

UO‘K: 669.187.4

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.1

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## RUX SAQLOVCHI YOYLI PO‘LAT ERITISH PECHI CHANGINING TAVSIFI VA QAYTA ISHLASH IMKONIYATLARI TAHLILI



**Jalolov Baxtiyorjon  
Adxamjon o'g'li**

Doktorant, Olmaliq davlat texnika  
instituti, Olmaliq, O'zbekiston  
E-mail:

[jalolovbaxtiyorjon319@gmail.com](mailto:jalolovbaxtiyorjon319@gmail.com)

ORCID ID: 0009-0004-3736-3056

Science ID: MTV-0525-0016



**Mirzavaliyev Doston  
Boxodirovich**

Xalqaro hamkorlik bo'limi  
boshlig'i, t.f.f.d. (PhD), Olmaliq  
davlat texnika instituti, Olmaliq,  
O'zbekiston

E-mail: [5515414d@gmail.com](mailto:5515414d@gmail.com)

ORCID ID: 0009-0006-1612-7083

Science ID: MTV-0625-0020



**Qarshiyev Humoyun  
Komilovich**

Katta o'qituvchi, Olmaliq davlat  
texnika instituti, Olmaliq,  
O'zbekiston

E-mail: [qarshiyev0409@gmail.com](mailto:qarshiyev0409@gmail.com)

ORCID ID: 0009-0003-6457-8266

Science ID: MSN-0525-0036



**Kamalova Iroda  
Mamasaid qizi**

Magistrant, Olmaliq davlat texnika  
instituti, Olmaliq, O'zbekiston  
E-mail:

[irodaashirmatova14@gmail.com](mailto:irodaashirmatova14@gmail.com)

ORCID ID: 0009-0008-0245-3827

Science ID: MTV-1225-0072

**Annotatsiya.** Mazkur maqolada metallolom asosida po‘lat ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan yoyli po‘lat eritish pechi changining (YPEP) fizik-kimyoviy xususiyatlari hamda undan ruxni qayta tiklash imkoniyatlari o‘rganilgan. Tadqiqot obyekti sifatida “LI DA METAL TECHNOLOGY” MCHJ korxonasidan olingan chang namunalari tanlangan. Namunalarning kimyoviy tarkibi va morfologik xususiyatlari rentgen-fluorescent tahlil (XRF), energiya-dispersiv rentgen spektroskopiyasi (EDS/SEM) hamda lazerli zarracha o‘lchamini aniqlash usullari yordamida baholandi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, chang tarkibida temir oksidi va rux oksidi asosiy komponentlar bo‘lib, mos ravishda 40,7% va 15,2% ni tashkil etishi aniqlandi. Shuningdek, natriy, kalsiy, kremniy, kaliy, oltingugurt, marganets va qo‘rg‘oshin oksidlari ham sezilarli miqdorda mavjudligi qayd etildi. EDS tahlili temir, rux va kislorod elementlarining ustunligini tasdiqladi, zarrachalar o‘lchami tahlili esa changning mayda dispers tuzilishga ega ekanligini ( $D_{50}=11,455\ \mu\text{m}$ ,  $D_{90}=34,573\ \mu\text{m}$ ) ko‘rsatdi. Tarkibdagi rux miqdorining yuqoriligi ushbu chiqindini qimmatli ikkilamchi xomashyo sifatida qayta ishlash imkoniyatini ko‘rsatadi. Natijalar asosida ruxni ajratib olish uchun Vels pechi asosidagi pirometallurgik hamda sulfat kislotali eritish asosidagi gidrometallurgik texnologiyalar istiqbolli yo‘nalishlar sifatida tavsiya etildi. Olingan natijalar metallurgiya sanoatida xavfli chiqindilarni samarali boshqarish, qimmatli metallarni qayta tiklash va aylanma iqtisodiyot tamoyillarini rivojlantirish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

**Kalit so‘zlar:** yoyli po‘lat eritish pechi changi, YPEP, rux oksidi, temir oksidi, XRF tahlili, EDS/SEM, zarracha o‘lchami, gidrometallurgik qayta ishlash, pirometallurgik qayta ishlash, Vels pechi, ikkilamchi resurslar, xavfli chiqindilar, aylanma iqtisodiyot.

Received: 01.07.2026

Accepted: 07.07.2026

Issue publication: 28.09.2026

## ХАРАКТЕРИСТИКА И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

**Жалолов  
Бахтиёржон  
Адхамжон угли**

Докторант, Алмалыкский  
государственный технический  
институт, Алмалык, Узбекистан

**Мирзалиев Достон  
Бахадырович**

PhD, начальник отдела  
международного  
сотрудничества Алмалыкского  
государственного технического  
института, Алмалык,  
Узбекистан

**Каршиев Хумоюн  
Комилович**

Старший преподаватель,  
Алмалыкский государственный  
технический институт,  
Алмалык, Узбекистан

**Камалова Ирода  
Мамасаид кизи**

Магистрант, Алмалыкский  
государственный технический  
институт, Алмалык, Узбекистан

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования физико-химических свойств пыли электродуговой сталеплавильной печи (ПЭДСП), образующейся при производстве стали из металлического лома, а также оценена возможность извлечения из нее цинка. Объектом исследования служили образцы пыли, полученные на предприятии ООО «LI DA METAL TECHNOLOGY». Химический состав, морфология и гранулометрические характеристики образцов исследованы методами рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS/SEM) и лазерной дифракции частиц. По результатам XRF установлено, что основными компонентами пыли являются оксид железа (40,7 %) и оксид цинка (15,2 %), а также оксиды натрия, кальция, кремния, калия, серы, марганца и свинца. Анализ EDS подтвердил преобладание в составе железа, цинка и кислорода, а исследование распределения размеров частиц показало мелкодисперсную структуру материала со значениями  $D_{50} = 11,455$  мкм и  $D_{90} = 34,573$  мкм. Высокое содержание цинка свидетельствует о значительном потенциале использования данной пыли в качестве вторичного сырья. В качестве наиболее перспективных направлений переработки рассмотрены пирометаллургическая технология с применением процесса Вельца и гидрометаллургическое выщелачивание серной кислотой. Полученные результаты могут служить научной основой для рационального управления опасными металлургическими отходами, извлечения ценных компонентов и развития принципов циркулярной экономики.

**Ключевые слова:** пыль электродуговой сталеплавильной печи, ПЭДСП, оксид цинка, оксид железа, рентгенофлуоресцентный анализ, EDS/SEM, гранулометрический состав, гидрометаллургическая переработка, пирометаллургическая переработка, процесс Вельца, вторичные ресурсы, опасные отходы, циркулярная экономика.

## CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF PROCESSING OPTIONS FOR ZINC-BEARING DUST FROM ELECTRIC ARC FURNACES

**Jalolov Bakhtiyorjon  
Adkhamjon ugli**

Doctoral Student, Almalik State  
Technical Institute, Almalik,  
Uzbekistan

**Mirzavaliyev Doston  
Bokhodirovich**

PhD, Head of the International  
Cooperation Department, Almalik  
State Technical Institute, Almalik,  
Uzbekistan

**Karshiyev Khumoyun  
Komilovich**

Senior Lecturer, Almalik State  
Technical Institute, Almalik,  
Uzbekistan

**Kamalova Iroda  
Mamasaid kizi**

Master's Student, Almalik State  
Technical Institute, Almalik,  
Uzbekistan

**Abstract.** This paper presents the results of a comprehensive investigation into the physicochemical properties of electric arc furnace dust (EAFD), generated during steel production from scrap metal, with particular emphasis on its potential for zinc recovery. Dust samples collected from LI DA METAL TECHNOLOGY LLC were selected as the research material. The chemical composition, morphology, and particle size distribution of the samples were characterized using X-ray fluorescence (XRF), energy-dispersive X-ray spectroscopy coupled with scanning electron microscopy (EDS/SEM), and laser diffraction particle size analysis. XRF analysis revealed that the dust mainly consists of iron oxide (40.7 wt.%) and zinc oxide (15.2 wt.%), together with sodium, calcium, silicon, potassium, sulfur, manganese, and lead oxides. EDS results confirmed the predominance of iron, zinc, and oxygen, while particle size analysis indicated a fine-grained material with median and 90th percentile particle diameters of

*D50=11.455  $\mu\text{m}$  and D90=34.573  $\mu\text{m}$ , respectively. The elevated zinc content demonstrates the significant potential of EAFD as a valuable secondary raw material for resource recovery. Among the most promising recycling technologies are pyrometallurgical processing using the Waelz process and hydrometallurgical sulfuric acid leaching. The obtained results provide a scientific basis for the sustainable management of hazardous metallurgical waste, recovery of valuable metals, and implementation of circular economy principles in the steel industry.*

**Keywords:** electric arc furnace dust (EAFD), zinc recovery, iron oxide, X-ray fluorescence (XRF), EDS/SEM characterization, particle size distribution, hydrometallurgical processing, pyrometallurgical processing, Waelz process, secondary resources, hazardous waste, circular economy.

**Kirish.** Jahon po'lat sanoati muhim tarkibiy o'zgarishlar davrini boshdan kechirmoqda: yoyli po'lat eritish pech (YPEP) texnologiyasi qayta ishlangan metallom bilan mosligi va domna pechlariga nisbatan karbonat angidrid ( $\text{CO}_2$ ) gazining pastligi tufayli jadal kengayib bormoqda. 2024-yilda dunyo bo'yicha YPEP asosida po'lat ishlab chiqarish 548,4 million tonnani tashkil etdi. Bu umumiy hajmi 1,885 milliard tonna bo'lgan jahon xom po'lati ishlab chiqarishining 29,1 foizidir (2023-yilda bu ko'rsatkich 28,6 foiz edi). Amerika Qo'shma Shtatlari kabi yirik po'lat ishlab chiqaruvchi mamlakatlarda umumiy po'lat ishlab chiqarishning 71,8 foizi, Yevropa Ittifoqida esa 44,4 foizi elektr yoyli pechlar hissasiga to'g'ri keladi [1].

Yoyli po'lat eritish pechi changlari (YPEP) gaz tozalash filtrlash tizimlari yordamida ushlab qolinadi. Bir tonna xomaki po'lat ishlab chiqarishda taxminan 10-20 kg chang hosil bo'ladi. Dunyo bo'yicha YPEP usulida po'lat eritish hajmini hisobga olsak, har yili hosil bo'ladigan YPEP chang miqdori kamida 5-10 million tonnani tashkil etadi va bu ko'rsatkich 2050-yilga kelib yiliga 18 million tonnagacha oshishi taxmin qilinmoqda. Shunga muvofiq, 2024-yilda taxminan 1,98 milliard AQSh dollariga baholangan YPEP changini qayta ishlash global bozorining yillik o'rtacha 4,3% o'sish sur'ati bilan 2034-yilga borib 3,11 milliard AQSh dollariga yetishi kutilmoqda [3, 4, 5, 6].

YPEP changi tarkibida eruvchan shakldagi zaharli va ekotoksik og'ir metallar - xususan, qo'rg'oshin (Pb), kadmiy (Cd), xrom (Cr) va rux (Zn) mavjudligi sababli ko'plab hujjatlarda xavfli chiqindi sifatida tasniflanadi. Amerika Qo'shma Shtatlari Atrof-muhitni muhofaza qilish agentligi (EPA) tizimida YPEP changi K061 belgisi bilan yuritilsa, Yevropa chiqindilar to'g'risidagi qonunchiligida po'lat ishlab chiqarishning xavfli qoldiqlari uchun mo'ljallangan kodlar ostida

tasniflanadi. Asosan rux ferriti ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , franklinit), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), sinkit ( $\text{ZnO}$ ) hamda turli xloridlar va sulfatlardan iborat changning murakkab mineralogiyasi an'anaviy utilizatsiya usullarini ekologik jihatdan nomaqbul va iqtisodiy tomondan samarasiz qilib qo'yadi [2, 7, 8, 9].

Yoyli po'lat eritish pechi changi xavfli chiqindi maqomiga ega bo'lishiga qaramay, uning metallarga boy tarkibi - xususan, odatiy tarkiblarda 10-35% rux, 18-40% temir, 1-6% qo'rg'oshin va 3-4% kalsiy mavjudligi - uni qimmatbaho ikkilamchi xomashyoga aylantiradi. Hozirda dunyo bo'ylab hosil bo'ladigan YPEP changining taxminan 45 foizigina qayta ishlanadi, bu esa qayta tiklash salohiyati va amaldagi holat o'rtasida jiddiy tafovut borligini ko'rsatadi. Bu tafovut, ayniqsa, me'yoriy-huquqiy baza va qayta ishlash infratuzilmasi unchalik rivojlanmagan sanoatlashayotgan mintaqalarda yaqqol ko'zga tashlanadi [4, 10].

Ushbu tadqiqotning asosiy vazifalari quyidagilardan iborat: (1) XRF, EDS/SEM va lazer zarrachalar o'lchami tahlili yordamida sanoat manbalaridan olingan YPEP chang namunasining ko'p usulli fizik-kimyoviy tavsifini o'tkazish; (2) ruxni ajratib olish uchun muhim bo'lgan asosiy mineralogik va elementar xususiyatlarni aniqlash; va (3) resurslarni barqaror ajratib olishni ko'zlab, ushbu aniq chang tarkibini qayta ishlash uchun mavjud qayta ishlash texnologiyalarining - birinchi navbatda Vels pirometallurgik jarayoni va sulfat kislotali gidrometallurgik tanlab eritishning - yaroqliligini tanqidiy baholash.

**Adabiyotlar tahlili va metodlar. YPEP changining kimyoviy va mineralogik tarkibi.** YPEP chang tarkibi metallolom (chiqindi) yuklamasi, pechning ishlash rejimi va ishlab chiqarilayotgan qotishmalar turiga qarab sezilarli darajada o'zgarib turadi. Shunga qaramay, ko'plab tadqiqotlar natijalarida asosiy metall komponentlar

sifatida temir va ruxning birgalikdagi ustunligi qayd etilgan. Uglerodli po‘lat ishlab chiqarishdan olingan odatiy YPEP chang tarkibida 18-40% temir, 10-35% rux, 1-6% qo‘rg‘oshin, 3-4% kalsiy, 0,4-0,5% alyuminiy, 0,02-0,9% kadmiy hamda oz miqdorda margimush, xrom va nikel mavjud bo‘ladi [7, 8, 10].

YPEP chang tarkibidagi ruxning mineralogik shakllari (spetsiatsiyasi) qayta ishlash usulini tanlashda juda muhim ahamiyatga ega. Rux asosan suyultirilgan kislotalarda ham, ishqorlarda ham erimaydigan, termodinamik barqaror shpinel fazasi bo‘lgan rux ferriti ( $ZnFe_2O_4$ , franklinit) ko‘rinishida uchraydi. Shuningdek, rux erkin sinkit ( $ZnO$ ) va kamroq miqdorda rux xlorid ( $ZnCl_2$ ) shaklida ham mavjud. Asosiy temir saqlovchi fazalar magnetit ( $Fe_3O_4$ ), magnesioferrit ( $MgFe_2O_4$ ) va kalsiy bilan almashingan ferritlardir. Qo‘shimcha fazalarga  $Mn_3O_4$ ,  $FeCr_2O_4$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$  va  $NaCl$  kiradi [2, 9].

XRD va SEM-EDS yordamida o‘tkazilgan tadqiqotlar shuni tasdiqlaydiki,  $ZnFe_2O_4$  fazasi odatiy YPEP changdagi umumiy ruxning yarmidan ko‘pini tashkil etadi, bu esa uning parchalanishini ruxni samarali ajratib olishning zaruriy shartiga aylantiradi. Ko‘pchilik zarrachalarning mayda, sferik morfologiyasi - ayniqsa 20 mkm dan past bo‘lgan zarrachalar - pechning ishlash jarayonida gaz fazasidan kondensatsiyalanishga mos keladi. 20 mkm dan yuqori bo‘lgan shlakdan olingan yirik zarrachalar noto‘g‘ri morfologiyani ko‘rsatadi va asosan temirga boy fazalarni o‘z ichiga oladi.

#### **Fizik xususiyatlar va zarrachalar o‘lchami.**

YPEP changida o‘ta mayda donali materialdir. Ko‘plab tadqiqotlar shuni tasdiqlaydiki, zarrachalarning 80-90% hajmi 10-26 mkm dan kichikdir. Machado va boshqalar zarrachalarning o‘rtacha diametri 1,88 mkm, 60% zarrachalar esa 0,90 dan 4,30 mkm gacha ekanligini ma‘lum qilishdi. Trifunovich va boshqalar tomonidan o‘tkazilgan granulometrik tahlil shuni ko‘rsatdiki, zarrachalarning 80 foizi 26 mkm dan kichik. Ushbu o‘ta mayda chang o‘lchami qayta ishlash (masalan, issiqlik bilan ishlov berish paytida gaz oqimlarida tortish) va atrof-muhitni boshqarish (masalan, ochiq saqlash paytida shamol tarqalishi) uchun o‘ziga xos muhandislik muammolarini keltirib chiqaradi [2].

Skannerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida olingan tasvirlarda submikron zarrachalarning asosan sharsimon shaklga ega ekanligi ko‘rinadi - bu so‘vish jarayonidagi bug‘

kondensatsiyasiga mos keladi. Kattaroq bo‘laklar esa sachrash va shlak qo‘shilmalari hosil bo‘lishi mexanizmlari natijasida vujudga kelib, burchaksimon yoki noto‘g‘ri shakllarga ega bo‘ladi. Energiya-dispersiyali rentgen spektroskopiyasi (EDS) xaritalash natijalari shuni tasdiqlaydiki, mayda sharsimon zarrachalar asosan rux va temirdan tashkil topib,  $ZnFe_2O_4$  fazasiga to‘g‘ri keladi, yirikroq zarrachalarda esa elementlarning ancha notekis (geterogen) taqsimlanishi kuzatiladi [9, 12, 13].

**Ekologik oqibatlar.** YPEP changining xavflilik tasnifi asosan uning tarkibidagi og‘ir metallarning atrof-muhit sharoitida yuviluvchanligidan kelib chiqadi. Toksiklik xususiyatini aniqlash uchun yuvish usuli (TCLP) qayta ishlanmagan YPEP changdan olingan yuvindi suvlarda rux (Zn), qo‘rg‘oshin (Pb) va kadmiy (Cd) miqdori belgilangan me‘yorlardan doimiy ravishda yuqori ekanligini ko‘rsatadi. Xrom tarkibi esa, ayniqsa Cr(III) moddasining Cr(VI) ga aylanishi mumkin bo‘lgan oksidlovchi muhitlarda, qo‘shimcha kanserogen xavflarni yuzaga keltiradi. Ko‘plab rivojlanayotgan sanoat hududlarida kuzatilganidek, noto‘g‘ri sharoitlarda saqlanganida yog‘ingarchilik og‘ir metallarning yerosti suvlariga aralashishiga olib kelishi mumkin, bu esa uzoq muddatli ekologik buzulishlarni yuzaga keltiradi [2, 7, 16].

#### **Qayta ishlash texnologiyalari.**

**Pirometallurgik usullar:** Vels pechi jarayoni YPEP changni qayta ishlashning asosiy sanoat texnologiyasi hisoblanib, dunyo bo‘yicha qayta ishlangan fraksiyaning asosiy qismini tashkil etadi. Bu jarayonda YPEP changi qattiq qaytaruvchi (koks yoki ko‘mir) hamda ohak yoki kremniy dioksidi bilan aralashtiriladi, donadorlanadi va taxminan 1000-1200 °C gacha qizdiriladigan aylanma pechga beriladi. Bunday sharoitda  $ZnO$  va  $ZnFe_2O_4$  karbotermik yo‘l bilan metall ruxgacha qaytariladi. U esa o‘z navbatida bug‘lanadi va tutun gazlar zonasida qayta oksidlanib, tarkibida taxminan 55% Zn va 10% gacha Pb bo‘lgan xomaki rux oksidi (Vels oksidi) hosil qiladi. Keyinchalik Vels oksidi rux eritish zavodlarida xomashyo sifatida qo‘llaniladi. Vels jarayoni optimallashtirilgan sharoitlarda (1100 °C, 90 daqiqa) ruxni 98,6% gacha ajratib olish imkonini beradi. Bunda donadorlangan xomashyo g‘ovaklik va issiqlik o‘tkazuvchanlikning yaxshilanganligi tufayli kukun

shaklidagidan yuqori samaradorlik ko'rsatadi [15, 17, 18, 19].

2010-yilda Tayvanda tijoratlashtirilgan elektr eritish reduksiyasi pechi (ESRF) jarayoni yuqori energiya xarajatlariga qaramay, shlakni bir vaqtning o'zida zararsizlantirish bilan deyarli to'liq rux va temirni qayta ishlashni taklif etadi. Yaqinda kislorod yordamida xlrlash ruxni xlrlash samaradorligi 97% dan oshishini, temirni xlrlash esa 1% dan past bo'lishini ko'rsatdi, bu esa ruxni tanlab ajratishga imkon beradi [10].

**Gidrometallurgik usullar:** YPEP changini gidrometallurgik ishlov berish odatda temirni asosan qattiq qoldiqda qoldirib, rux va boshqa rangli metallarni eritish uchun sulfat kislotada ( $H_2SO_4$ ) ishqorlashni o'z ichiga oladi. Atmosfera bosimida,  $25^\circ C$  haroratda 1 N  $H_2SO_4$  eritmasi yordamida ruxni 85% ajratib olish mumkinligi isbotlangan. Yuqori bosimda ishqorlash (2 M  $H_2SO_4$ ,  $270^\circ C$ ) orqali ruxni ajratib olish darajasi 53-79% ga, kislotada konsentratsiyasi yuqori bo'lgan atmosfera sharoitida ishqorlashda (4 M  $H_2SO_4$ ) esa 97% gacha yetadi. Asosiy muammo  $ZnFe_2O_4$  birikmasining kimyoviy barqarorligidir, chunki u yumshoq ishqorlash sharoitida erishga chidamli. Kuydirish, termik parchalash yoki xlrlash orqali dastlabki ishlov berish bu fazadan ruxning ajralib chiqishini sezilarli darajada yaxshilaydi [10, 21, 22, 23].

Ikki bosqichli yondashuv - eruvchan xloridlar va sulfatlarni yuvib tashlash uchun dastlabki suv bilan yuvish, so'ngra sulfat kislotada bilan ishqorlash - reagent sarfini kamaytiradi va keyingi jarayonlarni soddalashtiradi. Ishqorlashdan so'ng, rux eritmadan erituvchi ekstraksiyasi, kimyoviy cho'ktirish yoki elektr eritish orqali qaytariladi, bu esa rux sulfat yoki yuqori tozalikdagi metall ruxni beradi [3].

**Barqarorlashtirish/Qattiqlashtirish (B/Q):** Metallarni qayta ishlash iqtisodiy jihatdan samarasiz bo'lgan hollarda, MgO bog'lovchilar bilan yoki ularsiz qo'llaniladigan portlandsement og'ir metallarni harakatsizlantirib, TCLP bo'yicha yuvilish darajasini maqbul ko'rsatkichgacha pasaytirishi mumkin. Bu esa hosil bo'lgan qoldiqlarni poligonlarda xavfsiz utilizatsiya qilish imkonini beradi. Biroq, bu usul chang tarkibidagi qimmatli moddalarni ajratib olishga imkon bermaydi va katta hajmdagi qotirilgan chiqindilarni hosil qiladi [25].

Mualliflar [26] rux keklari tarkibida rux ferriti, rux silikati va rux sulfidi kabi qiyin eriydigan

fazalar mavjudligi sababli an'anaviy tanlab eritishda ruxning to'liq eritmaga o'tmasligini ko'rsatib, jahon amaliyotida qo'llaniladigan getit, yarozit va gematit jarayonlarini o'zaro solishtirganlar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, sulfat kislotada ishtirokida gidrometallurgik qayta ishlash rux, mis va kadmii kabi komponentlarni yuqori darajada eritmaga o'tkazish, rux sulfat eritmasini zavodning mavjud elektroliz jarayoniga qaytarish hamda texnogen chiqindidan qo'shimcha metall ajratib olishni amalda isbotlab berishgan.

**Namunalarni olish va tayyorlash.** YPEP chang namunalari sanoat po'lat eritish korxonasining qop-filtrli chang yig'ish tizimidan olindi. Namunalar namlikni yutish va ifloslanishning oldini olish uchun yopiq polietilen idishlarda saqlangan. Har bir tahlil usuli uchun to'rtga bo'lib, keyin gomogenizatsiya qilish orqali reprezentativ kichik namunalar tayyorlandi.

**Kimyoviy tarkib tahlili (XRF).** Namunalarning umumiy kimyoviy tarkibi rentgen-fluorescent spektrometriyasi (XRF) yordamida aniqlandi (NEX CG asbobi, sochilishni tuzatishga ega fundamental parametrlar (FP) usuli). Namunalar presslangan tabletkalar ko'rinishida tahlil qilindi. Natijalar asosiy elementlar uchun oksidlarining massa ulushi (%), kichik va mikroelementlar uchun esa elementlarning massa ulushi (%) sifatida keltirilgan. Takroriy o'lchovlar tahlilning qaytariluvchanligini tasdiqladi; bunda asosiy oksidlar uchun statistik xatolik ( $2\sigma$ ) doimiy ravishda 0,5% mass. dan past bo'ldi.

**Elementlarning taqsimlanish xaritasi va mikrostruktura tahlili (SEM-EDS).** Energiya-dispersli rentgen spektroskopiyasi bilan birgalikdagi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM-EDS) tahlili uglerod bilan qoplangan namunalar ustida  $2050\times$  kattalashtirishda o'tkazildi. Bunda Fe, Zn, Ca, Mn, Si, K, Na va mavjud bo'lgan boshqa elementlarning K-seriyali va  $K\beta$ -seriyali rentgen nurlarini uyg'otish uchun mos keladigan tezlatuvchi kuchlanish qo'llanildi. Elementlarning miqdoriy tahlili standart ZAF matritsasini tuzatish usuli yordamida bajarilib, natijalar atom ulushi (%), massa ulushi (%) va tegishli xatoliklar ko'rinishida taqdim etildi.

**Zarrachalar o'lchamining taqsimlanishini tahlil qilish.** Zarrachalar o'lchamining lazerli tahlili JL-1197 rusumli lazerli zarrachalar o'lchami

analizatorida (Chengdu Jingxin Powder Analyse Instrument Co., Ltd.) dispersant muhit sifatida suvdan foydalanilgan holda amalga oshirildi (nurni sindirish ko'rsatkichi: 1,33; namunaning nurni sindirish ko'rsatkichi: 1,54+0,01i). Kumulyativ va differensial hajmiy taqsimotlar aniqlanib, standart foizli parametrlar (D10, D25, D50, D75, D90, D97, D99) hamda o'rtacha hajmiy diametrlar (D, D) olindi. O'ltahov ishonchliligini ta'minlash uchun konsentratsiya 99,99% darajasida ushlab turildi.

**Natijalar. Umumiy kimyoviy tarkibi (XRF).** YPEP chang namunasining XRF tahlili uglerodli/legirlangan po'lat parchalari asosidagi YPEP changiga xos bo'lgan murakkab ko'p elementli tarkibga ega ekanligini ko'rsatdi. Natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

**YPEP changi asosiy komponentlarining miqdori, %**

| Fe   | Zn   | Cl   | Ca   | Mn   | Pb  | Mg   | Na   | Al   | K    | SiO <sub>2</sub> | Cu  | C     | O     |
|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------------------|-----|-------|-------|
| 34.4 | 14.7 | 2.92 | 7.12 | 2.17 | 1.7 | 2.04 | 8.51 | 0.74 | 3.59 | 6.04             | 0.2 | 12.86 | 28.74 |

YPEP changining qolgan komponentlarining miqdori sezilarli emas, eng keng tarqalgan metallar orasida nikel, kadmiy, qalay, bariyini ajratib ko'rsatish mumkin.

O'ltahashda 1-rasmda keltirilgan difrakto-gramma olindi va 3-jadvalda fraksiyalar bo'yicha taqsimot keltirildi.

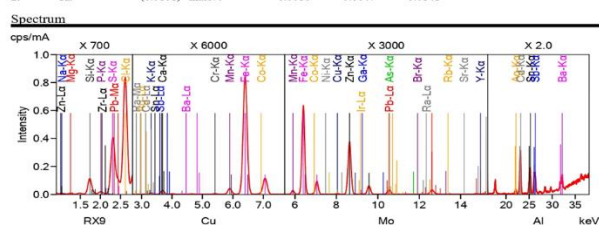
Asosiy faza hosil qiluvchi unsur temir bo'lib, u Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> holida 40,7% miqdorda mavjud. Bu esa pech ishlashi va chiqindi gazlarning sovishi davomida kuchli oksidlanish sodir bo'lganini ko'rsatadi. 15,2% miqdordagi ZnO ushbu namunaning ruxga boy YPEP changi ekanligini va ruxni ajratib olish uchun qayta ishlashga yaroqliligini tasdiqlaydi - Vels pechida iqtisodiy jihatdan samarali ishlov berish uchun chegara, odatda, umumiy Zn+Pb miqdori 15-20% dan yuqori deb hisoblanadi. Na<sub>2</sub>O ning yuqori miqdori (9,93%) va Cl ning mavjudligi (2,60%) metallolom shixtasidan ishqoriy xloridlarning sezilarli darajada o'tganligini bildiradi, bu esa ruxlangan yoki qoplamali metallolomdan foydalanilganiga mos keladi. SO<sub>3</sub> ning yuqori miqdori (4,97 og'%) metallolom qoplamalari yoki texnologik qo'shimchalardan olingugurt qo'shilganini ko'rsatadi [10].

PbO ning 1,49% va CdO ning 0,081% miqdori ekologik nuqtai nazardan muhim ahamiyatga ega, chunki har ikkala elementning ham yuviluvchanligi bo'yicha qat'iy me'yoriy chegara-

lar mavjud. CuO (0,253%), ZrO<sub>2</sub> (0,223%), SnO<sub>2</sub> (0,054%) va Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,039%) ning kichik konsentratsiyalari YPEP changning odatiy tarkibiga mos keladi va geterogen metallolomdan olinganini aks ettiradi.

Analyzed result (EP method, Scatter)

| No. | Component | Result   | Unit  | Stat. Err. | LLD    | LLQ    |
|-----|-----------|----------|-------|------------|--------|--------|
| 1   | Cl        | 2.92     | mass% | 0.0033     | 0.0023 | 0.0070 |
| 2   | Br        | 0.0265   | mass% | 0.0005     | 0.0006 | 0.0017 |
| 3   | Na        | 8.51     | mass% | 0.359      | 0.945  | 2.84   |
| 4   | Mg        | 2.04     | mass% | 0.0344     | 0.0505 | 0.152  |
| 5   | Si        | 5.14     | mass% | 0.0101     | 0.0071 | 0.0213 |
| 6   | P         | 0.0889   | mass% | 0.0019     | 0.0046 | 0.0137 |
| 7   | S         | 2.18     | mass% | 0.0046     | 0.0080 | 0.0241 |
| 8   | K         | 3.59     | mass% | 0.0248     | 0.0063 | 0.0190 |
| 9   | Ca        | 7.12     | mass% | 0.0309     | 0.0185 | 0.0556 |
| 10  | Cr        | 0.241    | mass% | 0.0024     | 0.0026 | 0.0077 |
| 11  | Mn        | 2.17     | mass% | 0.0055     | 0.0058 | 0.0173 |
| 12  | Fe        | 34.4     | mass% | 0.0071     | 0.0077 | 0.0232 |
| 13  | Co        | 0.0686   | mass% | 0.0054     | 0.0181 | 0.0542 |
| 14  | Ni        | 0.0249   | mass% | 0.0011     | 0.0022 | 0.0067 |
| 15  | Cu        | 0.246    | mass% | 0.0026     | 0.0023 | 0.0070 |
| 16  | Zn        | 14.7     | mass% | 0.0180     | 0.0015 | 0.0044 |
| 17  | Ga        | 0.0259   | mass% | 0.0014     | 0.0038 | 0.0115 |
| 18  | As        | (0.0084) | mass% | 0.0028     | 0.0081 | 0.0243 |
| 19  | Rb        | 0.0236   | mass% | 0.0005     | 0.0009 | 0.0027 |
| 20  | Sr        | 0.0107   | mass% | 0.0003     | 0.0006 | 0.0017 |
| 21  | Zr        | 0.231    | mass% | 0.0029     | 0.0003 | 0.0010 |
| 22  | Ag        | 0.0074   | mass% | 0.0005     | 0.0008 | 0.0025 |
| 23  | Cd        | 0.0089   | mass% | 0.0016     | 0.0008 | 0.0025 |
| 24  | Sn        | 0.0588   | mass% | 0.0012     | 0.0008 | 0.0024 |
| 25  | Sb        | 0.0459   | mass% | 0.0012     | 0.0020 | 0.0060 |
| 26  | Ba        | 0.0410   | mass% | 0.0016     | 0.0027 | 0.0081 |
| 27  | Ir        | 0.0685   | mass% | 0.0030     | 0.0078 | 0.0235 |
| 28  | Pb        | 1.70     | mass% | 0.0056     | 0.0019 | 0.0058 |
| 29  | Ra        | (0.0101) | mass% | 0.0016     | 0.0047 | 0.0141 |



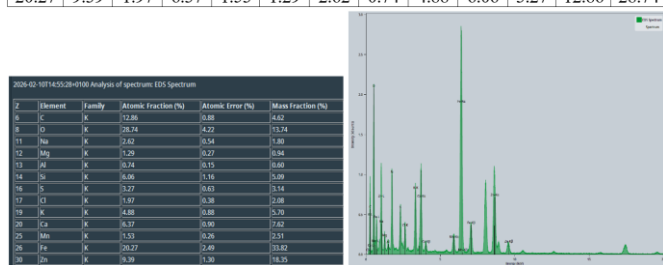
1-rasm. YPEP changining fazaviy tarkibi diagrammasi.

**EDS bo'yicha elementar tarkibi.** 2050× kattalashtirilgan SEM namunasining EDS tahlili zarrachalar darajasidagi fazoviy aniqlikda asosiy element tarkibini tasdiqladi. 2-jadvalda EDSning to'liq miqdoriy tahlili natijalari keltirilgan.

2-jadval

**YPEP changi elementar tarkibi, %**

| Fe    | Zn   | Cl   | Ca   | Mn   | Mg   | Na   | Al   | K    | Si   | S    | C     | O     |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 20.27 | 9.39 | 1.97 | 6.37 | 1.53 | 1.29 | 2.62 | 0.74 | 4.88 | 6.06 | 3.27 | 12.86 | 28.74 |



2-rasm. Chang zarrachalarining dispersiv rentgen spektroskopiyasi (EDS) spektri.

2-jadval va EDS spektri (2-rasm) tahliliga ko'ra, namunada temir (Fe), rux (Zn), kislorod (O) hamda nisbatan kam miqdorda kremniy (Si), kaltsiy (Ca), kaliy (K), oltingugurt (S), alyuminiy (Al), magniy (Mg), marganes (Mn), natriy (Na) va boshqa elementlar mavjudligi aniqlandi.

Spektrda ayniqsa Fe-Kα (~6.4 keV) va Zn-Kα

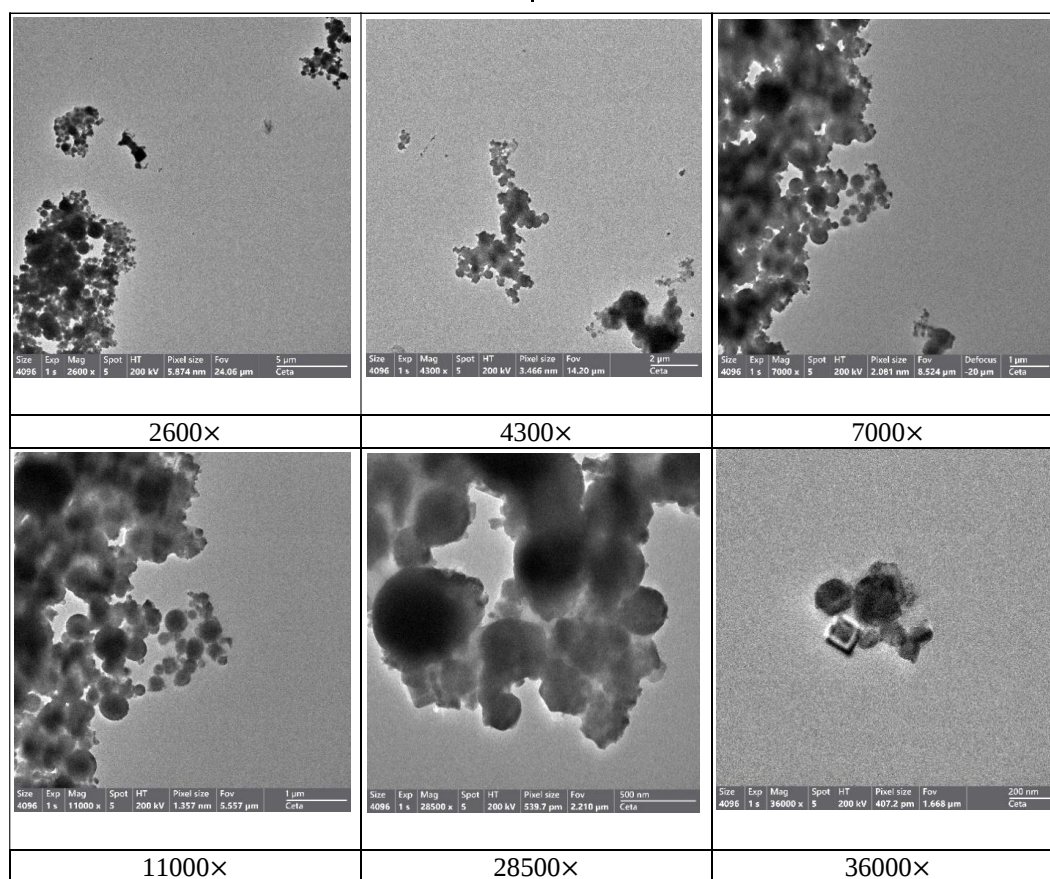
(~8.6 keV) piklarining yuqori intensivligi ushbu elementlarning namunadagi ustun komponentlar ekanligini ko'rsatadi. Kislorodning sezilarli miqdori esa ushbu elementlarning asosan oksid shaklida mavjudligini bildiradi.

EDS spektri Fe 33,82 % og'irlik ulushi bilan ustun metall elementi, Zn esa 18,35 % og'irlik ulushi bilan asosiy rangli metall ekanligini tasdiqlaydi. Uglerodning yuqori atom ulushi (12,86 %) metallolom yoki qisman yongan qaytaruvchilardan qolgan organik ifloslanishni aks ettiradi - bu sanoatda hosil bo'lgan YPEP changi uchun keng tarqalgan xususiyatdir. Tarkibdagi 28,74 % miqdoridagi kislorod asosan oksid fazali mineralogiya mos keladi [8, 13].

moslik xatoliklari ushbu asosiy elementlarning miqdoriy tahlili yuqori ishonchlikka ega ekanini ko'rsatadi.

Yoyli po'lat eritish pechidan olingan chang namunalarning morfologik xususiyatlari TEM (Transmission Electron Microscopy) usuli yordamida turli kattalashtirish darajalarida (2600× dan 36000× gacha) o'rganildi.

TEM tasvirlari (3-rasm) chang zarrachalarining mikrostrukturaviy tuzilishini ochib berib, ularning asosan sferik shaklga ega bo'lgan nano va submikron o'lchamdagi zarrachalardan tashkil topganini ko'rsatdi. Yuqori kattalashtirishda ayrim zarrachalarning poligonal va kristall shaklga yaqin ko'rinishi aniqlandi. YPEP changi murakkab



**3-rasm. Chang zarrachalarining TEM tasvirlari.**

EDS spektridagi Fe-K $\alpha$  cho'qqisining ustunligi (intensivligi ~2,86 ming impuls) va sezilarli Zn-K $\alpha$  cho'qqisi (~1,08 ming impuls) XRF tahlilidagi massa ulushlarini bevosita aks ettiradi. Ca-K $\alpha$ , Si-K $\alpha$ , K-K $\alpha$  va Mn-K $\alpha$  cho'qqilari chang matritsasining ko'p elementli tabiatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Fe (0,02%) va Zn (0,08%) uchun past

tarkibli, nano va mikro o'lchamdagi zarrachalardan iborat bo'lgan, kuchli aglomeratsiyalangan oksidli dispers tizim ekanligi aniqlandi.

#### **Zarrachalar o'lchamining taqsimlanishi.**

Lazer difraksiyasi tahlili YPEP chang namunasining sanoat changlariga xos bo'lgan bimodal-keng zarrachalar o'lchami taqsimotiga ega ekanligini

ko'rsatdi. Asosiy taqsimlanish parametrlari 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

**Zarrachalar o'lchamining taqsimlanish parametrlari (lazer difraksiyasi)**

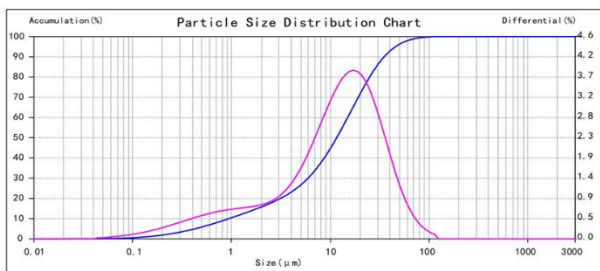
| D6    | D10   | D16   | D25   | D50    | D75    | D84    | D90    | D97    | D99    | D      | D     | S/V ratio |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----------|
| 0.507 | 0.933 | 2.031 | 4.502 | 11.455 | 21.494 | 27.791 | 34.573 | 52.971 | 71.206 | 15.428 | 2.036 | 2.9470    |

YPEP changi namunasi lazer difraksiyasi asosida ishlovchi zarracha o'lcham analizatori yordamida o'rganildi. Granulometrik tahlil natijalari changning keng diapazonda taqsimlanganligini ko'rsatdi. Median zarracha o'lchami  $D_{50} \approx 11.455 \mu\text{m}$  bo'lib, asosiy massa o'rta o'lchamli fraksiyalarga to'g'ri keladi,  $D_{90} \approx 34.573 \mu\text{m}$  qiymati esa yirik zarrachalar ulushining ham mavjudligini bildiradi. Shu bilan birga,  $D[3,2] \approx 2.036 \mu\text{m}$  qiymati zarrachalarning sirt maydoni asosan mayda fraksiyalar hisobiga shakllanishini ko'rsatadi. Bu natijalar TEM tasvirlari bilan mos kelib, yirik zarrachalar aslida mayda nanozarrachalarning aglomeratsiyasi natijasida hosil bo'lganini tasdiqlaydi.



**JL-1197 LASER PARTICLE SIZE ANALYSER REPORT**

|                                             |                             |                                  |
|---------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Sample name: Lida_mikro                     | 0.275 $\mu\text{m}$         | D6: 0.507 $\mu\text{m}$          |
| Sample number: 1                            | D10: 0.933 $\mu\text{m}$    | D16: 2.031 $\mu\text{m}$         |
| Medium: R                                   | D25: 4.502 $\mu\text{m}$    | D50: 11.455 $\mu\text{m}$        |
| Operating: Farrukh Erkinov                  | D75: 21.494 $\mu\text{m}$   | D84: 27.791 $\mu\text{m}$        |
| Concentration: 99.99                        | D90: 34.573 $\mu\text{m}$   | D97: 52.971 $\mu\text{m}$        |
| S/V: 2.9470 m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> | D99: 71.206 $\mu\text{m}$   | Model: General model_1           |
| D[4,3]: 15.428 $\mu\text{m}$                | D[3,2]: 2.036 $\mu\text{m}$ | Sample analysis rate: 1.54* 0.01 |
| Date: 2026-2-13 16:00                       |                             | Medium analysis rate: 1.33       |



**4-rasm. YPEP changining granulometrik tarkibi va zarracha o'lcham taqsimoti.**

Granulometrik taqsimot egri chizig'i (4-rasm) asosan 10-20  $\mu\text{m}$  diapazonda maksimum qiymatga ega bo'lib, bu interval chang massasining asosiy qismini tashkil etadi. Shu bilan birga,  $<1 \mu\text{m}$  o'lchamli mayda zarrachalar va 30-50  $\mu\text{m}$  dan katta yirik zarrachalarning mavjudligi changning ko'p fraksiyalari tizim ekanligini tasdiqlaydi.

Zarrachalarning median diametri ( $D_{50}$ ) 11,455  $\mu\text{m}$  bo'lib, bu ko'rsatkich adabiyotlarda sanoat YPEP changi uchun keltirilgan qiymatlarga mos keladi. Hajmiy o'rtacha qiymat ( $D=15,428 \mu\text{m}$ ) va sirtiy o'rtacha qiymat ( $D=2,036 \mu\text{m}$ ) o'rtasidagi

yaqqol farq taqsimotning keng va polidispers ekanligini, shuningdek, solishtirma sirt maydoniga nomutanosib ravishda katta hissa qo'shadigan submikron zarrachalar ulushi yuqori ekanligini ko'rsatadi. Solishtirma sirt-hajm nisbatining 2,9470  $\text{m}^2/\text{sm}^3$  ga tengligi sirt maydoni katta ekanligini tasdiqlaydi va bu ham ishqorlash, ham pirometallurgik jarayonlardagi reaksiya qobiliyatiga bevosita ta'sir qiladi [13, 14].

$D_{90}$  ko'rsatkichining 34,573  $\mu\text{m}$  bo'lishi zarrachalarning 90 foizi taxminan 35  $\mu\text{m}$  dan kichik ekanligini bildiradi. Bu esa mazkur changni o'ta mayda dispersli toifaga kiritadi va texnologik gaz oqimlarida zarrachalarning ilashib ketishining oldini olish uchun Vels pechida qayta ishlashdan oldin pelletlashni taqozo etadi. Zarrachalarning sezilarli qismi 1  $\mu\text{m}$  dan kichik ekanligi ( $D_{10} = 0,933 \mu\text{m}$ ) tarkibida bug' kondensatsiyasi natijasida hosil bo'lishga xos bo'lgan nanoo'lchamdagi materiallar mavjudligidan dalolat beradi.

**Muhokama.** O'tkazilgan tahlillar natijalari ma'lumotlariga asosan, «LI DA METAL TECHNOLOGY» MCHJ YPEP changi ruxni ajratib olish uchun jiddiy texnik-iqtisodiy asosga ega bo'lgan qimmatbaho ikkilamchi xomashyo sifatida baholanadi. Ushbu changni qayta ishlash salohiyati quyidagicha baholanadi:

- **Rux miqdori ( $\text{ZnO}$ : 15,2%; elementar Zn: 18,35%)** Vels pechida iqtisodiy jihatdan samarali qayta ishlash uchun umumiy qabul qilingan 15 foizlik chegaradan yuqori [18].

- **Temir miqdori ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 40,7%, elementar Fe: 33,82%)** natriy karbonat ishtirokida eritib qaytarish usuli yordamida rux ajratib olingandan so'ng ikkilamchi temir konsentrati sifatida ahamiyatga ega bo'lishi uchun yetarlicha yuqori. Bu usul temirning 98,62 foizini ajratib olish va 93,8 foizlik temir olish imkonini beradi [26].

- **Qo'rg'oshin miqdori ( $\text{PbO}$ : 1,49%)** me'yoriy yuvilish cheklovlari sababli changni poligonga tashlash o'rniga unga ishlov berish zaruratini keltirib chiqaradi; Velslash jarayonida qo'rg'oshin rux bilan birga uchuvchanlik xususiyatiga ega bo'lib, oksidni tozalash bosqichida qayta tiklanadi yoki ajratib olinadi.

- **Ishqor va xloridlarning yuqori miqdori ( $\text{Na}_2\text{O}$ : 9,93%, Cl: 2,60%)** Velslash usulida qayta ishlashni murakkablashtiradi, chunki xloridlar pechning o'tga chidamli materiallariga shikast yetkazishi

va rux oksidi mahsulotini ifloslantirishi mumkin. Shu sababli, pirometallurgik ishlov berishdan oldin eruvchan xloridlarni yuvib tashlash uchun suv bilan oldindan tozalash qat'iy tavsiya etiladi [24].

- **Mayda zarrachalar o'lchami (D50: 11,455  $\mu\text{m}$ )** sohadagi ilg'or tajribalarga muvofiq, Vels pechiga yuklashdan avval okatishlashni taqozo etadi [15].

- **Kadmiy (CdO: 0,081%) va xrom (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0,301%)** atrof-muhit hamda salomatlik uchun xavf tug'diradi, bu esa materialni ochiq holda saqlash o'rniga, nazorat ostida qayta ishlash zaruratini kuchaytiradi [9, 16].

Natriy xlorid miqdori juda yuqori, zarrachalari nisbatan mayda va tarkibidagi rux ulushi 15 foizdan ortiq bo'lgan ushbu maxsus YPEP chang tarkibi uchun ikki bosqichli kompleks yondashuv tavsiya etiladi: (1) eruvchan Na, K, Cl va S fazalarini yo'qotish uchun dastlabki yuvish (bu yakuniy mahsulotlarning xlorid bilan ifloslanishini sezilarli darajada kamaytiradi); (2) rux va qo'rg'oshinni uchirib, xomaki rux oksidi shaklida qayta tiklash uchun yuvilgan va granulalangan qoldiqni Vels pechida qayta ishlash (bunda hosil bo'lgan temirli klinker metallurgiyada qayta ishlatilishi mumkin) [15, 18, 24].

Kichikroq hajmdagi yoki kam investitsiyali holatlar uchun 2-4 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bilan ishqorlashga asoslangan gidrometallurgik usul maqbul muqobil hisoblanadi. Bu usul ruxning 85-97 foizini ajratib olish imkonini beradi, temir esa asosan qattiq holda qolib, temir konsentrati sifatida ishlatilishi yoki YPEPga qaytarilishi mumkin. Ruxning asosiy fazasi sifatida ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (franklinit) mavjudligi yumshoq sharoitlarda ekstraksiyani cheklaydi, shuning uchun kislota konsentratsiyasi, harorat (optimal 70-90°C) va reaksiya vaqtini (2-4 soat) optimallashtirish talab etiladi.

Istiqbolli texnologiyalar, xususan, kislorod yordamida xlorlash (>97% rux ajratib olish, <1% temir qo'shib ajralishi) va vodorod asosida to'g'ridan-to'g'ri qaytarish atrof-muhit uchun jiddiy afzalliklarni taqdim etsada, sanoatda joriy etishdan avval yanada kengaytirishni talab qiladi [11, 26].

**Xulosa.** Ushbu tadqiqotda po'lat qoldiqlari asosida ishlaydigan yoyli po'lat eritish pechi korxonasidan olingan sanoat changining (YPEP chang) batafsil, ko'p uslubli tavsifi keltirilgan bo'lib, uni qayta ishlash imkoniyatlari, ayniqsa, rux

va temirni ajratib olish nuqtayi nazaridan baholangan. Asosiy xulosalar quyidagilardan iborat:

**1. Kimyoviy tarkibi:** Rentgen-fluorescent tahlili (XRF) asosiy oksid fazalari Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40,7 %) va ZnO (15,2 %) ekanligini tasdiqladi. Shuningdek, tarkibida sezilarli miqdorda Na<sub>2</sub>O (9,93 %), CaO (8,44 %), SiO<sub>2</sub> (6,04 %), SO<sub>3</sub> (4,97 %), K<sub>2</sub>O (3,65 %) hamda ekologik jihatdan xavfli bo'lgan PbO (1,49 %) va CdO (0,081 %) mavjudligi aniqlandi.

**2. Element tarkibi (EDS):** SEM-EDS tahlili asosiy metall elementlar sifatida Fe (33,82 %) va Zn (18,35 %) mavjudligini, shuningdek, muhim ikkilamchi komponentlar sifatida Ca (7,62 %), K (5,70 %), Si (5,09 %), Mn (2,51 %), S (3,14 %) va Cl (2,08 %) borligini tasdiqladi. Fe va Zn uchun moslik xatoligining 0,1% dan pastligi tahlilning yuqori darajada ishonchli ekanini ko'rsatadi.

**3. Zarrachalar o'lchami:** Lazer difraksiyasi tahlili D50 - 11,455  $\mu\text{m}$ , D90 - 34,573  $\mu\text{m}$  va hajm bo'yicha o'rtacha diametr - 15,428  $\mu\text{m}$  ekanini aniqladi. Bu natijalar ushbu changni termik ishlov berishdan oldin pelletlashni talab qiladigan o'ta mayda dispersli sanoat qo'shimcha mahsuloti sifatida tasniflash imkonini beradi.

**4. Qayta ishlash salohiyati:** Rux miqdorining yuqoriligi (>15 % ZnO) bu changni Vels usulida pirometallurgik qayta ishlash uchun iqtisodiy jihatdan maqbul xomashyo qatoriga qo'yadi. Tarkibidagi ishqoriy xloridlarning ko'pligi pechning o'tga chidamli qoplamasini va mahsulot sifatini himoya qilish uchun uni dastlab suv bilan yuvish bosqichini o'tkazishni taqozo etadi. Texnik jihatdan maqbul muqobil usul gidrometallurgik ishqorlash bo'lib, optimallashtirilgan kislotali sharoitlarda ruxni 85-97% gacha ajratib olishga erishish mumkin [10].

**5. Ekologik holati:** Ushbu YPEP (yoyli po'lat eritish pechi) changi tarkibidagi tanlab eritiluvchan Pb, Cd va Zn miqdori me'yoriy chegaralardan oshib ketganligi sababli xavfli chiqindilar tasnifiga kiradi. Metallarni ajratib olish uchun nazorat ostida qayta ishlash aylanma iqtisodiyot doirasida ham ekologik zarurat, ham iqtisodiy imkoniyat hisoblanadi [7].

Keyingi tadqiqotlarda pirometallurgik va gidrometallurgik jarayon sharoitlarini optimallashtirish uchun muhim parametr bo'lgan ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:ZnO nisbatini miqdoriy baholash maqsadida rentgen-difraksion tahlil (XRD) yordamida mineralogik faza aniqlanishi, shuningdek, amaldagi

milliy me'yoriy hujjatlarga muvofiq xavflilik | sinovlari o'tkazilishi lozim.  
darajasini rasman belgilash uchun TCLP  
(toksiklikni aniqlashning yuvib chiqarish usuli)

#### FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Колисниченко, В. (2025, June 12). Доля ЭДП в мировом производстве стали за 2024 год выросла до 29,1%. GMK Center. <https://gmk.center/news/dolya-edp-v-mirovom-proizvodstve-stali-za-2024-god-vyros-la-do-29-1/>
- [2] Rizescu, C.-Z., Bacinschi, Z., Stoian, E.-V., & Poinescu, A.-A. (2010). Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *Advances in Waste Management: Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI'10)*, 139–143.
- [3] Hamann, C., Piehl, P., Weingart, E., Stolle, D., Al-Sabbagh, D., Ostermann, M., Auer, G., & Adam, C. (2024). Selective removal of zinc and lead from electric arc furnace dust by chlorination–evaporation reactions. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133421>
- [4] Hernández Buitrago, L. J., Daza Prada, I., Amaral-Labat, G., Beneduce Neto, F., & Lenz e Silva, G. F. B. (2018). Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2), e-12006. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0343>
- [5] Nair, A. T., Mathew, A., Archana, A. R., & Abdul Akbar, M. (2022). Use of hazardous electric arc furnace dust in the construction industry: A cleaner production approach. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134282>
- [6] Самадов, А. У., Тошкодирова, Р. Э., & Жалолов, Б. А. (2024). Анализ цинксодержащей пыли, образующейся при производстве стали. *Universum: технические науки*, (3), 20–23. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.129.12.18967>
- [7] Machado, J. G., Brehm, F. A., Moraes, C. A., Santos, C. A., Vilela, A. C., & Cunha, J. B. (2006). Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 953–960. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044>
- [8] Samadov, A. U., Jalolov, B. A., & Kamalova, I. M. (2025). Po'lat eritish texnogen changlarining mikrostrukturaviy va elementar tarkibini TEM–EDS usullarida o'rganish. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, 6(2), 53–61.
- [9] Al Jabri, M. J., Sangeetha, B. M., & Dwivedi, P. B. (2023). Optimized zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Hydrometallurgical process and characterization. *Green Chemistry & Technology Letters*, 9(1), 15–21. <https://doi.org/10.18510/gctl.2023.912>
- [10] Huang, J., & Yang, X. (2024). Oxygen-assisted zinc recovery from electric arc furnace dust using magnesium chloride. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31(10), 2300–2311. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2837-4>
- [11] Chairaksa-Fujimoto, R., Inoue, Y., Umeda, N., Itoh, S., & Nagasaka, T. (2015). New pyrometallurgical process of EAF dust treatment with CaO addition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 22(8), 788–797. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1135-6>
- [12] Guézennec, A.-G., Huber, J.-C., Patisson, F., Sessieq, P., Birat, J.-P., & Ablitzer, D. (2005). Dust formation in electric arc furnace: Birth of the particles. *Powder Technology*, 157(1–3), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.006>
- [13] ZNO RECYCLE. (2024, September 11). Why pelletizing EAF dust for efficient recycling in the Waelz kiln process. <https://znorecycle.com/pelletizing-eaf-dust-for-efficient-recycling-in-the-waelz-kiln-process/>

- [14] Saadati, M., Hosseinzadeh, Z., Zamani, A. A., & Ashabi, E. (2023). Evaluating the concentration and leachability of heavy metals in electric arc furnace dust: Implications for environmental management. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 2(2), 117–122. <https://doi.org/10.56578/jemse020203>
- [15] Sunnatov, J. B., & Qarshiyev, X. K. (2021). Qora metallurgiyada hosil bo‘lgan changlardan rangli metallarni ajratib olish texnologiyalarini o‘rganish va tahlil qilish. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*, 1(4), 1414–1427.
- [16] Morcali, M. H., Yucel, O., Aydin, A., & Derin, B. (2012). Carbothermic reduction of electric arc furnace dust and calcination of Waelz oxide by semi-pilot scale rotary furnace. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 48(2), 173–184. <https://doi.org/10.2298/JMMB111219031M>
- [17] Özcan, D., Karaoğlu, K. M., & Çelik, M. (2024). Classification of zinc recovery quality from EAF dust using machine learning: A Waelz process study. *Engineering Perspective*, 4(4), 171–177. <https://doi.org/10.29228/eng.pers.79502>
- [18] Havlik, T., Turzakova, M., Stopić, S., & Friedrich, B. (2005). Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 77(1–2), 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>
- [19] Havlík, T., Souza, B. V., Bernardes, A. M., Schneider, I. A. H., & Miškuřová, A. (2006). Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
- [20] Duan, W., Dong, X., Gao, L., Wang, Z., Wang, J., et al. (2025). Zn recovery strategies from steelmaking dust: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 378, 134694. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134694>
- [21] Trifunović, V., Avramović, Lj., Jonović, R., Milić, S., Đorđević, S., & Jonović, M. (2021). Hydrometallurgical treatment of electric arc furnace dust in aim of zinc separation. In *Proceedings of the 52nd International October Conference on Mining and Metallurgy (IOC 2021)*.
- [22] Bayraktar, A. C., Avşar, E., Toröz, I., Alp, K., & Hanedar, A. (2015). Stabilization and solidification of electric arc furnace dust originating from steel industry by using low grade MgO. *Archives of Environmental Protection*, 41(4), 62–66. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0040>
- [23] Xoliqulov, D. B., Xaydaraliev, X. R., & Qarshiyev, H. K. (2020). Olmaliq KMK AJ rux ishlab chiqarish zavodi sharoitida rux keklarini gidrometallurgik qayta ishlash imkoniyatlarini tahlil qilish. *Journal of Advances in Engineering Technology*, (2), 54–58. <https://doi.org/10.24412/2181-1431-2020-2-54-58>
- [24] Chen, L., Liu, W., Jiao, F., Yang, C., Li, G., Liu, S., & Qin, W. (2023). Separation and recovery of zinc, lead and iron from electric arc furnace dust by low temperature smelting. *Separation and Purification Technology*, 312, 123355. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123355>
- [25] Hoffelner, F. (2022). Kinetic aspects of the selective reduction of zinc ferrite with H<sub>2</sub> in the processing of electric arc furnace dust (Master's thesis). *Montanuniversität Leoben*.
- [26] Koishina, G., Dosmukhamedov, N., Kaplan, V., Nursainov, I., & Zholdasbay, Y. (2025). Technology for producing pure lead-free zinc oxide from electric arc furnace (EAF) dust. *Engineering Journal of Satbayev University*, 147(2), 17–23. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2025.i2.03>

---

**Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article**

Jalolov, B. A., Mirzavaliyev, D. B., Qarshiyev, H. K., & Kamalova, I. M. (2026). Rux saqlovchi yoyli po‘lat eritish pechi changining tavsifi va qayta ishlash imkoniyatlari tahlili. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.1>

---