

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 4, 2025 vol. 2

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



SLIB.UZ
Scientific Library of Uzbekistan

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 2, ISSUE 4

DECEMBER, 2025



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 2, ISSUE 4 DECEMBER, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Mechanical and electrophysical properties of a composite obtained by high thermobaric treatment of W-Cu-Co-C material

Z.G. Mukhamedova¹^a, O.V. Ignatenko²^b, Sh.S. Fayzibaev¹^c, T.M. Tursunov¹^d,
T.T. Urazbaev¹^e, Sh.I. Mamaev¹^f

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

²Scientific and practical center for materials science of the national academy of sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract:

This study proposes a new method for the synthesis of cemented carbides in the tungsten carbide-cobalt (WC-Co) system under high pressure and high temperature (HPT) conditions. The aim of the research is to eliminate the problem of the balance of the relationship between hardness and strength in this two-component system. WC-Co composites were obtained by direct synthesis from elemental tungsten, carbon, and cobalt under thermobaric conditions, i.e., in the temperature range of 4~8 GPa and 1200~2200 °C, which allowed the formation of the WC phase and compaction to occur in one stage. After such analyses as structural XRD, SEM, and TEM, the results of the mechanical testing phase are reflected in the article. Mechanical tests were performed for such parameters as hardness, viscous fracture, abrasion resistance, and electrophysical properties - electrical resistance and magnetic saturation. WC-Co composites obtained at high pressure and temperature achieve hardness of 13~15 GPa and viscous fracture resistance of 12~14 MPa·m^{1/2}, exceeding the values characteristic of the WC-6Co class widely used in production, i.e., such indicators as hardness of 12~14 GPa and viscosity of 8~11 MPa·m^{1/2}. The results show that the synthesis of WC-Co can be proposed as an effective alternative to the traditional sintering technology, demonstrating the achievement of high density of the composite material, creating high mechanical properties and heat resistance of WC-Co materials of the same composition.

Keywords:

thermobaric synthesis, WC-Co composites, high-pressure-high-temperature (HPT) process, phase formation, cemented, carbides, mechanical properties, mechanical tests, electrophysical properties

W-Cu-Co-C tizimli materialni yuqori termobarik ishlov berish orqali olingan kompozitni mexanik va elektrofizik xossalari

Muxamedova Z.G.¹^a, Ignatenko O.V.²^b, Fayzibayev Sh.S.¹^c, Tursunov T.M.¹^d,
Urazbayev T.T.¹^e, Mamayev Sh.I.¹^f

¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent shahri, O'zbekiston

²Belarus milliy fanlar akademiyasining materialshunoslik ilmiy-amaliy markazi, Minsk, Belarus

Annotatsiya:

Ushbu tadqiqot volfram karbidi-kobalt (WC-Co) tizimida sementlangan karbidlarini yuqori bosim va yuqori harorat (YuBH) sharoitida sintez qilishning yangi usulini taklif etadi. Tadqiqotning maqsadi bu ushbu ikki komponentli tizimda qattqlik va mustahkamlik o'rtasidagi bog'liqlik muvozanat muammosini bartaraf etishdan iborat. WC-Co kompozitlari termobarik sharoitlarda ya'ni 4~8 GPa va 1200~2200 °C harorat intervalida elementar volfram, uglerod va kobaltdan to'g'ridan-to'g'ri sintez yo'li bilan tashkil qilinib olinib, bunda WC fazasining hosil bo'lishi va zichlanishning bir bosqichda amalga oshishiga imkon berdi. Strukturaviy XRD, SEM va TEM kabi tahlillardan so'ng, mexanik sinovlar o'tilgan boshqich natijalari maqolada aks ko'rsatilgan. Mexanik sinovlardan - qattqlikka, qovushqoq sinishga, ishqalanishga bardoshlilikga va elektrofizik xossalardan - elektr qarshilikka va magnit to'yinganlik kabi parametrlar uchun bajarilgan. Yuqori bosim va haroratda olingan WC-Co kompozitlar 13~15 GPa qattqlik va 12~14 MPa·m^{1/2} qovushqoq sinishga chidamlilik ko'rsatkichlariga erishilib ishlab chiqarishda keng qo'llanadigan WC-6Co sinfiga xos bo'lgan qiymatlardan, ya'ni 12~14 GPa qattqlik va 8~11 MPa·m^{1/2} qovushqoqlik kabi ko'rsatkichlardan yuqoridir. Natijalar shuni ko'rsatadiki, YUBH sintezi kompozit materialning yuqori zichlikka erishishini ko'rsatib, bir xil tarkibli WC-Co materiallarini yuqori mexanik xossalari va issiqlikka bardoshlikni hosil qiladi va an'anaviy sinterlash texnologiyasiga samarali alternativ jarayon sifatida taklif etilishi mumkin.

^a <https://orcid.org/0000-0002-1825-2447>

^b <https://orcid.org/0000-0002-4344-5072>

^c <https://orcid.org/0000-0003-1420-3581>

^d <https://orcid.org/0000-0002-6834-7356>

^e <https://orcid.org/0009-0006-1808-489X>

^f <https://orcid.org/0009-0002-6073-747X>



Kalit so'zlar: termobarik sintez, WC-Co kompozitlari, yuqori bosim-yuqori harorat (YUBH) jarayoni, faza hosil bo'lishi, sementitlangan, karbidlar, mexanik xossalari, mexanik sinovlar, elektrofizik xossalalar

1. Kirish

Volfram karbidi-kobalt (WC-Co) sementitlangan karbidlar yuqori qattqlik, yeyilishga chidamlilik va yetarli darajadagi qovushqoqlik kombinatsiyasi tufayli kesish, burg'ulash hamda tog'-kon va transport infratuzilmasida qo'llaniladigan asboblardan uchun eng muhim konstruksion materiallar sirasiga kiradi. Ayniqsa temir yo'l va yo'l qurilishi obyektlarida WC-Co asosidagi keskichlar va burg'ulash dolotalari qattiq tog' jinslari, beton va temir-beton bilan ishlashda yuqori yuklama va zarbaviy rejimlarda xizmat qiladi. Biroq amaliyotda ushbu asboblarning ishlash muddati ko'pincha "qattqlik-yoriqbardoshlik" o'rtasidagi klassik murosa bilan cheklanadi: qattqlikni oshirish yeyilishga chidamlilikni yaxshilaydi, ammo qovushqoqlikning pasayishi erta yorilish va sinishga olib kelishi mumkin. Bu esa tez-tez almashtirish, texnik xizmat ko'rsatishdagi tanaffuslar va ishlab chiqarish to'xtab qolishlari bilan bog'liq sezilarli iqtisodiy yo'qotishlarni keltirib chiqaradi.

So'nggi yillarda WC-Co tizimini takomillashtirishning asosiy yo'nalishlari bog'lovchi fazaga maqsadli ta'sir ko'rsatish bilan bog'liq bo'ldi. Xususan, kobalt bog'lovchisini nanostrukturalash yoki ikkilamchi fazalarni kiritish orqali mustahkamlik va termik barqarorlikni oshirish, yuqori haroratda ishlash ko'rsatkichlarini yaxshilash hamda egiluvchanlikni keskin yo'qotmaslik mumkinligi ko'rsatildi [9,10,11]. Bu borada dispersion qotish va nanotexnologiya yondashuvlari ayniqsa samarali ekanligi qayd etilmoqda. Shu bilan birga, an'anaviy kobalt bog'lovchisini yangi kompozit bog'lovchilar bilan almashtirish yoki modifikatsiyalash (masalan, B-N-Ti-Al tizimlariga mansub birikmalar asosida) bo'yicha tadqiqotlar ham olib borilib, natijada mexanik ko'rsatkichlarning yaxshilanishi qayd etildi [12,13].

Biroq WC-Co materiallari faqat mexanik xossalari bilan emas, balki ularning elektrofizik xossalari bilan ham sanoat amaliyoti uchun muhimdir. Masalan, elektr o'tkazuvchanlik (yoki solishtirma elektr qarshilik) asbob detallarini elektroeroziya bilan ishlov berish (EDM), elektr-kontakt jarayonlari, qizishning nazorati, shuningdek, xizmat jarayonida holat-monitoring (sensorlash) imkoniyatlari bilan bevosita bog'liq. WC donalari va Co bog'lovchining fazaviy tarkibi, taqsimlanishi, porozlik darajasi hamda donalar morfologiyasi nafaqat qattqlik va yoriqbardoshlikka, balki tok o'tish yo'llari (perkolyatsiya) va kontakt qarshiligiga ham kuchli ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun WC-Co kompozitlarini yaratishda "mikrostruktura → mexanik xossalalar" bilan bir qatorda "mikrostruktura → elektrofizik xossalalar" bog'lanishini ham kompleks baholash dolzarb hisoblanadi.

Ushbu ilmiy va sanoat motivlariga tayangan holda, mazkur ish WC-Co kompozitlarini olishning yangi yo'nalishini taklif etadi: bir vaqtning o'zida yuqori harorat va bosimdan foydalangan holda termobarik (YUBH) sharoitlarda WC-Co ni bir bosqichda sintez qilish va zichlashtirish. Yuqori bosimli, yuqori haroratli ishlov berish elementar komponentlardan WC ni to'g'ridan-to'g'ri (in situ) sintez qilishga imkon berib, fazaviy bir xillikni ta'minlaydi va mikrostrukturaning (don o'lchami, donlar morfologiyasi, bog'lovchi faza uzluksizligi) aniqroq

boshqarish imkonini yaratadi. Bu yondashuv bizning jamoamizning shunga o'xshash ekstremal sharoitlarda kubik bor nitridi va olmos kompozitlari kabi o'ta qattiq materiallarni sintez qilishdagi oldingi tajribalariga tayangan holda ishlab chiqildi. Bizning fikrimizcha, termobarik sintez sementlangan karbidlarda qattqlik va yoriqbardoshlik o'rtasidagi murosani yumshatish uchun istiqbolli yechim bo'lib, an'anaviy pishirish texnologiyalariga nisbatan ishlov vaqti hamda energiya sarfini qisqartirishi mumkin.

Mazkur maqolaning maqsadi — YUBH termobarik ishlov berish orqali olingan WC-Co kompozitlarining mexanik (qattqlik, yoriqbardoshlik va mikrostruktura bilan bog'liqlik) hamda elektrofizik (elektr o'tkazuvchanlik/solishtirma qarshilik va ularning fazaviy tarkib, porozlik hamda bog'lovchi faza holati bilan bog'lanishi) xossalari kompleks tahlil qilishdir. Tadqiqot natijalari yuqori samarali asboblardan xizmat muddatini uzaytirish, texnik xizmat ko'rsatishdagi tanaffuslarni qisqartirish va muhim tarmoqlarda iqtisodiy samaradorlikni oshirishga xizmat qilishi kutiladi. Shu bilan birga, ish ekstremal termodinamik sharoitlarda faza hosil bo'lishi va donlar morfologiyasining evolyutsiyasi haqida yangi ilmiy tushunchalarni boyitadi hamda sanoat miqyosida qo'llash uchun kengaytiriladigan sintez yondashuvlariga amaliy asos yaratadi.

2. Tadqiqot metodologiyasi

2.1. Tadqiqot maqsadi va vazifalari

Ushbu tadqiqotning maqsadi W-Co-C sistemasidagi birikmalarni, birinchi navbatda kobalt (Co) bog'lovchili volfram karbidi (WC-Co) kompozitlarini olishning yuqori haroratli va yuqori bosimli (YUBH) termobarik usulini ishlab chiqishdan iborat. Asosiy vazifa — yuqori qattqlik, yoriqbardoshlik va termik barqarorlikni birlashtirgan WC-Co kompozitlarining yangi sinfini olish, hamda sintez parametrlari (P-T-t) va tarkib (C/W va Co ulushi) o'zgarishining faza tarkibi va mikrostruktura ta'sirini aniqlashdir.

An'anaviy pishirishdan farqli o'laroq, bizning yondashuvimiz termobarik sintezga asoslanadi. Ekstremal bosim va harorat sharoitlari faza hosil bo'lish kinetikasini tezlashtiradi, porozlikni qisqa vaqt ichida kamaytiradi va mikrostrukturaning (don o'lchami, don morfologiyasi, bog'lovchi faza uzluksizligi) aniq nazorat qilish imkonini beradi. Ishning yangiligi shundan iboratki, bosim, harorat va ushlab turish vaqti hamda bog'lovchi ulushi o'zgarishining WC va ikkilamchi fazalar (W₂C yoki bog'lovchi karbidlar) o'rtasidagi muvozanatga ta'siri tizimli ravishda o'rganildi. Shu orqali kumun metallurgiyasining standart usullarida erishish qiyin bo'lgan "qattqlik-yoriqbardoshlik" kombinatsiyasiga ega qattiq qotishmalarni olish imkoniyati asoslanadi.

2.2. Boshlang'ich materiallar, aralashtirish va namuna tayyorlash

Boshlang'ich materiallar sifatida elementar volfram (W), kobalt (Co) va uglerod (grafit) kumunlari ishlatildi. Asosiy tarkib stexiometrik WC ga yaqin bo'lib, bog'lovchi faza ulushi odatda 6 wt.% Co qilib tanlandi; fazaviy sohalarni xaritalash va bog'lovchi ulushining ta'sirini baholash uchun Co miqdori 10 wt.% gacha o'zgartirildi



hamda C/W nisbati ataylab oz miqdorda ortiqcha yoki tanqis tomoniga siljitildi.

Kukunlar etanol muhitida WC sharli tegirmonida aralashtirildi, so'ng quritildi va kompozitsion birxillikni ta'minlash maqsadida elakdan o'tkazildi (agar qo'llangan bo'lsa). Tayyor aralashmalar 6–8 mm o'lchamli tabletkalar (kompaktlar) ko'rinishida presslandi. Bunday tayyorlash zarralararo kontakti yaxshilab, termobarik sintez paytida reaksiya va zichlanishning tez va bir maromda borishini ta'minlaydi.

2.3. Termobarik (YUBH) sintez qurilmasi va rejimlari

Sintez tajribalari 630 tonnagacha bo'lgan gidravlik presslar yordamida ishlaydigan yuqori bosimli toroidal qurilmada (NAS Belarus) amalga oshirildi. Bosim 4–8 GPa diapazonda qo'llanildi. Isitish ichki grafit/LaCrO₃ pechi orqali bajarildi; eng yuqori harorat diapazoni 1200–2200 °C (taxminan 1473–2473 K) ni tashkil etdi. Haroratning eng yuqori nuqtasida ushlab turish vaqti 30–120 s oralig'ida bo'ldi (ayrim tajriba sxemalarida ushlab turish 5 daqiqagacha kengaytirilgan). Ushlab turishdan keyin bosim ostida tez sovitish don o'sishini cheklash va metastabil mikrostrukturaviy holatlarni saqlash maqsadida qo'llanildi.

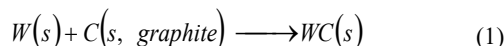
2.4. Termobarik sintezning fizik-kimyoviy mexanizmi

Termobarik sintez bosqichma-bosqich quyidagicha talqin qilinadi:

1. Bosim ostida zich kontakt hosil qilish uchun W–Co–C tabletkasi belgilangan bosimgacha siqiladi va bu zarrachalarning zich kontaktini ta'minlab, boshlang'ich g'ovaklikni keskin kamaytiradi.

2. Suyuq fazali pishish muhiting paydo bo'lishi uchun bosim ostida qizdirilganda kobalt komponenti eriydi (1 atm sharoitda Co ~1495 °C da eriydi; GPa bosimlarda erish harorati biroz ko'tarilishi mumkin) va W hamda C zarralari orasiga kirib, suyuq fazali pishish muhiti vazifasini bajaradi [14,15].

3. In situ karbidlanish va WC hosil bo'lishi. Volfram uglerod bilan reaksiyaga kirishib, yuqori bosim sharoitida bevosita WC hosil qiladi. Reaksiya quyidagicha ifodalanadi:



WC hosil bo'lish reaksiyasi ekzotermik bo'lib (atmosfera bosimida ($\Delta H = 38$) kJ/mol atrofida), suyuq Co mavjudligi uglerodning ko'chishini osonlashtirib, WC ning yadrolanishini (nukleatsiya) jadallashtiradi. Qo'yilgan bosim diffuziya uchun faollashtirish hajmini potensial kamaytiradi, g'ovaklarni yopadi va gazsimon qo'shimcha mahsulotlar hosil bo'lish ehtimolini bostiradi; shu sababli reaksiya atmosfera bosimida pishirishga nisbatan pastroq haroratlarda va juda qisqa vaqt ichida kechishi mumkin [16].

Zichlanish va mikrostrukturani "muzlatish" uchun suyuq kobalt g'ovaklarni to'ldirib, bir necha GPa yuklama ostida kompakti qisqa siklda yuqori zichlikka yaqinlashtiradi. Tez sovitish don o'sishini minimallashtiradi va hosil bo'lgan strukturani saqlab qoladi.

2.5. Tajriba smemasi va asosiy parametrlar

Sintez parametrlariga bog'liq ravishda faza hosil bo'lishi va mikrostrukturani tizimli o'rganish uchun W–Co–C namunalari turli sharoitlarda olindi [17]. Tajribalarda quyidagi o'zgaruvchilar ketma-ket o'zgartirildi:

- Bosim (P): 4, 6, 8 GPa;
- Eng yuqori harorat (T): masalan, 1400 K va 2000 K (hamda yuqori diapazondagi qiymatlar);
- Ushlab turish vaqti (t): 30 s dan 120 s gacha (ayrim tajribalarda 5 daqiqagacha);

- Tarkib: 6 wt.% Co va 10 wt.% Co; C/W nisbatining o'zina ortiqchasi yoki tanqisligi.

Ushbu tajriba sxemasi har bir omilning hosil bo'lgan fazalar (WC, W₂C va ehtimoliy bog'lovchi karbidlar), don o'lchami va morfologiyasi, bog'lovchi faza uzluksizligi hamda kompozit zichligiga ta'sirini alohida baholash imkonini berdi. Bunday yondashuv an'anaviy pishirishda mavjud bo'lmagan "tezkor optimallashtirish oynalari"ni ochadi va jarayon–struktur–xossa bog'lanishini chuqurroq tushuntirishga xizmat qiladi.

2.6. Strukturaviy, mexanik va elektrofizik xossalarni baholash (tavsif)

Olingan namunalar keyingi bo'limlarda keltiriladigan natijalarni olish uchun quyidagi yo'nalishlarda tavsiflandi:

— fazaviy tarkib: rentgenodifraksiya tahlil (XRD) yordamida WC ning hosil bo'lishi va ikkilamchi fazalar mavjudligi nazorati;

— mikrostruktura: SEM orqali don o'lchami, morfologiya va bog'lovchi faza taqsimoti; EDS bilan element taqsimoti; TEM bilan bog'lovchidagi nanocho'kindilar va interfeyslar;

— mexanik xossalari: qattqlik va yoriqbardoshlik ko'rsatkichlari;

elektrofizik xossalari: solishtirma elektr qarshilik/elektr o'tkazuvchanlik va ularning porozlik, bog'lovchi faza uzluksizligi hamda fazaviy tarkib bilan bog'liqligi.

3. Natija va muhokamalar

HPHT 3.1. Faza tarkibi va faza barqarorligi

YUBH sharoitida sintez qilingan barcha namunalar zich, yoriqsiz kompakt ko'rinishida bo'lib, XRD natijalari asosiy faza sifatida *geksagonal WC* hosil bo'lganini tasdiqladi. Reaksiyaga kirishmagan W yoki erkin grafit cho'qqilari asosiy rejimlarda kuzatilmadi. $P \geq 6$ GPa va $T \geq 1800$ K sharoitlarida difraktogrammalarda faqat WC va metall Co fazalari qayd etildi; η -fazalar aniqlanmadi, bu termobarik sintezning uglerod nomutanosibligiga nisbatan barqarorligini ko'rsatadi. Faqat pastroq haroratda va ataylab uglerod tanqisligi kiritilgan aralashmalarda W₂C izlari paydo bo'ldi, ya'ni jarayon stexiometriyaga sezgir bo'lsa-da, mo'rt η -fazalardan qochish imkoniyati saqlanib qoladi. Bu η -fazalarning yo'qligi WC–Co qattiq qotishmalarida sifat va xizmat ishonchligi uchun muhim. Bu natija YUBH siklining qisqaligi (sekundlar–daqiqalar) va yuqori bosim ostida reaksiya + zichlanishning bir vaqtda borishi bilan izohlanadi: η -fazaga olib keladigan uzoq diffuziyaviy qayta taqsimlanish jarayonlari cheklanadi.

Bosimning karbidlanish kinetikasiga ta'siri XRD orqali ham ko'rinadi: 4 GPa va 1600 K da qoldiq W cho'qqilari reaksiya to'liq yakunlanmaganini bildirsa, 6 GPa da W cho'qqilarining yo'qolishi yuqori bosimning WC hosil bo'lishini sezilarli tezlashtirishini isbotlaydi. Demak, bosim pastroq haroratlarda va an'anaviy pishirishga nisbatan qisqaroq sikllarda ham $W + C \rightarrow WC$ reaksiyasini samarali yakunlash imkonini beradi.

Yuqori bosim bu jarayonda ikki tomonlama rol o'ynaydi: (i) diffuziyani jadallashtirib reaksiya tezligini oshiradi; (ii) g'ovaklikni yopib, zarrachalar kontaktini kuchaytiradi va zichlanishni tezlashtiradi. Suyuq Co muhitida W va C ning ko'chishi osonlashgani uchun WC hosil bo'lishi "past-haroratli alternativ yo'l" orqali ham borishi mumkin. Bu jihat ultradispers kukunlarga tayangan an'anaviy yondashuvlarni to'ldiradi.



3.2. Mikrostruktura: don o'lchami, morfologiya va bog'lovchi faza (SEM/TEM)

SEM kuzatuvlari WC donalari uzluksiz kobalt bog'lovchi to'ri ichida bir tekis taqsimlanganini ko'rsatdi. Don o'lchami odatiy rejimlarda 2–5 μm bo'lib, sintez siklini boshqarish orqali don(ct) boshqarilishi kuzatildi: yuqori harorat/uzoqroq ushlab turish don yiriklashuviga olib keldi, qisqa sikllar esa 1–2 μm gacha mayda donli holatni saqlagan holda yuqori zichlikka erishish imkonini berdi.

WC donalarining muhim farqi — ularning yumaloq (sferoidal) morfologiyasidir; bu klassik suyuq fazali sinterlashda uchraydigan qirrali donlardan sezilarli farq qiladi. TEM tahlilida kobalt bog'lovchida W–C ga boy nanopretsipitatlar aniqlanib, bog'lovchi fazaning cho'ktirish orqali mustahkamlanishi (precipitation strengthening) mavjudligini ko'rsatdi. Grafit yoki η -fazalarning segregatsiyasi topilmadi, bu mikrostrukturaviy bir xillikni tasdiqlaydi.

Yumaloq don morfologiyasi don burchaklaridagi kuchlanish konsentratsiyasini kamaytirib, yoriqning boshlanishi va tarqalishiga qarshilikni oshiradi. Bundan tashqari, bog'lovchidagi nanopretsipitatlar Co matritsasini mustahkamlab, plastikli bittul yo'qotmasdan umumiy deformatsiyaga qarshilikni oshiradi. Shu bilan YUBH jarayonida "zich + bir xil + yumaloq donli + mustahkamlangan bog'lovchili" mikrostrukturaviy holat shakllanadi.

3.3. Mexanik xossalari: qattqlik, yoriqbardoshlik, yeyilish va yuqori haroratdagi xatti-harakat

Qattqlik sayqallangan kesmalarda Vickers izlari orqali HV30 o'lchandi. Yemirilish qovushqoqligi yuqori yuklama 500 N ostida hosil bo'lgan yoriqlar uzunligi bo'yicha Antis nisbatidan foydalanib baholandi. Abraziv yeyilishga chidamlilik quruq qum–rezina g'ildirakli qurilma (ASTM G65 turi) bilan tekshirildi. Shuningdek, kesish sharoitiga yaqin baho berish uchun 500 $^{\circ}\text{C}$ gacha bo'lgan haroratlarda qattqlikning cheklangan o'lchovlari bajarildi. Namuna geometriyasi cheklanganligi sababli uch nuqtali egilish barcha holatlarda to'liq bajarilmagan; shu bois qovushqoqlikning asosiy baholari indentatsion yemirilish mexanikasi va yoriqlarning sifatli xatti-harakatlari bilan to'ldirildi.

Natijalarga ko'ra, qattqlik $\sim 12\text{--}15\text{ GPa}$ diapazonda o'zgardi va bu don o'lchami kichrayishi bilan qattqlik ortishini ko'rsatuvchi Xoll–Petch tendensiyasiga mos keladi. Don yiriklashuvi qattqlikni pasaytirdi, biroq ko'rsatkichlar sanoatdagi yirik donali markalar bilan raqobatdosh bo'lib qoldi. Eng muhim natija — yemirilish qovushqoqligining $12\text{--}14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ gacha oshganidir; bu oddiy WC–6Co qotishmalaridagi tipik $8\text{--}11\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ diapazondan sezilarli yuqoridir. Yoriqlarning Co bog'lovchisi hisobiga og'ishi va yopilishi kuzatilishi buni mexanistik jihatdan tasdiqlaydi. Abraziv yeyilish sinovlari tijorat WC–Co markalariga taqqoslanadigan yoki undan yuqori qarshilikni ko'rsatdi, termik barqarorlik esa $\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha barqaror xatti-harakat bilan tasdiqlandi.

Qattqlikning ortishi mayda donli, zich tuzilma bilan bog'liq bo'lib kichik donlar dislokatsiya harakatini cheklab, mustahkamlik va qattqlikni oshiradi. Shu bilan birga, yumaloq WC donalari stress konsentratsiyasini pasaytiradi, uzluksiz Co bog'lovchi esa yoriq yo'lini qayta yo'naltiradi va energiya yutishini kuchaytiradi. Natijada qattqlik oshgan holda ham yoriqbardoshlik yuqori darajada saqlanadi — ya'ni klassik murosa yumshatiladi.

3.4. Elektrofizik xossalari: elektr qarshilik, harorat ko'effitsiyenti va magnit to'yinganlik

WC–Co kompozitlarining solishtirma elektr qarshiligi 300–800 K oralig'ida to'rt nuqtali zond usuli bilan o'lchandi. WC ham, Co ham o'tkazuvchan bo'lgani sababli, elektr qarshilik, avvalo, Co bog'lovchi fazaning uzluksizligi, fazalar nisbati va bog'lovchining kimyoviy holatini aks ettiradi. Elektronlarning sochilish (scattering) effektlarini baholash uchun qarshilikning harorat ko'effitsiyenti aniqlanib, tok tashuvchilarning tarqalish mexanizmlariga doir bilvosita ma'lumot olindi.

Tanlangan namunalar uchun magnit to'yinganlik bog'lovchida eritilgan W miqdorining bilvosita indikator sifatida qayd etildi. Magnit to'yinganlikning pasayishi Co bog'lovchida W/C ning ortiqchaligi (bog'lovchining boyitilishi) bilan mos keladi va amaliyotda η -fazaning yuzaga kelishi bilan bog'liq xavfli baholashda keng qo'llaniladigan sifat nazorati ko'rsatkichidir [18,19].

Natijalar shuni ko'rsatdiki, solishtirma elektr qarshilik $\sim 15\text{--}20\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$ bo'lib, etalon namunalarga nisbatan biroz yuqoriroq. Bu bog'lovchi tarkibida W ning erishi va bog'lovchida qo'shimcha sochilish markazlarining paydo bo'lishi bilan mos keladi. Magnit to'yinganlikning kamayishi ham ushbu talqinni qo'llab-quvvatlab, bog'lovchining kimyoviy boyitilganligini tasdiqladi.

Elektrofizik ko'rsatkichlar (qarshilik va uning haroratga bog'liqligi) bilan magnit to'yinganlikni birgalikda tahlil qilish YUBH jarayonida bog'lovchi fazaning kimyoviy holatini "tez va bilvosita" nazorat qilish imkonini beradi. Bu WC–Co tadqiqotlari uchun nisbatan g'ayrioddiy, ammo juda foydali yondashuv: u faza barqarorligi, bog'lovchi boyitilishi va xizmat xossalari o'rtasida to'g'ridan-to'g'ri bog'lanish o'rnatadi. Eng muhimi, η -fazalar kuzatilmagan sharoitlarda magnit to'yinganlik va qarshilikdagi o'zgarishlar bog'lovchining mustahkamlanishi (masalan, W–C nanopretsipitatlar) va tok tashuvchilar yo'lining murakkablashuvi bilan izohlanishi mumkin.

3.5. Elektrofizik xossalari: elektr qarshilik, TCR va magnit to'yinganlik

WC–Co kompozitlarining solishtirma elektr qarshiligi 300–800 K oralig'ida to'rt nuqtali zond usuli bilan o'lchandi. WC ham, Co ham o'tkazuvchan bo'lgani sababli, o'lchangan $\rho(T)$ asosan tok o'tish yo'llarining mikrostrukturaviy uzluksizligi va bog'lovchi fazaning kimyoviy holatini aks ettiradi. Elektronlarning sochilish (scattering) effektlarini baholash maqsadida qarshilikning harorat ko'effitsiyenti (TCR) ham aniqlandi.

Tanlangan namunalar uchun magnit to'yinganlik Co bog'lovchida W ning erigan miqdoriga bilvosita indikator sifatida qayd etildi. Magnit to'yinganlikning pasayishi bog'lovchi fazaning W/C bilan boyitilganligini ko'rsatadi va amaliyotda η -fazaga moyillik bilan bog'liq sifat nazorat ko'rsatkichlaridan biri hisoblanadi [18,19].

Olingan kompozitlarda solishtirma elektr qarshilik $\rho \sim 15\text{--}20\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$ bo'lib, etalon (tijorat) WC–6Co namunalarga nisbatan biroz yuqoriroq qayd etildi. Magnit to'yinganlikning kamayishi ham bog'lovchida W eriganligini ko'rsatib, ushbu talqinni qo'llab-quvvatladi.



1-jadval
WC-Co kompozitlarining mexanik xossalari qiyosiy tahlil qilish

Material lar	Ishlov berish usuli	Qattiq ligi (GPa)	Mustahkam ligi (MPa·m ^{1/2})	Yeyilish ga chidamli ligi
Tijoriy WC-6Co (standart nav)	Oddiy pishirish	12-14	8-11	O'rtacha
WC-6Co (mayda donli tijoriy nav)	Suyuq fazada sinterlash	13-14	8-10	Yaxshi
YUBH-sintez qilingan WC-6Co	Yuqori bosimli, yuqori haroratli sintez	13-15	12-14	Yuqori (≥ tijoriy)

WC-Co kompozitlarida elektr o'tkazuvchanlik odatda Co bog'lovchi faza tarmog'i orqali perkolyatsion yo'l bilan ta'minlanadi: bog'lovchi uzluksiz bo'lsa tok yo'li "uzluksiz" shakllanadi, uzluksizlik buzilganda (mikroqovaklik, bog'lovchi "bo'linishi", fazaviy nomutanosiblik) ρ ortadi. YUBH sintezda namunalarning yuqori zichligi bog'lovchi yo'llarining uzluksizligini qo'llab-quvvatlashi kerak, biroq shu bilan birga, Co ichida W ning erishi va TEMda kuzatilgan W-C nanopretsipitatlar elektron sochilishini kuchaytirib, ρ ni oshirishi mumkin. Demak, ρ ning biroz yuqori qiymatlari porozlikdan ko'ra ko'proq bog'lovchining kimyoviy boyitilishi va dispers mustahkamlanishi bilan bog'liq bo'lishi ehtimol. Magnit to'yinganlikning pasayishi va ρ ning ortishi birgalikda YUBH jarayonida bog'lovchi tarkibi boshqariladigan tarzda o'zgarganini ko'rsatadi; bu esa mexanik xossalarning (xususan, yoriqbardoshlikning) oshishi bilan mantiqan uyg'un keladi.

Har bir sintez sharoiti uchun kamida uchta mustaqil namuna tayyorlandi. Qattqlik va yoriqbardoshlik qiymatlari har bir sharoit uchun kamida 10 ta indentatsiya natijasi bo'yicha o'rtachalashtirildi va standart og'ishlar keltirildi. Yeyilishga chidamlilik sinovlari uch seriyada takrorlandi, xatoliklar grafiklarda ko'rsatildi. Bunday yondashuv natijalarning takrorlanuvchanligini ta'minlaydi va parametrlar ta'siridagi tendensiyalarni statistik jihatdan ajratib ko'rsatish imkonini beradi. Qiyosiy etalon sifatida adabiyotlarda keng keltiriladigan sanoat WC-6Co markalari ma'lumotlari qabul qilindi.

Termobarik usulda sintez qilingan W-Co-C kompozitlarining mexanik xususiyatlarini baholash uchun biz natijalarni boshqa ma'lum pishirish usullari, shu jumladan uchqunli plazma pishirish (SPS), issiq presslash va an'anaviy kukun metallurgiyasi yordamida tayyorlangan kompozitlar bilan taqqosladik. 1-jadvalda adabiyotlarda keltirilgan qattqlik, yorilishga chidamlilik va yeyilishning qiyosiy qiymatlari keltirilgan. Termobarik usul yuqori qattqlik va raqobatbardosh yoriqbardoshlikni yaqqol

namoyish etadi, bu esa uning yuqori samarali asbobsozlik materiallarini ishlab chiqish imkoniyatlarini ko'rsatadi.

2-jadval
Turli usullar bilan sintez qilingan W-Co-C kompozitlarining mexanik xossalari qiyosiy baholash.

Sintezlash usuli	Qattqlik (GPa)	Mustahkamlik (MPa·m ^{1/2})	Yeyilishdagi yo'qotish (mm ³ /N·m)
Termobarik	18,2±0,5	6,8±0,3	2,4×10⁻⁵
Lee va boshqalar. (2018) [15]	14,2±0,3	5,1±0,3	4,8×10 ⁻⁵
Wang va boshqalar. (2017) [16]	15,7±0,2	5,5±0,1	3,6×10 ⁻⁵
Zhang va boshqalar. (2020) [17]	16,5±0,4	5,9±0,2	3,1×10 ⁻⁵

4. Xulosa

An'anaviy suyuq fazali sinterlash orqali olinadigan WC-Co tijorat kompozitlari odatda 12–14 GPa qattqlik va 8–11 MPa·m^{1/2} yoriqbardoshlikka erishadi; hatto mayda donador/nanostrukturali markalarda ham yoriqbardoshlik ko'pincha 11 MPa·m^{1/2} dan oshmaydi. Ushbu ishda esa YUBH termobarik sintez klassik murosani sezilarli darajada yumshatib, 13–15 GPa qattqlik va 12–14 MPa·m^{1/2} yoriqbardoshlikni barqaror ta'minlashi ko'rsatildi. Bu natijalar YUBH orqali olingan WC-Co materiallarini premium tijorat brendlari bilan taqqoslanadigan yoki ulardan ustun bo'lishi mumkin bo'lgan "yangi avlod qattiq qotishmalari" toifasiga kiritishga asos beradi.

Bundan tashqari, η -fazalarning hosil bo'lmashligi hamda termik barqarorlikning yaxshilanishi ushbu kompozitlarning qo'llanish doirasini kengaytiradi. Masalan: chuqur qazib olish va og'ir burg'ilash sharoitlaridan tortib, an'anaviy markalar cheklangan bo'lishi mumkin bo'lgan aerokosmik qayta ishlash jarayonlarigacha. Mayda donador, ixcham mikrostruktura bilan bog'liq mustahkamlik va chidamlilikning oshishi YUBH usulida olingan WC-Co materiallarining kesuvchi va parmalash asboblari yuqori sanoat salohiyatini tasdiqlaydi. Kelgusida tadqiqotlar sintezni kattaroq kompaktlar darajasiga kengaytirish hamda sanoatga tatbiq etish maqsadida gibrid bog'lovchi tizimlarni o'rganishga qaratiladi.

Foydalangan adabiyotlar / References

- [1] V. I. Tretyakov. Fundamentals of metallurgy and sintered hard alloy production technology. Metallurgy, 1976.
- [2] V. S. Panov, A. M. Chuvilin, and V. A. Falkovsky. Technology and properties of sintered hard alloys. MISIS Publishing, 2004.
- [3] A. S. Kurllov, A. A. Rempel, and Y. V. Blagoveshchensky. "Hard alloys WC-6 wt% C and WC-10 wt% C based on nanocrystalline powders". In: Doklady Akademii Nauk 439.2 (2011), pp. 215 – 220. DOI: 10.1134/S0012500811070068.



[4] V. A. Falkovsky and L. I. Klyachko. Hard alloys. Ruda i Metally Publishing, 2005.

[5] Konyashin. "Cemented carbides for mining, construction and wear parts". In: Comprehensive Hard Materials. Ed. by V. Sarin. Elsevier, 2014, pp. 425–451. DOI: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00015-5

[6] R.-P. Herber, W.-D. Schubert, and B. Lux. "Hardmetals with 'rounded' WC grains". In: International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 24 (2006), pp. 360–364. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.014

[7] Z. Xiao et al. (2023). Spark Plasma Sintering of Fine-Grained WC-Co Composites. Materials, 16(24), 7526. DOI: 10.3390/ma16247526.

[8] Akerman and T. Ericson. Cemented carbide body with improved high temperatures and thermomechanical properties. US Patent No. 6,126,709. 1997.

[9] H. Doi and K. Nishigaki. "Binder phase strengthening through precipitation of intermetallic compound in titanium carbide base cermet with high binder concentration". In: Modern developments in powder metallurgy. Vol. 11. 1977, p. 525.

[10] Nishigaki, H. Yoshimura, and H. Doi. "Effect of aluminum nitride additions on the mechanical and cutting properties of Ti(C0.7N0.3)–15Ni–8Mo alloy". In: Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy 27 (1980), p. 50.

[11] E. Hornbogen. "Dispersion hardening – the oldest nanotechnology". In: Metall 55 (2001), p. 522.

[12] S. Fayzibaev, O. Ignatenko, and T. Urazbaev. "Development of binding based on B–N–Ti–Al system compounds for creating a composite instrumental material for final training of railway parts". In: E3S Web of Conferences 264 (2021), p. 04073. DOI: 10.1051/e3sconf/202126404073.

[13] S. Fayzibaev et al. "Development of a technique for the formation of Ti–Al system compounds under high pressures and temperatures". In: AIP Conference Proceedings 3045.1 (2024). DOI: 10.1063/5.0197358.

[14] Ferro-Tic. Cemented carbide hardness data sheet. Retrieved from <https://www.ferro-tic.com>. 2025.

[15] A. Lee, S. Kumar, and R. Smith. "Sintering behavior and mechanical properties of WC–Co composites fabricated by conventional powder metallurgy". In: Materials Research Bulletin 102 (2018), pp. 123–130. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.01.037.

[16] Z. Wang, H. Liu, and J. Zhao. "Microstructure and mechanical properties of WC–Co cemented carbides fabricated by hot pressing". In: Ceramics International 43.17 (2017), pp. 14830–14836.

[17] Y. Zhang, H. Li, and T. Zhou. "Microstructure and mechanical properties of WC–Co composites consolidated by spark plasma sintering". In: International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 88 (2020), p. 105300. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105300.

[18] Fayzibaev, S., Ignatenko, O., & Urazbaev, T. (2021). Development of binding based on b–n–ti–al system compounds for creating a composite instrumental material for a final raining of railway parts. E3S Web of Conferences, 264. DOI: 10.1051/e3sconf/202126404073.

[19] Fayzibaev, S., Ignatenko, O., Mamayev, S., Urazbayev, T., & Nafasov, J. (2024). Development of a technique for the formation of Ti–Al system compounds under the influence of high pressures and temperatures. AIP Conference Proceedings, 3045(1). DOI: 10.1063/5.0197358

[20] Tursunov, T., Tursunov, N., & Urazbayev, T. (2023). Investigation of heat exchange processes in the lining of induction furnaces. E3S Web of Conferences, 401. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105029>

[21] Urazbayev, T., Tursunov, N., & Tursunov, T. (2024). Steel modification modes for improving the cast parts quality of the rolling stock couplers. AIP Conference Proceedings, 3045(1). <https://doi.org/10.1063/5.0197361>

Mualliflar to'g'risida ma'lumot/ Information about the authors

Muxamedova Ziyoda	Toshkent davlat transport universiteti, "Yuk transport tizimi"
Gafurdjanovna / Ziyoda	kafedrası professori, t.f.d. E-mail: mziyoda@mail.ru
Mukhamedova	Tel.: +998 90 329 83 00 https://orcid.org/0000-0002-1825-2447
Ignatenko Oleg Vladimirovich / Oleg Ignatenko	"Belarus milliy fanlar akademiyasining materialshunoslik ilmiy-amaliy markazi", Bosh direktor o'rinbosari, t.f.d. professor, E-mail: ignatenko@physics.by Tel.: +375293895874 https://orcid.org/0000-0002-4344-5072
Fayzibaev Sherzod Sabirovich / Sherzod Fayzibaev	Toshkent davlat transport universiteti, "Lokomotivlar va lokomotiv xo'jaligi" kafedrası professori, t.f.d. E-mail: sherzod_fayzibaev@mail.ru Tel.: +99890 174 11 12 https://orcid.org/0000-0003-1420-3581
Tursunov Toxir Muratjonovich / Tokhir Tursunov	Toshkent davlat transport universiteti, "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrası dotsenti v.b, PhD E-mail: t.tursunov87@gmail.com Tel.: +998974000426 https://orcid.org/0000-0002-6834-7356
Urazbayev Talgat Tileubayevich / Talgat Urazbaev	Toshkent davlat transport universiteti, "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrası dotsenti v.b, PhD E-mail: talgat_1988.26@mail.ru Tel.: +998974301088 https://orcid.org/0009-0006-1808-489X
Mamayev Sherali Ibroximovich / Sherali Mamayev	Toshkent davlat transport universiteti "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrası professori v.b, PhD E-mail: mamayevsherali@gmail.com Tel.: +998909687427 https://orcid.org/0009-0002-6073-747X



D. Tuychieva, O. Obidov

Disinfection of grain from pests under the influence of ultra-high frequency radiation.....212

D. Tuychieva, O. Obidov

Wear resistance of the active working components of a rotary-cultivator and its impact on agrotechnical performance indicators.....219

A. Raxmonberdiev

Impact of overvoltages on the railway automation and remote control equipment of “Uzbekistan railways” joint stock company.....223

A. Dadasheva

Characteristics of public control in Uzbekistan: problems and their solutions.....232

N. Hojiev

The influence of hot dry climate on volumetric deformations of concrete.....237

E. Khidirov

Development of mathematical models for monitoring and control of train derailment.....240

Z. Mukhamedova , O. Ignatenko, Sh. Fayzibaev,**T. Tursunov, T. Urazbaev, Sh. Mamaev**

Structural analysis of the W-Cu-Co-C system composite by the synthesis method at high pressure and temperature.....246

Z. Mukhamedova , O. Ignatenko, Sh. Fayzibaev,**T. Tursunov, T. Urazbaev, Sh. Mamaev**

Mechanical and electrophysical properties of a composite obtained by high thermobaric treatment of W-Cu-Co-C material.....252