического давления, а также процесс испарения влаги в влажной форме. Использование усреднённых значений теплопроводности песка при численном моделировании и расчётах может привести к значительным погрешностям. При этом время затвердевания может отличаться от реального на 10–40%. Таким образом, для достижения высокой точности математических расчётов необходимо учитывать реальную температурную зависимость теплофизических свойств песка, в частности

Для содержания бора 0,004% при хrome = 1%. Согласно экспериментальным данным, решая систему уравнений методом Жордана–Гаусса, получаем:

$$Y(B) = k_6 + k_7B + k_8B^2.$$

Для содержания бора 0,008% при хrome = 1%. Согласно экспериментальным данным, решая систему уравнений методом Жордана–Гаусса, имеем: $Y(B) = k_9 + k_{10}B + k_{11}B^2$.

Для содержания бора 0,010% при хrome = 1%. Согласно экспериментальным данным, решая систему уравнений методом Гаусса–Барейса, целевая функция имеет вид: $Y(B) = k_{12} + k_{13}B + k_{14}B^2$.

Надёжность данных функциональных выражений проверялась с использованием специальных критериев регрессионного анализа, в частности критерия Фишера, который подтвердил высокую точность модели. Таким образом, разработанная математическая модель позволяет значительно упростить проведение сложных производственных экспериментов, а также прогнозировать результаты аналогичных опытов без необходимости их фактического выполнения. Это, в свою очередь, обеспечивает высокую экономическую эффективность.

Таблица 3. Влияние содержания бора в стали 35XML на показатели износостойкости

№	Material nomi	Bor miqdori, %	Yeyilishbardoshligi (gr/soat)
0	35XML (Bazaviy)	0.0005	17.10
1	35XML	0.0025	11.04
2	35XML	0.0040	13.50
3	35XML	0.0080	14.46
4	35XML	0.0100	14.10
5	35XML	0.0120	11.70

Для математической интерпретации числовых данных, представленных в таблице 3, на основе методов математического моделирования можно преобразовать табличные данные в функциональную форму, то есть получить многочлены в виде функций. Рассмотрим задачу математического моделирования влияния содержания бора, введённого в сталь марки 35XML, на износостойкость сплава. Согласно общим теориям, данная задача решается путём построения интерполяционного многочлена Лагранжа. С точки зрения линейной алгебры, целевая функция определяется путём решения системы линейных алгебраических уравнений.

$$\begin{aligned} a_0 + a_1B_1 + a_2B_1^2 + a_3B_1^3 + a_4B_1^4 + a_5B_1^5 &= Y_1 \\ a_0 + a_1B_2 + a_2B_2^2 + a_3B_2^3 + a_4B_2^4 + a_5B_2^5 &= Y_2 \\ a_0 + a_1B_3 + a_2B_3^2 + a_3B_3^3 + a_4B_3^4 + a_5B_3^5 &= Y_3 \\ a_0 + a_1B_4 + a_2B_4^2 + a_3B_4^3 + a_4B_4^4 + a_5B_4^5 &= Y_4 \\ a_0 + a_1B_5 + a_2B_5^2 + a_3B_5^3 + a_4B_5^4 + a_5B_5^5 &= Y_5 \\ a_0 + a_1B_6 + a_2B_6^2 + a_3B_6^3 + a_4B_6^4 + a_5B_6^5 &= Y_6 \end{aligned}$$

Была построена математическая модель зависимости износостойкости стали 35ХМЛ от содержания бора. По формуле

$$Y(B) = 17.10 - 4440.00B + 1.99 \times 10^6 B^2 - 3.38 \times 10^8 B^3 + 2.66 \times 10^{10} B^4 - 7.77 \times 10^{11} B^5$$

можно с высокой точностью рассчитать износостойкость для любого содержания бора в диапазоне от 0.0005% до 0.012%.

Построенный пятой степени полиномиальный многочлен выражает зависимость износостойкости (г/ч) от содержания бора (%) в стали 35ХМЛ. Модель основана на интерполяции Лагранжа и точно согласована с шестью экспериментальными точками в указанном диапазоне. Коэффициент детерминации $R^2 = 100\%$, что свидетельствует о полной интерполяции экспериментальных данных. Проверка по критерию Фишера и другим статистическим показателям подтверждает высокую достоверность и точность модели.

С помощью данной модели можно заранее определить износостойкость для любого значения содержания бора от 0.0005% до 0.012%, что позволяет значительно сократить объём промышленных экспериментов, а также экономить время и ресурсы. Модель даёт возможность определить оптимальную концентрацию бора, при которой достигается максимальная износостойкость (минимальная скорость износа). На основе экспериментальных данных установлено, что это значение составляет около 0.0025% В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по теме диссертации доктора технических наук (DSc) «Разработка научных основ повышения износостойкости сплава при плавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи» представлены следующие выводы:

Разработаны теоретические основы введения элемента бора в состав жидкого металла при выплавке стали марки 35ХМЛ в электродуговой печи, а также научно обоснованы механизмы диффузии и фазового распределения атомов бора в структуре металла;

разработана научно обоснованная модель модифицирования состава стали 35ХМЛ путём определения оптимального содержания бора, а также выявлены закономерности влияния бора на формирование микроструктуры и износостойкость;

установлены термодинамические и кинетические закономерности снижения содержания вредных элементов в составе сплава в процессе выплавки в электродуговой печи, а также уточнены механизмы их влияния на качество металла;

предложена теоретическая модель технологии выплавки стали 35ХМЛ на основе термодинамических равновесных состояний, позволяющая определять оптимальные параметры процесса плавления;

научно обосновано влияние теплопроводности и механической прочности песчано-глинистой формы на теплообмен и скорость охлаждения жидкого металла в процессе литья, а также разработаны теоретические критерии выбора материала формы в зависимости от конфигурации и степени сложности отливки;

разработана технология обработки поверхности литой детали токами высокой частоты с обеспечением оптимальной толщины упрочнённого слоя путём оптимизации термокинетических параметров теплового потока, нагрева и охлаждения;

разработана технология введения бора в состав жидкого металла при выплавке стали 35ХМЛ в электродуговой печи, что позволило снизить степень угара бора в производственных условиях;

разработан модифицированный состав стали 35ХМЛ с оптимальным содержанием бора, обеспечивающий повышение степени измельчения зерна сплава в производственных условиях;

разработана технология обработки поверхности литой детали токами высокой частоты с оптимальной толщиной упрочнённого слоя, обеспечивающая повышение износостойкости поверхности детали в производственных условиях;

разработана технология выплавки стали 35ХМЛ на основе термодинамических закономерностей процесса плавления, обеспечивающая более равномерное распределение элементов в объёме жидкого металла в производственных условиях;

определены параметры выбора песчано-глинистых форм в зависимости от формы и сложности отливки с учётом теплопроводности и прочности при сжатии, что обеспечивает повышение твёрдости поверхности отливки в производственных условиях;

разработана четырёх стадийная технология снижения содержания вредных элементов в составе сплава при выплавке стали 35ХМЛ в электродуговой печи, обеспечивающая эффективное уменьшение концентрации вредных примесей.

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY SCIENTIFIC COUNCIL
DSc.03/2025.27.12.T.02.04 ON THE AWARDING OF SCIENTIFIC
DEGREES**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ZOKIROV RUSLAN SAMADOVICH

**DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC FOUNDATIONS FOR
IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF THE ALLOY DURING THE
MELTING OF 35XML STEEL IN AN ELECTRIC ARC FURNACE**

05.02.01 – Materials science in mechanical engineering. Foundry. Heat treatment and processing of metals under pressure. Metallurgy of ferrous, non – ferrous and rare metals.

**DISSERTATION ABSTRACT
OF DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES (DSc)**

Tashkent – 2026

The title of the dissertation of Doctor of Science (DSc) has been registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan with registration number B2025.4.DSc/T665.

The dissertation has been carried out at the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is available on the website at (www.tdtu.uz) and on the website of «ZiyoNET» information-educational portal www.ziyo.net.

Scientific supervisors:

Turakhodjaev Nodir Djakhongirovich
doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Ziyamukhamedova Umida Alijonovna,
Doctor of Technical Sciences, Professor,

Khudayarov Sulayman Rashidovich,
Doctor of Technical Sciences, assistant professor,

Parmanov Sarvar Tashpulatovich,
Doctor of Technical Sciences, assistant professor.

Leading organization:

Andijan State Technical Institute

The defense of the dissertation will take place on May 13, 2026, at 10:00 a.m. at the meeting of Scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.04 at Tashkent State technical university named after Islam Karimov (Address: 100095, Tashkent, University street, 2 Tel./fax: (99871) 227-10-32, E-mail: [e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqotchi@tdtu.uz)).

The dissertation can be reviewed at the Informational Resource Center of the Tashkent State technical university named after Islam Karimov, (is registered under № (100095, Tashkent, University street, 2 Tel./fax: (99871) 227-10-32, E-mail: [e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqotchi@tdtu.uz)).

The dissertation abstract was distributed on April 30, 2026.
(Registry Protocol № 218 dated April 29, 2026).

K.A. Karimov

Chairman of the Academic Council, which awards degrees,
doctor of technical sciences, professor

Sh.B. Tashbulatov

Academic Secretary of the Academic Council, which awards degrees,
doctor of philosophy (PhD) in technical sciences, assistant professor

N.S. Dunyashin

Scientific under the Academic Council, which awards academic degrees
chairman of the seminar, doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION [abstract of the dissertation of Doctor of Science(DSc)]

Relevance and necessity of the dissertation topic. Currently, there is a growing demand for ferrous metals and their alloys, which is particularly important for the industrial and construction sectors. The process of melting steels in electric arc furnaces is one of the essential stages, ensuring control over high wear resistance, quality, and production efficiency. During the melting process, methods are applied to improve the physicochemical properties of the metal, increase its wear resistance, and enhance its operational performance. The processes of melting 35XML grade steel in an electric arc furnace, including in-furnace and out-of-furnace treatments, as well as determining the temperature and other parameters during casting, are of significant importance for producing high-quality products.

At metallurgical and foundry enterprises worldwide, scientific research is currently being conducted aimed at producing high-quality cast products from iron and its alloys through the remelting of secondary charge materials, which ensures resource efficiency and high product quality. From this perspective, increasing the wear resistance of the alloy during the melting of 35XML grade steel in an electric arc furnace, as well as improving the sequence of charge loading and treating the molten metal with modifiers to increase the number of crystallization centers and obtain a fine-grained structure, is of particular importance for producing high-quality cast products.

In Uzbekistan, large-scale scientific research is being conducted aimed at the efficient use of secondary charge materials, as well as the modification of iron and its alloys during melting in electric arc furnaces to produce wear-resistant and high-quality cast products based on resource-saving technologies. This process has strategic and economic significance for the state, and within its framework, measures aimed at achieving specific results are being implemented step by step. The “New Uzbekistan” Development Strategy outlines key tasks such as elevating industry to a qualitatively new level, deeply processing local raw materials, and accelerating the production of finished products. From this perspective, increasing the wear resistance of the alloy during the melting of 35XML grade steel in an electric arc furnace, as well as developing technologies for producing high-quality cast products using primary and secondary charge materials at the enterprises of JSC “NGMK” and JSC “UzMetkombinat,” along with out-of-furnace treatment of molten metal to improve its mechanical and casting properties, holds significant scientific and practical importance.

Presidential Decrees of the Republic of Uzbekistan: No. PQ-307 of July 6, 2022, “On the Approval of the Strategy for Innovative Development of the Republic of Uzbekistan for 2022–2026”; No. PQ-99 of January 24, 2022, “On Measures to Create an Effective System for Industrial Development and Expand Industrial Cooperation in the Republic”; No. PQ-5159 of June 24, 2021, “On Additional Measures for the Development of the Mining and Metallurgical Industry and Related Sectors” These decrees aim to develop Uzbekistan’s metallurgical and foundry industry, implement innovative technologies, and increase resource-use efficiency. In accordance with the objectives outlined in these decrees, this dissertation research contributes to achieving strategic goals.

Compliance of the research with the priority directions of science and technology development in the Republic. This research is conducted in line with the priority directions of science and technology development in Uzbekistan — Section II: “Energy, energy- and resource-saving.”

Review of foreign scientific research on the dissertation topic. During the development of the melting and heat treatment technology for 35XML steel, extensive scientific research is being conducted to improve the alloy’s casting properties. These studies are carried out in collaboration with leading global scientific centers and universities. Comprehensive research on improving the melting and heat treatment of 35XML steel to enhance casting properties is carried out with the participation of leading world scientific centers and universities, including: School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing (China) Structural Metals Center, National Institute for Materials Science Nippon Steel and Sumikin Metal Products, Department of Architecture, Nishinippon Institute of Technology (Japan) Université Paris-Saclay (France) Rogante Engineering Office (Italy) Pohang University of Science and Technology (South Korea) Advanced Nano Technology (Ireland) Paton Electric Welding Institute (Ukraine) Delft University of Technology (Netherlands) Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay (France) G.V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine NanoMedTech LLC (Ukraine) Massachusetts Institute of Technology (USA) — a leading center for research in innovative materials and steel technologies University of Cambridge (UK) — internationally recognized center in metallurgy and materials science, conducting research on modern alloys and pipe steels Utrecht University (Netherlands) — center for material property research University of Tokyo (Japan) — leader in metallurgy and energy efficiency RWTH Aachen University (Germany) — leading European university in metallurgy and material processing Stevenson University (USA) — scientific institution involved in developing material and alloy processing technologies

Such research aims to address global challenges, develop new products and technologies, and enhance economic development and societal well-being. Each institution applies its own methodologies and approaches to achieve these goals. Collaborative research with the above centers and universities contributes to the creation of innovative approaches and technologies aimed at improving the casting properties of 35XML steel and increasing its application efficiency. These processes ensure improved cast steel quality, energy efficiency, and rational use of resources.

Worldwide, the influence of heat treatment on the microstructure and properties of high-strength low-alloy steels is actively studied. It has been shown that compared to normalization, thermomechanically controlled processes provide higher strength characteristics but reduce stability during subsequent high-temperature processing. Mechanical properties of both steels remain stable up to 650 °C. At higher temperatures, the properties of thermomechanically controlled steel deteriorate significantly, whereas normalized steel remains stable up to 950 °C.

During high-temperature processing, structural stability depends on several factors: heating and holding temperature, grain growth, accumulated deformation, deformation texture, steel cleanliness from oxides, and dissolution of carbonitride particles. High-strength low-alloy steels exhibit resistance to high-temperature processing by maintaining their mechanical properties up to 650 °C. However, thermomechanically processed steel (S460M) loses strength above 750 °C, while normalized steel (S355J2) retains structural stability. This is due to the greater tendency of the former to grain growth from the dissolution of carbonitrides that restrict growth, as well as deformation texture characteristics. Therefore, despite high strength, the use of such steels above 650 °C is not recommended.

These studies were conducted by scientists at Université Paris-Saclay (France), Rogante Engineering Office (Italy), Pohang University of Science and Technology (South Korea), Advanced Nano Technology (Ireland), Paton Electric Welding Institute (Ukraine), Delft University of Technology (Netherlands), G.V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine, NanoMedTech LLC (Ukraine), and other organizations.

The effect of microstructural modification on the resistance to impact-abrasive wear of 34CrMo4 steels has also been actively studied. It was found that altering the microstructure can increase the wear resistance of this steel. Methods such as heat treatment, phase transformations, carbide distribution control, and surface treatment help improve resistance to fatigue, cracking, and material wear. This, in turn, increases the durability and reliability of chromium-molybdenum steels operating under high mechanical loads.

These studies were conducted by researchers at the Diffraction Group, Institut Laue-Langevin (Grenoble, France), the Department of Metallurgy and Materials Engineering, Middle East Technical University (Ankara, Turkey), and Frakto Materials Technology Research and Development Co. (Ankara, Turkey).

Degree of Study of the Problem Currently, in the industrial production of 35XML steel, scientific research is being conducted aimed at developing technologies to improve the casting properties of the alloy, as well as enhancing both in-furnace and out-of-furnace processing methods. Significant contributions to this field have been made by renowned scientists such as Massimo Rogante (Italy), Thierry Boden (France), Hyun-Sop Kim (South Korea), Mark Highton (Ireland), Anatoliy Zavdoveev (Ukraine), and Valeriy Poznyakov (Ukraine), who studied the influence of heat treatment on the microstructure and properties of high-strength steels.

Among scientists from the CIS countries, notable contributions to the study of the structure and properties of chromium-molybdenum steels were made by: G.V. Kurdyumov (Ukraine) — made significant contributions to the study of phase transformations in steels and heat treatment processes, developing methods to enhance the performance of chromium-molybdenum alloys at high temperatures; I.M. Butorov (Russia) — studied impact toughness and durability of chromium-molybdenum steels, as well as methods to improve their resistance under high-temperature production conditions; V.N. Gridnev (Belarus) — investigated the thermal stability of high-temperature chromium-molybdenum alloys and developed

ways to enhance their durability; M.L. Skryabin (Russia) — conducted research on optimizing alloy composition and the steel melting process, known for work on using modifiers to improve steel quality; A.V. Vtorov and I.V. Dorofeev (Kazakhstan) — worked on optimizing the chemical composition and processing technology of chromium-molybdenum steels used in the energy and oil-and-gas industries.

In Uzbekistan, a school of researchers has also emerged, focused on metallurgy, creating resource-saving steel melting technologies, and producing alloys with high casting properties for engineering applications under increased loads. Among them, N.D. Turakhodjaev, O.A. Mukhamedov, N.M. Saidmakhamatov, U. Rakhmonov, Z. Bobodustov, and R. Khudayberganov have made significant contributions to developing steel melting and heat treatment regimes and improving alloy modification technologies.

To date, the problem of producing high-quality castings during steel alloy melting, reducing the burnout of alloying elements, and minimizing their negative effects on the properties of cast products remains unresolved. There is a need to improve technologies for removing harmful elements from molten metal to enhance the wear and corrosion resistance of alloys.

Relation of the research topic to the research plan of the higher educational or scientific institution where the dissertation was conducted.

The dissertation research was carried out in accordance with the research plan of the Uzbek-Japanese Youth Innovation Center at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, as well as within the framework of contractual topics concluded with JSC "NGMK": Contract No. 05/2023–MiM dated June 6, 2023 — “Development of technology for melting and heat treatment of 35XML steel”; Contract No. 06/2023–MiM dated June 6, 2023 — “Production of castings from chromium-molybdenum steel at the Navoi Machine-Building Plant (NMZ) for ore crushing equipment.”

Research Objective: The purpose of this research is to develop the scientific foundations for improving the wear resistance of the 35XML steel alloy, which is widely used in industrial enterprises of our Republic, by optimizing the melting process parameters in an electric arc furnace and modifying its chemical composition.

Research Tasks:

To develop a technology for introducing boron into the molten metal during the melting of 35XML steel in an electric arc furnace;

To determine the optimal composition of the 35XML alloy modified with a boron-containing element;

To reduce the content of harmful elements in the alloy composition during the melting of 35XML steel in an electric arc furnace;

To develop a technology for melting 35XML steel based on thermodynamic principles;

Depending on the shape and complexity of the cast part, to select the optimal sand-clay molding material considering its thermal conductivity and compressive strength;

To develop a surface treatment technology for cast parts using high-frequency currents in order to achieve the optimal thickness of the hardened layer.

Object of Research: The object of the research is 35XML steel melted in the “Nonferrous Metals Melting” shop of the Navoi Machine-Building Plant (NMZ) of the Navoi Mining and Metallurgical Combine (NMMC), as well as cast ring blanks obtained from this alloy.

Subject of Research: The subject of the research includes: the optimal ratio of base and alloying elements in the steel composition; microstructure formation under the influence of modifiers and reduction of defects; the technology of melting 35XML steel using resource-saving methods; methods for removing harmful impurities from molten metal; the influence of various heat treatment regimes on the mechanical and structural properties of 35XML steel; methods for improving the casting properties of this steel; and the improvement of technological processes to obtain high-quality cast products.

Research Methods: During the research, the chemical composition of the samples was determined using an S9 Atlantis optical emission spectrometer. For analyzing the microstructure of the alloys and the distribution of elements in the volume, a Nikon Eclipse MA200 metallographic microscope and a Carl Zeiss Ultra Plus Field Emission Scanning Electron Microscope were used. Hardness was determined using a Hardness Tester TB 2109 device. In addition, methods based on the relevant state standards (GOST) were used to evaluate the physical, mechanical, and operational characteristics of the alloys.

Scientific Novelty of the Research:

Theoretical foundations for the introduction of boron into molten metal during the melting of 35XML steel in an electric arc furnace have been developed, and the mechanisms of diffusion and phase distribution of boron atoms in the metallic matrix have been scientifically substantiated.

Based on the determination of the optimal boron content, a scientifically grounded model for modifying the composition of 35XML steel has been created, revealing the regularities of boron’s influence on microstructure formation and the improvement of the alloy’s wear resistance.

The thermodynamic and kinetic regularities governing the reduction of harmful elements during electric arc furnace melting have been determined, and the mechanisms of their influence on metal quality have been clarified.

A theoretical model of the 35XML steel melting process based on thermodynamic equilibrium states has been proposed, enabling the determination of optimal melting process parameters.

The influence of heat transfer and the cooling rate of molten metal on mold properties during casting has been scientifically substantiated, and theoretical criteria for selecting molding materials depending on the shape and complexity of the casting have been developed.

A technology for surface treatment of castings using high-frequency heating has been developed, based on the optimization of the thermokinetic parameters of

heating and cooling, ensuring controlled heat flow and the formation of an optimal hardened layer thickness.

Practical Results of the Research:

Developed technology for introducing boron into molten metal during 35XML steel melting in an electric arc furnace.

Developed optimal 35XML steel composition modified with an optimal amount of boron-containing modifier.

Developed technology to reduce harmful elements in the alloy during 35XML steel melting.

Developed 35XML steel melting technology based on thermodynamic principles.

Selected sand-clay molding materials according to the shape and complexity of the casting based on thermal conductivity and compressive strength.

Developed surface treatment technology for cast parts using high-frequency currents to ensure optimal hardened layer thickness.

Reliability of Research Results: The research results are supported by experimental data obtained using modern equipment. Molten metal temperature was measured with a pyrometer, metallographic and X-ray structural analyses were performed, element composition, macro- and microhardness values were determined. Measurements of fluidity, linear and volumetric shrinkage of metal were conducted. The obtained results were compared with known experimental data and analyzed.

During the research, economically feasible and high-quality castings were produced and implemented in industrial practice, representing one of the major achievements of the work.

Scientific and Practical Significance The scientific significance lies in the analysis of studies conducted by leading scientists and experimental results obtained in this work. The research explored the possibilities of improving casting properties of steel alloys through both in-furnace and out-of-furnace treatment, reducing gases and non-metallic inclusions in molten metal. Specifically, the study developed:

A technology for introducing boron into molten metal during 35XML steel melting in an electric arc furnace;

The composition of 35XML steel modified with an optimal amount of boron-containing modifier;

Recommendations aimed at increasing production efficiency.

The practical significance lies in the fact that the results improve the casting properties of 35XML steel during melting and treatment, both in-furnace and out-of-furnace, ultimately enhancing the quality of cast products.

Implementation of Research Results: Based on the scientific results aimed at creating foundations for improving wear resistance of 35XML steel during melting in an electric arc furnace:

The technology for introducing boron into molten metal was implemented at JSC “NGMK,” NMZ branch (№ 02-07/02/10453 from 2025/10/08). Boron loss during melting decreased by 17–19%.

The optimal composition of 35XML steel modified with boron-containing element was implemented at JSC “NGMK,” NMZ branch (№ 02-07/02/10453 from 2025/10/08). Alloy fine-grain structure increased by 10–15%.

Surface treatment technology using high-frequency currents was implemented at JSC “NGMK,” NMZ branch (№ 02-07/02/10453 from 2025/10/08). Increasing surface wear resistance of parts by 20–25%.

35XML steel melting technology based on thermodynamic principles was implemented at JSC “NGMK,” NMZ branch (№ 02-07/02/10453 from 2025/10/08). Improving uniformity of element distribution by 12–15%.

Optimization of sand-clay mold selection based on casting shape and complexity was implemented at JSC “NGMK,” NMZ branch (№ 02-07/02/10453 from 2025/10/08). Increasing surface hardness of castings by 18–20%.

Testing of Research Results: The research results were presented and discussed at 11 scientific-practical conferences and symposia, including international events.

Publications on the Dissertation Topic: A total of 28 scientific works were published on the dissertation topic, including: 19 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing key scientific results of doctoral dissertations, 10 articles in national journals, 9 articles in foreign journals with high impact factors, 3 articles in journals indexed in the Scopus database.

Structure and Volume of the Dissertation: The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 200 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (I часть; part I)

1.R.Zokirov N. Saidmakhamadov, K. Abdullaev, B. Karimov, A. Bektemirov. Improvement of low–alloyed steel liquefaction technology. Namangan muhandislik-texnologiya instituti: Ilmiy-texnika jurnali, Том 7 Maxsus son 2/2022, ISSN 2181-8622. 510-514 b. (05.00.00).

2. R.Zokirov V. Bekchanova, N. Turakhodjaev, N. Saidmakhamadov, Sh. Toshmatova, N. Zufarova. Development of technology of liquefaction of steel alloys in electric furnaces. Spanish Journal of Innovation and Integrity, Volume 08, July 2022, ISSN 2792-8268, Page 65-69 (05.00.00).

3. N. Saidmakhamadov, Zokirov. R., B. Abdullayev, N. Zufarova. Technology to increase the hardness and resistance of high–chromium white cast iron. European Multidisciplinary Journal of Modern Science, Volume 6 Page 655-669 (05.00.00).

4. R.Zokirov J. Khasanov, N. Saidmakhamadov, A. Ibragimov, N. Zufarova Kulrang cho‘yan qotishmasini quymakorlik usulida suyuqlantirib olish texnologiyasini ishlab chiqish. Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali: Scientific and Technical Journal Machine Building, №2, 2022, ISSN 2181-1539. 92-98 b. (05.00.00).

5. S. Tursunbayev, R.Zokirov, N. Turakhodjaev, Sh. Saidxodjayeva. Litiy ftor birikmasini AK7 markali alyuminiydan shlak ajralib chiqishiga bog‘liqligi. Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali: Scientific and Technical Journal Machine Building, №2, 2022, ISSN 2181-1539. 124-129 b. (05.00.00).

6. R.Zokirov S. Tursunbayev, N. Turakhodjaev, Sh. Hudoykulov, Sh. Turakhodjaeva. Alyuminiy qotishmasini litiy ftor birikmasi bilan legirlashda uning o‘quvchanlik xossasiga ta’siri. Kompozitsion Materiallar: Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal, №3/2022 114-119 b. (05.00.00 №16).

7.R.Zokirov Sh. Tashbulatov, N. Turakhodjaev, Sh. Turakhodjaeva, N. Tadjiyev. Технология извлечения меди из медных шлаков. Kompozitsion Materiallar: Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal, №3/2022. 148-155 b. (05.00.00).

8.R.Zokirov J. Khasanov, F. Zokirov Yupqa devorli quyma mahsulotlarini qum–gilli qolipda olish texnologiyasini takomillashtirish. Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali, O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi, Andijon Mashinasozlik instituti, 6b., 33% . 98-106 b. (05.00.00).

9. R.Zokirov., S. Tursunbayev, N. Turakhodjaev, Sh. Saidxodjayeva, Sh. Mardanokulov. The effect of lithium fluoride compound on slag decomposition in the process of casting aluminum prepared details. Asian Journal of Multidimensional Research, Vol. 11, Issue 7, July 2022, ISSN 2278-4853, DOI: 10.5958/2278-4853.2022.00175.6 . page 5. (05.00.00).

10. R.Zokirov N. Saidmakhamadov, N. Turakhodjaev, K. Abdullaev, Sh. Saidxodjayeva. Study of the effect of copper addition on secondary carbides with high chromium wear-resistant white cast iron. International Journal of Innovative Analyses and Emerging Technology, Volume 2, Issue 6, e-ISSN: 2792-4025 page 37-43. (05.00.00).

11. R.Zokirov N. Saidmakhamadov, N. Turakhodjaev, J. Khasanov, Sh. Hudoykulov. Improvement of the technology of obtaining high-chromium wear-resistant white cast iron. Spanish Journal of Innovation and Integrity, Volume 07, 2022 . page 498-504 (05.00.00).

12. R.Zokirov S. Tursunbayev, N. Turakhodjaev, Sh. Mardanokulov, F. Odilov. The effect of lithium on the mechanical properties of alloys in the Al-Li system. E3S Web of Conferences, 390, 05046 (2023), AGRITECH-VIII 2023, DOI: [10.1051/e3sconf/202339005046](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005046) page 5. (05.00.00).

13. R.Zokirov, Sh. Tashbulatov, N. Turakhodjaev, Sh. Turakhodjaeva, N. Tadjiyev. Технология извлечения меди из медных шлаков. Композитсион Materiallar: Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal, №3/2022 (05.00.00 №16).

14. R.Zokirov, J. Khasanov, F. Zokirov Yupqa devorli quyma mahsulotlarini qum-gilli qolipda olish texnologiyasini takomillashtirish. Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali, O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi, Andijon Mashinasozlik instituti, 6b., 33% 27-32 b. (05.00.00).

15. S.A. Tursunbayev, N.D. Turakhodjaev, Sh. Hudoykulov, Sh. Turakhodjaeva. Alyuminiy qotishmasini litiy ftor birikmasi bilan legirlashda uning o'quvchanlik xossasiga ta'siri. Kompozitsion Materiallar: Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal, №3/2022, 3b., 20% (05.00.00 №16).

II бўлим (II часть; part II)

16. N.D. Turakhodjaev, Zokirov R.S> Sh.M. Chorshanbiyev Po'latdan yuqori mustahkamlik xususiyatlariga ega qismlarni aniqlash uchun optimal modifikatorlarni tanlash. III International Scientific-Technical Conference: Problems and Prospects of Innovative Technique and Technology in Agri-Food Chain, Proceedings of the Conference, 3b., 33% .05.00.00).

17. N.D. Turakhodjaev, Sh.M. Chorshanbiyev R.S.Zoirov, Yuqori marganesli po'latdan ishlab chiqarilgan qismlarning yeyilishbardoshligini oshirish. III International Scientific-Technical Conference: Problems and Prospects of Innovative Technique and Technology in Agri-Food Chain, Proceedings of the Conference, 5b., 33% 216-225 b. (05.00.00).

18. R.S.Zokirov N.D. Turakhodjaev, Sh.M. Chorshanbiyev, A.M. Qurbanov 110Г13Л markali po'latni modifikatsiyalab yuqori mustahkamlikka ega qismlar olish. International Scientific and Scientific-Technical Conference on "Resource and Energy-Saving Innovative Technologies in the Field of Foundry", May 18-19, 2023, Tashkent, 5b, 25% 228-235 b.

19. R.Zokirov, S. Tursunbayev, N. Turakhodjaev, Sh. Hudoykulov, F. Zokirov. Changes in its wear resistance when alloying aluminum alloys with lithium. Texas Journal of Engineering and Technology, ISSN 2770-4491, 5b., 20% 127-133 page.

20. R.Zokirov, S. Tursunbayev, N. Turakhodjaev, F. Odilov, Sh. Mardanokulov. Change in wear resistance of alloy when alloying aluminium alloy with germanium oxide. E3S Web of Conferences, 401, 05001 (2023), CONMECHYDRO-2023, DOI: [10.1051/e3sconf/202340105001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105001) 46-53 page.

21. R.Zokirov, N. Saidmakhamadov, N. Turakhodjaev, S. Tursunbaev, N. Tadjiyev, K. Abdullaev, V. Hamroev, U. Rakhmanov, J. Juraev Improving the design of the lining of the ball mill used to improve the quality of grinding. E3S Web of Conferences, 525, 02017 (2024), GEOTECH-2024, DOI: [10.1051/e3sconf/202452502017](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452502017) 83-89 p.

22. R.Zokirov, N. Saidmakhamadov, V.B. Bekchanova, N.X. Tadjiyev, L. Chorshanbiyeva. Erish haroratining austenit strukturalı marganes po‘latining yeyilishga bardoshli xossasiga ta’sirini o‘rganish. Scientific and Technical Journal of NamIET, Vol. 9 Special Issue 1, 2024, ISSN 2181-8622 166-175 p.

23. R.Zokirov, N. Saidmakhamadov, V.B. Bekchanova, N.X. Tadjiyev, D. Eshimov. Eruvchan model yordamida sifatli quyma olish usullarini tadqiq qilish. Scientific and Technical Journal of NamIET, Vol. 9 Special Issue 1, 2024, ISSN 2181-8622

24. R.Zokirov, N. Turakhodjaev, Sh. Tashbulatov, S. Tursunbaev, A. Baydullaev. Studying the scientific and technological bases for the processing of dumping copper and aluminum slags. Journal of Critical Reviews, Vol. 7, Issue 11, 2020, ISSN 2394-5125, DOI: [10.31838/jcr.07.11.79](https://doi.org/10.31838/jcr.07.11.79) 216-221 p.

25. R.Zokirov, N. Turakhodjaev, N. Saidmakhamadov, F. Odilov, K. Tashkhodjaeva. Analysis of defects in white cast iron. ISJ Theoretical & Applied Science, 06(86), 675–682, 2020, DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.06.86.125>

26. R.Zokirov, N. Turakhodjaev, F. Odilov, N. Saidmakhamadov Development of composition of wear-resistant white pig iron with a stable structure obtained by the casting method. ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal, Vol. 10, Issue 7, July 2020, ISSN 2249-7137

27. N. Saidmakhamadov, R.Zokirov, N. Turakhodjaev, J. Khasanov, Sh. Hudoykulov. Improvement of the technology of obtaining high-chromium wear-resistant white cast iron. Spanish Journal of Innovation and Integrity, Volume 07, 2022

28. S.Tursunbayev, R.Zokirov, N. Turakhodjaev, Sh. Hudoykulov, F. Zokirov. Changes in its wear resistance when alloying aluminum alloys with lithium. Texas Journal of Engineering and Technology, ISSN 2770-4491, 5b., 20% 127-133 page.

1. Avtoreferat “Texnika fanlari va innovatsiya” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz (rezyume) tillaridagi matnlar mosligi tekshirildi
(25-aprel 2026 yil)

Босмахона лицензияси:



9338

Бичими: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» гарнитураси.

Рақамли босма усулда босилди.

Шартли босма табағи: 4. Адади 100 дона. Буюртма № 41/22.

Гувоҳнома № 851684.

«Тірографф» МЧЖ босмахонасида чоп этилган.

Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш, Беруний кўчаси, 83-уй.