

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.

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

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

² Scientific 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 system under conditions of high pressure and high temperature (HTS). 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. Structural analysis and testing were carried out in scientific research, in which the results of X-ray diffraction - structure of the crystal lattice, phase composition and average particle size and scanning electron microscopy (SEM) - microstructure of the material surface, particle shape and size, defects, as well as transmission electron microscopy (TEM) - crystallographic data were presented. The obtained WC-Co composites were scientifically investigated to achieve high hardness >13 GPa and high viscosity (>12 MPa·m^{1/2}). It is intended to achieve physical values characteristic of the common WC-6Co class widely used in production.

Keywords: thermobaric synthesis, WC-Co composites, high-pressure-high-temperature (HPT) process, phase formation, cementation, phase composition, surface microstructure, structural analysis, properties

Yuqori bosim va haroratda sintez usuli bilan W-Cu-Co-C tizimli kompozitning strukturaviy tahlili

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

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

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

Annotatsiya: Ushbu tadqiqot volfram karbidi-kobalt tizimida sementitlangan 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 olinib, bunda WC fazasining hosil bo'lishi va zichlanishning bir bosqichda amalga oshishiga imkon berdi. Strukturaviy tahlil va sinovlari ilmiy tadqiqotda o'tazilib, bunda rentgen difraksiyasi (X-ray diffraction) - kristall panjaraning tuzilishi, fazalar tarkibi va donachalarning o'rtacha o'lchami, skanerlovchi elektron mikroskopiya (Scanning electron microscopy) - material yuzasining mikrostrukturasi, donachalar shakli va o'lchami, nuqsonlar, hamda transmissiya elektron mikroskopiya (Transmission Electron Microscopy) - kristallografik ma'lumotlarning natijalari keltirib o'tilgan. WC-Co olinagan kompozitlar yuqori qattqlikka >13 GPa va yuqori qovushqoqlik (>12 MPa·m^{1/2}) ko'rsatkichlariga erishish uchun ilmiy olib borilgan. Bu ishlab chiqarishda ommabod qo'llanadigan odatdagi WC-6Co sinfiga xos bo'lgan fizik qiymatlarga erishish ko'zda tutilgan.

Kalit so'zlar: termobarik sintez, WC-Co kompozitlari, yuqori bosim-yuqori harorat (YuBH) jarayoni, faza hosil bo'lishi, sementitlangan, fazalar tarkibi, yuzasining mikrostrukturasi, strukturaviy tahlil, xossalalar

^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>



1. Kirish

Volfram karbidi – kobalt asosli kompozit material o'z ichida yuqori qattqlik va zarbaga nisbatan yetarli qovushqoqlik xossalari uyğunlashtiradi. Biroq ushbu xossalarda o'rtasidagi optimal muvozanatga erishish hanzgacha murakkab masala bo'lib qolmoqda, chunki ulardan birini yaxshilash ko'pincha boshqasining yomonlashuviga olib keladi. Masalan, kobalt miqdorini oshirish sinish qovushqoqligini oshiradi, ammo qattqlikni pasaytiradi; WC donalari mayda qilish esa qattqlikni oshirsada, qovushqoqlikni kamaytirishi mumkin [1–4]. An'anaviy sintirlash texnologiyalarida ushbu "qattqlik–qovushqoqlik" murosasi ayniqsa tog' jinslarini burg'ulash kabi sovetmasiz, yuqori yuklama ostidagi keskichlarda keskin namoyon bo'ladi.

Shu bois, so'nggi yillarda tadqiqotchilar volfram karbidi – kobalt (WC–Co) tizimida aynan mikrostrukturani boshqarish orqali xossalarni optimallashtirishga alohida e'tibor qaratmoqdalar. Mikrostrukturaviy optimallashtirish shuni ko'rsatadiki, yirikroq WC donalari sinish qovushqoqligi va yorilishga chidamliligini oshirishi, biroq qattqlikni biroz pasaytirishi mumkin. Shu sababli don o'lchamining bir xilligiga erishish yeyilishga chidamlilikni saqlashda muhim omil hisoblanadi [5]. Don shakli va morfologiyasini boshqarish ham sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Masalan: texnologik qo'shimchalar yoki jarayon parametrlarini aniq nazorat qilish natijasida hosil bo'lgan sferik yoki yumaloq WC donalari kuchlanish konsentratsiyalarini kamaytirib, qattqlik va qovushqoqlik o'rtasidagi muvozanatni yaxshilashi mumkin [6–8].

Yana bir muhim yo'nalish – bog'lovchi faza (Co) ning strukturasi o'zgartirishdir. Kobalt bog'lovchisini nanostrukturallash, uni legirlash yoki ikkilamchi fazalarni kiritish orqali bog'lovchi fazaning mustahkamligi va termik barqarorligini oshirish, yuqori haroratlarda ishlash qobiliyatini yaxshilash hamda egiluvchanlikni saqlab qolish mumkin [9–11]. Bu borada dispersion qotish, nanotuzilmali bog'lovchilar hosil qilish kabi yondashuvlar samarali ekani ko'rsatilgan. Shu bilan birga, so'nggi tadqiqotlarda an'anaviy kobalt bog'lovchisini murakkab kompozit tizimlar (masalan, B–N–Ti–Al asosidagi birikmalar) bilan almashtirish yoki qisman o'zgartirish orqali mexanik xossalarni sezilarli darajada yaxshilashga erishilgan [12,13]. Biroq bu usullar ko'pincha ko'p bosqichli texnologik sikllar, qo'shimcha legirlovchi komponentlar va qimmatbaho ishlov berish rejimlarini talab qiladi hamda qattqlik–qovushqoqlik muvozanatini to'liq bartaraf eta olmaydi.

Ushbu ma'lumotlarga tayangan holda, bizning tadqiqotimiz WC–Co kompozitlarining strukturaviy holatini boshqarish bo'yicha yangi yo'nalishni taklif etadi: yuqori bosim va yuqori harorat ta'siri ostida WC–Co tizimini bir bosqichda sintez qilish va zichlashtirishga asoslangan termobarik (YUBH) sintez usuli. Yuqori bosim–yuqori harorat (YUBH) sharoitlari elementar komponentlardan WC fazasini bevosita hosil qilish bilan birga, fazalar bir xilligini ta'minlash, go'vaklikni kamaytirish va WC donalari hamda Co bog'lovchi fazasi o'rtasidagi interfeys strukturasi nazorat qilishga imkon beradi. Bu yondashuv ilmiy ishimizda o'ta qattiq materiallar YUBH sharoitlari natijasida yuqori darajada zich, barqaror va bir jinsli mikrostruktura hosil qilingani ko'rsatilgan.

Mazkur ishning yangiligi, bir tomondan, WC–Co tizimiga termobarik sintezni qo'llashda namoyon bo'ladi: bu usul oldindan uglerodlash yoki uzoq muddatli pishirish

sikllarisiz, bevosita "in-situ" WC fazasini hosil qilish va bir vaqtning o'zida kompakti zichlashtirish imkonini beradi. Ikkinchi tomondan, bosim ostida donlarning sferoidlanishi, WC donalari taqsimotining bir jinslilashuvi va Co bog'lovchi fazasining strukturaviy mustahkamlanishi natijasida qattqlik va sinish qovushqoqligi an'anaviy WC–6Co qattiq qotishmalari uchun adabiyotlarda keltirilgan qiymatlardan yuqoriga ko'tarilishi mumkinligi taxmin qilinadi. WC–Co kompozitlari uchun mikrostruktura nazorati, fazaviy tarkib barqarorligi va yuqori xossalarni muvozanatining bunday noyob kombinatsiyasi ilgari yetarli darajada qayd etilmagan bo'lib, bu jarayonni mavjud tijorat materiallari bilan global miqyosda raqobatbardosh qilishi mumkin.

Nihoyat, boshlang'ich komponentlar sifatida elementar W, C va Co ni tanlash termobarik sharoitda bevosita in-situ WC fazasini hosil qilishga imkon beradi. Bu esa oldindan tayyorlangan karbid kukunlaridan foydalanish zaruratini bartaraf etadi, fazalar tarkibi va don morfologiyasini yanada aniq nazorat qilish, Co bog'lovchi fazasining uzluksiz tarmog'ini shakllantirish, go'vaklik va ikkilamchi noxush fazalar miqdorini kamaytirish imkonini beradi. Keyingi boblarda yuqori bosim va haroratda sintez qilingan WC–Co kompozitlarining strukturaviy holati XRD, SEM va TEM kabi usullar yordamida tahlil qilinib, mikrostrukturaviy xususiyatlar bilan mexanik xossalarda o'rtasidagi bog'liqlik batafsil o'rganiladi.

2. Tadqiqot metodologiyasi

Boshlang'ich materiallar va tarkibni tanlash

Tadqiqotda boshlang'ich xomashyo sifatida elementar volfram (W), kobalt (Co) va uglerod (grafit) kukunlari qo'llanildi. Asosiy tarkib stexiometrik WC ga yaqin bo'lib, bog'lovchi faza sifatida 6% Co (massa ulushi) qabul qilindi. Bundan tashqari, WC–Co tizimidagi fazaviy sohalarini va "uglerod oynasi" (C/W nisbati) ta'sirini baholash maqsadida C/W nisbati hamda Co miqdori (10% gacha) tizimli ravishda o'zgartirildi. Bunday yondashuv yuqori bosim–harorat sharoitida hosil bo'ladigan fazalarning barqarorligi, bog'lovchi holati va donalar evolyutsiyasini xaritalash imkonini beradi.

Kukunlarni tayyorlash, aralashtirish va presslash

W–C–Co kukun aralashmalari etanol muhitida WC sharli tegirmonida aralashtirildi. Aralashtirishdan so'ng suspenziya quritildi va granulatsiya holatiga keltirildi. Quruq kukunlar 6–8 mm diametrlilik tabletkalar ko'rinishida presslandi. Aralashtirishning maqsadi komponentlarning bir tekis taqsimlanishini ta'minlash, reaksiya yo'lini qisqartirish va sintez vaqtida diffuziya masofalarini kamaytirishdan iborat.

Termobarik (HPHT) sintez uskunasi va rejimlari

WC–Co kompozitlarini bir bosqichda sintez qilish va zichlash jarayoni yuqori bosimli toroidal qurilmada (NAS Belarus) 630 tonnagacha bo'lgan gidravlik press yordamida amalga oshirildi. Ish rejimlari quyidagicha tanlandi:

Bunda - bosim 4–8 Gpa, harorat: 1200–2200 °C. Eng yuqori ushlab turish vaqti: 30–120 s. Isitish ichki grafit/LaCrO₃ pechi orqali bajarildi. Yuqori bosim ostida tez sovitish donalarning o'sishini minimallashtirib, metastabil mikrostrukturaviy holatlarni saqlash imkonini berdi. Bunday qisqa vaqtli, lekin intensiv termobarik ta'sir an'anaviy pishirishga nisbatan energiya va vaqt sarfini kamaytirishi bilan ham ahamiyatlidir.



Sintez mexanizmi va jarayon bosqichlari va termobarik ishlov jarayoni konseptual jihatdan quyidagi ketma-ket bosqichlarni o'z ichiga oladi:

(a) Yuqori haroratda reaksiya va suyuq fazaning hosil bo'lishi, qizdirishda kobalt erib, suyuq fazali bog'lovchi vazifasini bajaradi. Shu vaqtda volfram uglerod bilan reaksiyaga kirishib WC fazasini hosil qiladi. Yuqori bosim reaksiya muhitini "qattiqlashtirib", gazli mahsulotlar ehtimolini pasaytiradi hamda diffuziya jarayonlarini faollashtiradi.

(b) Zichlanish (reaksion sinterlash), suyuq kobalt g'ovaklarni to'ldiradi va bir necha GPa yuklama ostida kompakt material uzoq pishirishsiz yuqori zichlikka yaqinlashadi. Bu bosqichda yakuniy porozlik darajasi va bog'lovchining uzluksizligi shakllanadi.

(c) Nazoratli sovitsish va mikrostrukturani "muzlatish", ushlab turishdan so'ng namunalar tez sovutilib, bosim tushiriladi va yig'ma germetikligi ochiladi. WC fazasi barqaror saqlanadi, ayrim rejimlarda esa kobaltning o'ta to'yingan holati natijasida juda mayda karbid cho'kindilari paydo bo'lishi mumkin (bog'lovchini mustahkamlovchi dispersiya effekti).

Parametrlarni tizimli o'zgartirish va tajriba sxemasi

Tajribalarda bosim (P), harorat (T), ushlab turish vaqti (t) hamda Co ulushi ketma-ket va tizimli ravishda o'zgartirildi. Bunday parametrik xaritalash quyidagilarni baholash imkonini berdi:

- faza tarkibi va faza barqarorligi (WC, W₂C va h.k. ehtimoli);
- donalar o'lchami va uning o'sish kinetikasi;
- zichlanish darajasi va qoldiq porozlik;
- bog'lovchi faza taqsimoti va mikrostrukturaviy bir xillik.

Namuna tayyorlash (strukturaviy tahlil uchun)

Sintezdan so'ng namunalar kesildi, sirlari ketma-ket silliqqlanib-polirovka qilindi. Mikrostruktura kuzatuvlari uchun zarur bo'lsa selektiv kimyoviy ishlov (bog'lovchini ochish) yoki ionli tozalash kabi tayyorlash usullari qo'llanadi. TEM uchun esa yupqa folga tayyorlash odatda mexanik yupqatish va ionli silliqqlash yoki FIB orqali bajariladi.

Strukturaviy va fazaviy tahlil usullari

Rentgen difraksiyon tahlil (XRD) bo'yicha - namunalarning faza tarkibi aniqlanadi, WC ning kristall panjarasi parametrlari va begona fazalar mavjudligi tekshiriladi. Zarurat bo'lsa, difraktogrammlar orqali qayta ishlanib fazalar miqdoriy ulushi baholanadi. Cho'qqilar kengayishidan foydalanib kristallit o'lchami va mikrodeformatsiya (Scherrer yoki Williamson-Hall yondashuvi) hisoblanishi mumkin.

Skaner qiluvchi elektron mikroskopiya (SEM) va element tahlili (EDS) bo'yicha - SEM yordamida donalar morfologiyasi, WC donalarining o'rtacha o'lchami, g'ovaklik va Co bog'lovchi fazaning uzluksizligi baholanadi. EDS nuqtaviy va xaritalash rejimlarida W-Co-C elementlarining taqsimoti va mikrosegregatsiya holatlari tekshiriladi.

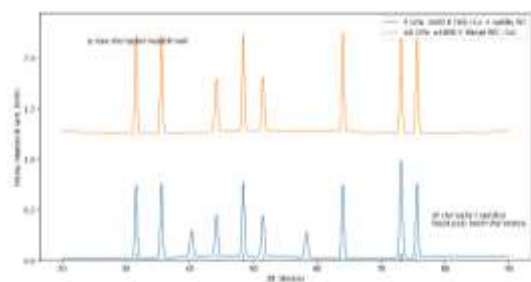
Transmissiya elektron mikroskopiya (TEM/SAED) bo'yicha - nanostruktura, don chegaralari, dislokatsiya zichligi, bog'lovchi-karbid interfeys holati hamda metastabil cho'kindilarni aniqlash uchun TEM qo'llanadi. SAED difraksiyasi fazalarni lokal miqyosda tasdiqlashga xizmat qiladi.

Zichlik va g'ovaklik bahosi - zichlik (masalan, Arximed usuli) bo'yicha sintez rejimlarining zichlanishga ta'siri baholanadi; metallografik kesimlarda tasvirlarni qayta ishlash orqali porozlik foizi ham aniqlanishi mumkin.

3. Natijalar

Faza tarkibi va faza barqarorligi (XRD)

HPHT usulida sintez qilingan barcha namunalar zich, yoriqsiz kompakt ko'rinishda bo'lib, asosiy faza sifatida WC shakllangani aniqlandi. Rentgenodifraksiyon tahlil (XRD) WC ning geksagonal tuzilishini tasdiqladi hamda reaksiyaga kirishmagan W yoki erkin grafitning sezilarli cho'qqilari kuzatilmadi (Rasm-1). $P \geq 6 \text{ GPa}$ va $T \geq 1800 \text{ K}$ rejimlarda difraktogrammlarda faqat WC va Co metalli cho'qqilari qayd etildi. Eng muhim natija shundaki, *η-fazalar aniqlanmadi*, bu esa tezkor HPHT sikli uglerodning kichik nomutanosibligida ham mo'rt Co-W-C karbidlarining hosil bo'lishidan qochishga imkon berishini ko'rsatadi. Faqat pastroq haroratda ataylab uglerod tanqisligi bilan tayyorlangan aralashmada W₂C izlari paydo bo'ldi, bu esa jarayonning stexiometriyaga sezgiriligini tasdiqlaydi.



1-rasm. YuBH rejimida WC donlari hosil bo'lishi va qoldiq volfram kamayib borish sxemasi

Natijalar termobarik sintezning yangiligini tasdiqlaydi: an'anaviy usullarda ko'pincha volfram kukunini oldindan karbidlash talab qilinadi, bu bosqichlar soni, vaqt va energiya sarfini oshiradi. Taklif etilgan yondashuvda esa WC *in situ* (bosim ostida) hosil bo'lib bu bitta texnologik bosqichni istisno qiladi, energiya sarfini kamaytiradi va mikrostrukturani bevosita boshqarish imkonini beradi. Uglerod tanqisligi rejimiga yaqin sharoitda ham *η*-fazaning yo'qligi jarayonning ishonchligini ko'rsatadi va ishlab chiqarishda uglerod miqdorini mutlaq qat'iy nazorat qilish talabini yumshatadi.

Bosimning WC sinteziga ta'siri XRD natijalarida yaqqol ajralib, 4 GPa va 1600 K sharoitida qoldiq W cho'qqilari qayd etib, reaksiya to'liq yakunlanmaganini bildiradi. Biroq 6 GPa da W cho'qqilari yo'qolib, ya'ni yuqori bosim karbidlanishni keskin tezlashtiradi. Bu holat WC ning an'anaviy olishga nisbatan pastroq haroratlarda va juda qisqa vaqt ichida to'g'ridan-to'g'ri sintez qilinishini tasdiqlaydi. WC kristall panjarasi parametrlari standart qiymatlarga yaqin bo'lib, 8 GPa rejimida kuzatilgan kichik og'ishlar Co/W komponentlarining panjara holatiga ta'siri bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Yuqori bosim bu jarayonda ikki tomonlama rol o'ynaydi: (a) reaksiya kinetikasini kuchaytirib $W + C \rightarrow WC$ karbidlanishini tezlashtiradi; (b) kompaktning zichlanishini keskin oshirib, juda qisqa sikllarda ham to'liq zich namuna olishga yordam beradi. 6–8 GPa diapazonida kuzatilgan tezlashgan reaksiya bosim ostida erigan kobaltda volfram va uglerodning eruvchanligi ortishi bilan izohlanishi mumkin.



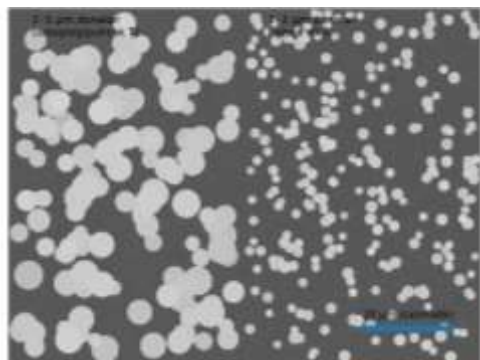
Bu WC hosil bo'lishining "muqobil past-haroratli yo'lini" yaratadi va ultradispers kukunlarga tayanadigan yondashuvlarni to'ldiradi.

WC donalari, Co bog'lovchi faza va mustahkamlanish mexanizmlari mikrostruktura-SEM/TEM

SEM natijalari WC donalari uzluksiz kobalt bog'lovchi to'riga bir tekis kiritilganini ko'rsatdi; don o'lchami odatiy sharoitlarda 2–5 mkm diapazonda bo'ldi (Rasm-2). Parametrlarni boshqarish orqali don o'lchamini sozlash mumkinligi aniqlandi: yuqori harorat va/ yoki uzoqroq ushlab turish yirikroq donlarga olib kelgan bo'lsa, qisqa sikllar donlarni 1–2 mkm gacha maydalanishini ta'minladi, shu bilan birga yuqori zichlik saqlanib qoldi. WC donalarining morfologiyasi an'anaviy pishirishdagi qirrali donalardan farqli ravishda ko'proq yumaloq/sferoidal ko'rinishda bo'ldi.

TEM tekshiruvlarida kobalt bog'lovchisida W–C ga boy nanopretsipitatlar aniqlanib, cho'ktirish orqali mustahkamlash (precipitation strengthening) ta'siri mavjudligini ko'rsatdi. Grafit yoki η -faza segregatsiyasi aniqlanmagani uchun bu holat mikrostrukturaviy bir xillikni tasdiqlaydi. Shuningdek, kam eruvchan qo'shimchalar kiritilganda donalar chegaralari bo'yicha g'ovaklikning kamayishi va yanada zich hamda bir xil tuzilmaning shakllanishi kuzatildi.

HPHT sharoitida Co ning suyuq fazaga o'tishi va tez sovitish kombinatsiyasi don o'sishini cheklab, mikrostrukturani "muzlatadi". Yumaloq donlar legirovchi qo'shimchalarsiz hosil bo'lgani bosimning o'zi izotrop o'sishga hamda Co orqali disolyutsiya–qayta cho'kish mexanizmlariga yordam berishini ko'rsatadi. Bunday morfologiya don burchaklaridagi kuchlanishlar konsentratsiyasini kamaytirib, yoriq rivojlanishiga qarshilikni oshiradi.



2-rasm. Sxematik ravishda WC donlari Co bog'lovchisida 2-5 mkm va 1-2 mkm li donachalari

Prognozdagi mexanik xossalar: qattqlik va yoriqbardoshlikning g'ayrioddiy muvozanati

Sintez qilingan so'ng WC–Co kompozitlari mexanik sinovlari o'tkazilishi kerak. Bunda asosiy parametrlarni prognos qilish mumkinligi va sinovlar natijasi ko'zda tutilishi mumkin. Bu kompozit kelajakda yoriqbardoshlik $>12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ hamda qattqlik bo'yicha esa $>13 \text{ GPa}$ qiymatlarini berish ko'zda tutilgan. Bunday kombinatsiya WC–Co qattiq qotishmalari uchun muhim bo'lgan "qattqlik–qovushqoqlik murosasi"ni yumshatish imkonini bildiradi. Odatda qattqlik oshishi yoriqbardoshlikning pasayishi hisobiga erishiladi, bu ishda esa ikkala ko'rsatkich bir vaqtda yuqori darajada saqlash imkonini beradi.

Ushbu natijalar quyidagi mikrostrukturaviy omillar bilan izohlanadi:

1. Yuqori zichlik va porozlikning minimalligi - g'ovaklar yoriqning boshlanishi uchun asosiy "nuqson markazi" bo'lgani sababli, porozlikning kamayishi yoriqbardoshlikni oshiradi.

2. WC donalarining sferoid morfologiyasi- ichki kuchlanish konsentratsiyasi pasayishi va yoriq uchidagi lokal kuchlanishlar yumshaydi.

3. Co bog'lovchisining uzluksiz va bir tekis taqsimlanishi - yuklamani qayta taqsimlash yaxshilanadi, yoriq yo'li "tortilishi" kuchayadi.

4. Nano o'chamdagi qo'shimchalar bilan mustahkamlangan bog'lovchi - Co matritsasining mustahkamligi ortadi, bu esa plastiklikni yo'qotmasdan umumiy deformatsiyaga qarshilikni oshirishi mumkin.

Natijada, HPHT jarayonida hosil bo'lgan "zich + bir xil + sferoid donli + mustahkamlangan bog'lovchili" mikrostruktura qattqlikni yuqori saqlagan holda yoriqbardoshlikni ham yuqori darajada ushlab turadi.

4. Xulosa

Ushbu tadqiqotda WC–Co tizimli kompozitlarni yuqori bosim va harorat (HPHT) sharoitida bir bosqichda sintez qilish va zichlash imkonini beruvchi termobarik yondashuvning samaradorligi ko'rsatildi. Elementar W–C–Co kukunlaridan WC fazasini in situ hosil qilish orqali an'anaviy texnologiyalardagi volframni oldindan karbidlash bosqichi bekor qilinib, jarayonning energiya sarfi va umumiy ishlov vaqti qisqartirilishi hamda natijaviy mikrostrukturani bevosita boshqarish imkoniyati yaratildi.

Rentgenodifraksiya tahlil natijalariga ko'ra, $\geq 6 \text{ GPa}$ va $\geq 1800 \text{ K}$ rejimlarda kompozitlarda asosiy faza sifatida faqat WC va Co qayd etildi va η -fazalar aniqlanmadi va bu HPHT jarayonining uglerod nomutanosibligiga nisbatan barqarorligini ko'rsatadi. Pastroq haroratda va uglerod tanqisligi sharoitida faqat W₂C izlari kuzatilishi jarayonning stexiometriyaga sezgirlikni tasdiqlaydi, biroq fazaviy "xavfli" η -fazalardan qochish imkoniyati saqlanib qoladi.

Mikrostrukturaviy tahlillar (SEM/TEM) natijasida yuqori bosim ostida olingan namunalar to'liq zich, kobalt bog'lovchisida bir tekis taqsimlangan yumaloq (sferoidal) WC donalari bilan tavsiflanishi aniqlandi. Bundan tashqari, Co bog'lovchisida W–C ga boy nanocho'kmalar paydo bo'lishi bog'lovchi fazaning cho'ktirish orqali mustahkamlanishini ko'rsatdi. Ushbu noyob mikrostruktura natijasida kompozitlarda yuqori qattqlik va yoriqbardoshlik kabi ko'rsatkichlar bir vaqtda ta'minlanishi prognozi mavjud, ya'ni qattqlik va yoriqbardoshlik o'rtasidagi klassik murosasini amaliy jihatdan muvofiqlashtirildi.

Umuman olganda, taklif etilgan termobarik sintez usuli nafaqat texnologik jihatdan istiqbolli (tezkor sikl, yuqori zichlanish, mikrostrukturani boshqarish), balki ekstremal termodinamik sharoitlarda faza hosil bo'lishi, donlar morfologiyasining evolyutsiyasi va bog'lovchi fazadagi mustahkamlanish mexanizmlari haqida yangi ilmiy ma'lumotlar beradi.



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. Kurlov, 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: 0.1016/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. Hombogen. "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 Юсупов З.Ю. Работа железобетонных конструкций при малоцикловых нагружениях в условиях климата средней Азии. Изд. «ФАН» Ўзбекистан, 1988г 132с.

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

Muxamedova Ziyoda Toshkent davlat transport universiteti, "Yuk transport tizimi"
Gafurdjanovna kafedrası professori, t.f.d.
/ Ziyoda E-mail: mziyoda@mail.ru
Mukhamedova Tel.: +998 90 329 83 00
<https://orcid.org/0000-0002-1825-2447>

Ignatenko Oleg "Belarus milliy fanlar akademiyasining materialshunoslik ilmiy-amaliy markazi", Bosh direktor o'rinbosari, t.f.d. professor,
Vladimirovich / Oleg E-mail: ignatenko@physics.by
Ignatenko Tel.: +375293895874
<https://orcid.org/0000-0002-4344-5072>

Fayzibaev Sherzod Toshkent davlat transport universiteti, "Lokomotivlar va lokomotiv xo'jaligi" kafedrası professori, t.f.d. E-mail: sherzod_fayzibaev@mail.ru
Sabirovich / Sherzod Tel.: +99890 174 11 12
Fayzibaev <https://orcid.org/0000-0003-1420-3581>

Tursunov Toxir Toshkent davlat transport universiteti, "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrası dotsenti v.b, PhD
Muratjonovich / Tokhir E-mail: t.tursunov87@gmail.com
Tursunov Tel.: +998974000426
<https://orcid.org/0000-0002-6834-7356>

Urazbayev Talgat Toshkent davlat transport universiteti, "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrası dotsenti v.b, PhD
Tileubayevich / Talgat E-mail: talgat_1988.26@mail.ru
Urazbaev 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