(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

**UO‘K:** 621.791.763

10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.6

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

# NUQTAVIY QARSHILIK PAYVANDLASH ELEKTRODLARIGA QO‘YILADIGAN TALABLAR VA VOLFRAM–MIS KOMPOZITLARINI BAHOLASH MEZONLARI





***Baxadirov Kudratxon Gayratovich***
*Texnika fanlari doktori (DSc), Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti “Materialshunoslik” kafedrasi professori, Toshkent, O‘zbekiston*
*E-mail: bahadirov@gmail.com*
*ORCID ID: 0000-0002-5436-2205*
*Science ID: DTN-0825-0035*

***Xakimov Sanjar Baxtiyor o‘g‘li***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti “Materialshunoslik” kafedrasi tayanch doktoranti, Toshkent, O‘zbekiston*
*E-mail: sansanjik797@gmail.com*
*ORCID ID: 0009-0004-1817-4559*
*Science ID: FTV-0126-0029*

***Annotatsiya.*** *Mazkur maqolada nuqtaviy qarshilik payvandlash jarayonida qo‘llaniladigan elektrod materiallariga qo‘yiladigan funksional talablar hamda volfram–mis (W–Cu) kompozitlarining ushbu talablarga muvofiqligini baholash mezonlari tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi payvandlash elektrodlarining ishdan chiqish mexanizmlarini tizimlashtirish, ularning ekspluatatsion xususiyatlarini belgilovchi asosiy omillarni aniqlash va W–Cu kompozitlarini elektrod materiali sifatida qo‘llash imkoniyatlarini ilmiy jihatdan baholashdan iborat. Tadqiqot nashr etilgan ilmiy manbalarni qiyosiy tahlil qilishga asoslangan bo‘lib, elektrodlarning termik va kimyoviy degradatsiya mexanizmlari, elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligi, yuqori haroratdagi mustahkamligi, yeyilishga chidamliligi hamda kimyoviy passivligi o‘rganilgan. Tahlil natijasida elektrod materiallari uchun beshta asosiy funksional talab ajratilib, mis qotishmalari va volfram–mis kompozitlarining fizik-mexanik xususiyatlari o‘zaro taqqoslangan. Aniqlanishicha, mis qotishmali elektrodlarning elektr o‘tkazuvchanligi xalqaro toblangan mis standarti bo‘yicha 78–88% ni tashkil etsa, W–Cu kompozitlarida ushbu ko‘rsatkich eng yuqori holatda 58,6% ga yetadi. Shu bilan birga, volfram–mis kompozitlari xona haroratida yuqori qattiqlikka ega bo‘lib, ularning ayrim tarkiblarida qattiqlik 238 HV va undan yuqori qiymatlarni tashkil etadi. Biroq yuqori haroratdagi qattiqlik, po‘lat bilan kontakt qarshiligi, rux bilan kimyoviy o‘zaro ta’siri va elektrodning xizmat muddati bo‘yicha tekshirilgan ma’lumotlarning yetarli emasligi aniqlandi. Tadqiqot natijalari W–Cu kompozitlarini payvandlash elektrodlari sifatida qo‘llash imkoniyatlarini baholashda qo‘shimcha eksperimental sinovlar zarurligini ko‘rsatadi. Olingan xulosalar elektrod materiallarini tanlash, ularning ekspluatatsion xususiyatlarini baholash va istiqbolli kompozit materiallar uchun sinov dasturlarini ishlab chiqishda amaliy ahamiyatga ega.*

***Kalit so‘zlar:*** *nuqtaviy qarshilik payvandlash, payvandlash elektrodlari, volfram–mis kompozitlari, elektrod materiallari, elektr o‘tkazuvchanlik, issiqlik o‘tkazuvchanlik, elektrod resursi, termik degradatsiya, kimyoviy passivlik, yeyilishga chidamlilik, kontakt qarshiligi, fizik-mexanik xususiyatlar.*

Received: 01.11.2026 | Accepted: 17.11.2026 | Issue publication: 28.12.2026

# ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОДАМ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВОЛЬФРАМ-МЕДНЫХ КОМПОЗИТОВ

***Бахадиров Кудратхон Гайратович***
*Доктор технических наук (DSc), профессор кафедры «Материаловедение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан*

***Хакимов Санжар Бахтиёр угли***
*Докторант кафедры «Материаловедение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан*

***Аннотация.*** *В статье исследованы функциональные требования к электродным материалам, применяемым при контактной точечной сварке, а также критерии оценки соответствия вольфрам-медных (W–Cu) композитов установленным требованиям. Основной целью исследования является систематизация механизмов деградации сварочных электродов, определение факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики, и научная оценка возможности использования композитов W–Cu в качестве электродных материалов. Исследование основано на сравнительном анализе опубликованных научных работ, посвящённых термическим и химическим механизмам деградации электродов, электрической и тепловой проводимости, высокотемпературной прочности, износостойкости и химической пассивности материалов. В результате анализа выделены пять основных функциональных требований к электродным материалам и проведено сопоставление физико-механических характеристик медных сплавов и вольфрам-медных композитов. Установлено, что электропроводность медных сплавов составляет 78–88% по Международному стандарту отожжённой меди, тогда как для композитов W–Cu максимальное значение данного показателя достигает 58,6%. Вместе с тем вольфрам-медные композиты характеризуются повышенной твёрдостью при комнатной температуре, которая для отдельных составов составляет 238 HV и более. Однако выявлен недостаток проверенных экспериментальных данных о высокотемпературной твёрдости, контактном сопротивлении при взаимодействии со сталью, химическом взаимодействии с цинком и эксплуатационном ресурсе электродов. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости дополнительных экспериментальных испытаний для обоснования применения композитов W–Cu в качестве электродов контактной точечной сварки. Полученные выводы имеют практическое значение для выбора электродных материалов, оценки их эксплуатационных характеристик и разработки программ испытаний перспективных композиционных материалов.*

***Ключевые слова:*** *контактная точечная сварка, сварочные электроды, вольфрам-медные композиты, электродные материалы, электропроводность, теплопроводность, ресурс электрода, термическая деградация, химическая пассивность, износостойкость, контактное сопротивление, физико-механические свойства.*

# REQUIREMENTS FOR RESISTANCE SPOT WELDING ELECTRODES AND EVALUATION CRITERIA FOR TUNGSTEN–COPPER COMPOSITES

***Bakhadirov Kudratkhon Gayratovich***
*Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Department of Materials Science, Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan*

***Xakimov Sanjar Baxtiyor ugli***
*Doctoral Researcher, Department of Materials Science, Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan*

***Abstract.*** *This article investigates the functional requirements for electrode materials used in resistance spot welding and establishes evaluation criteria for assessing the suitability of tungsten–copper (W–Cu) composites for such applications. The primary objective of the study is to systematize the degradation mechanisms of welding electrodes, identify the main factors influencing their operational performance, and scientifically evaluate the potential application of W–Cu composites as electrode materials. The research is based on a comparative analysis of published scientific studies addressing thermal and*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

*chemical degradation mechanisms, electrical and thermal conductivity, high-temperature strength, wear resistance, and chemical passivity of electrode materials. Five principal functional requirements were identified, and the physical and mechanical properties of copper alloys and tungsten–copper composites were systematically compared. The results indicate that the electrical conductivity of copper alloys ranges from 78% to 88% of the International Annealed Copper Standard, whereas the maximum reported conductivity of W–Cu composites reaches 58.6%. Nevertheless, tungsten–copper composites exhibit higher hardness at room temperature, with values of 238 HV or above for certain compositions. However, the analysis revealed a lack of verified experimental data concerning high-temperature hardness, electrical contact resistance against steel, chemical interactions with zinc, and electrode service life. The findings demonstrate that additional experimental investigations are required before the application of W–Cu composites as resistance spot welding electrodes can be scientifically justified. The results provide a basis for selecting electrode materials, evaluating their operational characteristics, and developing experimental testing programs for advanced composite materials.*
***Keywords:*** *resistance spot welding, welding electrodes, tungsten–copper composites, electrode materials, electrical conductivity, thermal conductivity, electrode service life, thermal degradation, chemical passivity, wear resistance, contact resistance, physical and mechanical properties.*

**Kirish.** Nuqtaviy qarshilik payvandlash avtomobil kuzovlarini tayyorlashda galvanizlangan po‘lat listlarni biriktirish uchun keng qo‘llaniladi (Rdzawski va boshq., 2023). Bu jarayonda elektrod bir vaqtning o‘zida uchta vazifani bajaradi: payvand zonasiga tok o‘tkazadi, qisish kuchini uzatadi va ajralgan issiqlikni suv bilan sovitiladigan tanaga chiqaradi. Ajralgan issiqlik miqdori Joul–Lens qonuniga ko‘ra $Q=I^2Rt$ ifodasi bilan aniqlanadi, bunda I – tok kuchi, R – zanjirning qarshiligi, t – tok o‘tish vaqti. Umumiy qarshilik hajmiy va kontakt qarshiliklaridan tashkil topadi; kontakt qarshiligi esa torayish (konstriksiya) va yuza pardasi qismlaridan iborat bo‘lib, Hamedi va Atashparva (2017) sharhida u issiqlik ajralishining asosiy manbai sifatida qaraladi. Shu sababli elektrod materialining xossalari nafaqat elektrodning o‘zi, balki payvand yadrosining shakllanishiga ham bevosita ta’sir qiladi.

Qoplamali po‘latlarni payvandlashda elektrod tez ishdan chiqadi. Elektrod resursi ish uchining kattalashishi, yumshashi va qoplama bilan qotishma hosil qilishi bilan cheklanadi (Parker va boshq., 1998; Franczak va boshq., 2025b). Keyingi tadqiqotlar bu manzarani aniqlashtirdi. Rdzawski va boshq. (2023) CuCrZr qalpoqchalarida xizmat davomida rux misning ichiga diffuziyalanib, latun qatlami hosil bo‘lishini, donlar o‘sishi va qattiqlik pasayishi kuzatilishini ko‘rsatdi. Zhao va boshq. (2023) galvanizlangan po‘latda Cu–Cr elektrodining ish yuzasi diametri dastlabki 176 payvand davomida sezilarli kattalashishini, payvand yadrosi esa kichrayishini qayd etdi. Galvanizlangan listlarda mis qotishmali elektrodlarning resursi bir necha yuz payvanddan taxminan 900 tagacha yetadi (Franczak va boshq., 2025b; Sheikhi va boshq., 2024).

Elektrod materiallari qarshilik payvandlash uchun elektrod materiallari haqidagi ISO 5182 xalqaro standarti sinflari bo‘yicha tanlanadi. TWI (b.y.) ma’lumotiga ko‘ra, po‘lat uchun eng keng qo‘llaniladigan material 2-sinf (mis–xrom va mis–xrom–sirkoniy) hisoblanadi, qoplamali po‘lat uchun esa elektr o‘tkazuvchanligi yuqoriroq qotishmalar, masalan, mis–sirkoniy va dispersion mustahkamlangan mis tavsiya etiladi; o‘tga chidamli materiallar (volfram–mis, volfram, molibden) esa nuqtaviy payvandlash uchun yaroqsiz deb baholanadi. Biroq volfram–mis kompozitlari, ya’ni volfram skeleti va mis tarmog‘idan iborat psevdoqotishmalar, volframning yuqori erish harorati (3422°C), qattiqligi va past issiqlik kengayishi ($4{,}6\times10^{-6}$ $K^{-1}$) hamda misning o‘tkazuvchanligini birlashtiradi (Chen va boshq., 2017; Hou va boshq., 2019). Ular elektr kontaktlarida, elektroeroziya elektrodlarida va proyeksion payvandlash elektrod qo‘shimchalarida qo‘llaniladi (Lungu, 2019; Long va boshq., 2025; Hou va boshq., 2019).

Shunday qilib, mavjud adabiyotda ikki xil tasavvur yonma-yon turadi. Mis qotishmalari bo‘yicha ishdan chiqish mexanizmlari yaxshi o‘rganilgan, lekin ular odatda alohida xossa (qattiqlik, rux diffuziyasi) nuqtai nazaridan ko‘riladi. Volfram–mis kompozitlari bo‘yicha esa

tadqiqotlar asosan olish texnologiyasi, zichlik va o‘tkazuvchanlikka bag‘ishlangan, payvandlash sharoitidagi xulq-atvori deyarli yoritilmagan. Elektrod materialiga qo‘yiladigan talablar yagona tizimga keltirilmagan va ularning har biri uchun miqdoriy mezon, shuningdek, volfram–mis kompozitlari bo‘yicha ma’lumotning mavjudligi baholanmagan. Bu elektrod uchun material tanlashda nimani o‘lchash kerakligini noaniq qoldiradi.

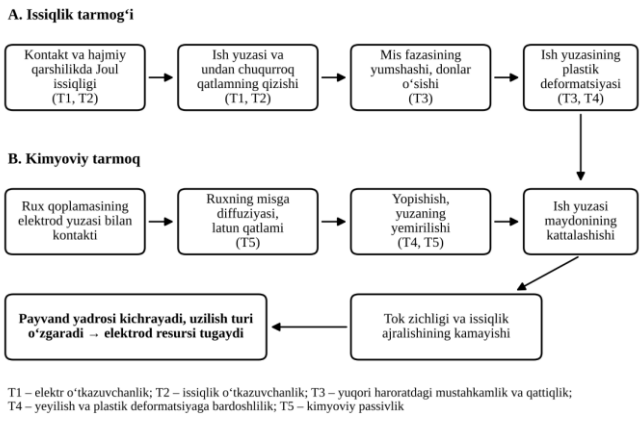
Tadqiqotning maqsadi nuqtaviy payvandlash elektrod materiallariga qo‘yiladigan talablarni ishdan chiqish mexanizmlari bilan bog‘lab tizimlashtirish va ularning volfram–mis kompozitlari uchun baholash mezonlarini aniqlashdan iborat. Maqsadga erishish uchun quyidagi masalalar hal qilindi: (1) elektrodning ishdan chiqish zanjirini nashr etilgan ma’lumotlar asosida tuzish; (2) funksional talablarni ajratib, har biri uchun mis qotishmalari va volfram–mis kompozitlari bo‘yicha miqdoriy ko‘rsatkichlarni solishtirish; (3) volfram–mis kompozitlari uchun dalillar holatini va yetishmayotgan ma’lumotlarni aniqlash.

**Material va metodlar.** Tadqiqot nashr etilgan ma’lumotlarni tahlil qilishga asoslangan va mualliflarning o‘z tajribalarini o‘z ichiga olmaydi. Ish 2026-yil davomida Toshkent davlat texnika universiteti va O‘zbekiston texnologik metallar kombinati bilan hamkorlikda, volfram–mis payvandlash elektrodlari bo‘yicha doktorlik loyihasi doirasida bajarildi. Manbalar ikki guruhga bo‘lindi. Birinchi guruhga volfram–mis kompozitlari bo‘yicha 54 nashrdan iborat adabiyot matritsasidan olingan tadqiqotlar kiritildi; ular bo‘yicha ma’lumotlar asl maqolaning matni, jadvali va rasmlari bilan solishtirilgan. Ikkinchi guruhga nuqtaviy payvandlashda elektrod degradatsiyasi va mis qotishmalari bo‘yicha qo‘shimcha qidirilgan nashrlar kiritildi. Mis qotishmalariga oid raqamlar nashriyotlarning rasmiy sahifalaridagi matn va jadvallardan olindi.

Qamrab olingan nashrlar uchun quyidagi qoidalar qo‘llandi. Ma’lumotlar faqat birlamchi tadqiqotdan yoki, alohida qayd etilgan holda, sharhdagi keltirmadan olindi. Elektr o‘tkazuvchanlik xalqaro toblangan mis standartining foizida ifodalandi; megasimens-metrda berilgan qiymatlar 1 foiz=0,58 MS/m nisbati bo‘yicha o‘tkazildi (masalan, 51,2 MS/m taxminan 88 foizga teng). Vikkers va Brinell qattiqliklari bir-biriga o‘tkazilmadi, har xil yuklanishda o‘lchangan qiymatlar esa o‘zaro to‘g‘ridan-to‘g‘ri solishtirilmadi, faqat yo‘nalish ko‘rsatkichi sifatida ishlatildi. Rasmdan o‘qilgan qiymatlar taxminiy hisoblanadi. Ishlab chiqaruvchilarning tijorat ma’lumotnomalaridagi yumshash haroratlari sinash usuli va birlamchi manbasi ko‘rsatilmagani uchun tahlilga kiritilmadi.

Har bir talab bo‘yicha volfram–mis kompozitlari uchun dalillar holati uch darajada baholandi: «yetarli» – kamida uchta mustaqil birlamchi tadqiqot bir-biriga mos natija bergan; “cheklangan” – bir yoki ikkita tadqiqot mavjud; “yo‘q” – tekshirilgan ma’lumot topilmadi. Baholash faqat tahlilga kiritilgan manbalarga tegishli, shu sababli “yo‘q” bahosi barcha mavjud nashrlarda ma’lumot yo‘qligini isbotlamaydi, balki shu tahlil doirasida topilmaganini bildiradi.

**Tadqiqot natijalari**. **Elektrodning ishdan chiqish zanjiri**. Nashr etilgan kuzatuvlarni umumlashtirish elektrod ishdan chiqishining ikkita o‘zaro bog‘liq tarmog‘ini ko‘rsatadi (1-rasm). Issiqlik tarmog‘ida kontakt va hajmiy qarshilikda ajralgan Joul issiqligi ish yuzasi va undan chuqurroq qatlamlarni qizdiradi, mis fazasi yumshaydi, donlar o‘sadi va ish yuzasi kuch ta’sirida plastik deformatsiyalanadi. Kimyoviy tarmoqda qoplamadagi rux elektrod yuzasi bilan kontaktga kirishadi, misga diffuziyalanadi va latun qatlami hosil qiladi, bu esa yopishish va yuzaning yemirilishiga olib keladi. Ikkala tarmoq ish yuzasi maydonining kattalashishiga olib keladi. Tok o‘zgarmas bo‘lganda maydon ortishi tok zichligining kamayishini bildiradi, bu oddiy geometrik natijadir; natijada payvand yadrosi kichrayadi.




***1-rasm. Elektrodning ishdan chiqish zanjiri va unga mos funksional talablar.***

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

Bu zanjirning har bir bo‘g‘ini miqdoriy kuzatuvlar bilan tasdiqlangan. Zhao va boshq. (2023) galvanizlangan BH 220 po‘latini (qalinligi 1,5 mm) Cu–Cr gumbazsimon elektrod bilan 704 marta payvandlaganda ish yuzasi diametri dastlabki 5 mm dan 176-payvandgacha 7,02 mm ga o‘sganini aniqladi. Qotishma qatlami 176-, 352- va 704-payvandlarda mos ravishda 11, 17 va 24 μm bo‘lgan; sirtdagi mis ulushi esa 97,51 foizdan 28,44 foizgacha kamaygan. Payvand yadrosi diametri 5,83 mm dan 3,92 mm gacha (528-payvandda) kichrayib, maksimal yuk birinchi payvanddagi qiymatning 41,19 foizigacha tushgan. Qatlam Cu–Zn–Fe fazalaridan (β-CuZn, γ-CuZn va Γ-ZnFe) iborat bo‘lgan. Taxminan 616-payvanddan keyin barcha ulanishlar interfeys bo‘yicha uzilgan.

1-jadval

***Elektrod materialiga qo‘yiladigan funksional talablar va ularning miqdoriy mezonlari***

| № | Talab | Elektroddagi vazifasi | Bajarilmaganda yuzaga keladigan nuqson | Miqdoriy mezonlar (adabiyotdan) |
|---|---|---|---|---|
| T1 | Yuqori elektr o‘tkazuvchanlik | Hajmiy va kontakt qarshiligida issiqlik ajralishini kamaytiradi | Elektrod yuzasi va tanasining ortiqcha qizishi, yumshash va yopishishning tezlashishi | Cu–Cr–Zr–Sc: 78–88% (45,5–51,2 MS/m); W–Cu: 8,7–58,6%; GB/T 8320-2003: W–30Cu ≥ 42%, W–40Cu ≥ 47% |
| T2 | Yuqori issiqlik o‘tkazuvchanlik | Ish yuzasidagi issiqlikni sovitiladigan tanaga uzatadi | Ish yuzasi haroratining oshishi, mis fazasining yumshashi | W–Cu: 195–246 W/(m·K) (xona harorati), 352–386 (500–700 °C); W–30Cu: 210 (aralash kukun), 234 (qoplangan kukun) |
| T3 | Yuqori haroratda mustahkamlik va qattiqlik | Kuch ostida ish yuzasi shaklini saqlaydi | Donlar o‘sishi, qattiqlik pasayishi, ish yuzasi kengayishi | CuCrZr: 167–193 HV → taxminan 90 HV (xizmatdan keyin); W–30Cu: oquvchanlik chegarasi 432 → taxminan 80 MPa (xona harorati → 800 °C); issiq qattiqlik: ma’lumot yo‘q |
| T4 | Yeyilish va plastik deformatsiyaga bardoshlilik | Ish yuzasi diametri va tekisligi barqarorligini saqlaydi | Diametr o‘sishi, tok zichligining kamayishi, payvand yadrosining kichrayishi | Cu–Cr: diametr 5 → 7,02 mm; material yo‘qolishi 0,20–0,45 mm (500 payvand); W–Cu (yoy eroziyasi): massa yo‘qolishi 2 marta kam (qoplangan kukun) |
| T5 | Kimyoviy passivlik | Rux va po‘lat bilan qotishma hosil qilishni va yopishishni cheklaydi | Latun qatlami, yopishish, yuzaning yemirilishi | Cu qotishmalari: qatlam 8,3–24 μm, sirtdagi mis 97,5 → 28,4%; W–Cu: ma’lumot yo‘q |

Rdzawski va boshq. (2023) CuCrZr qalpoqchalarida xizmat jarayonida o‘rtacha don o‘lchami 0,3 μm dan 3,1 μm gacha oshganini, ish uchidan taxminan 1 mm chuqurlikda qattiqlik 170–190 HV dan taxminan 90 HV gacha pasayganini va payvand yadrosi diametri 10-payvandda 4,00 mm bo‘lib, taxminan 2000-payvandda 3,02 mm gacha kichrayganini qayd etgan. Yangi qalpoqchalarning qattiqligi kesim bo‘ylab 167–193 HV oralig‘ida bo‘lgan. Franczak va boshq. (2025a) DX53D galvanizlangan po‘latda (0,75 mm) 500 payvanddan keyin tijorat elektrodida rux diffuziya qatlami 19,9 μm, ish yuzasi materialining yo‘qolishi esa pastki va yuqori elektrodda mos ravishda 0,27 va 0,45 mm ekanini, kesishga sinashdagi mustahkamlik 2910 N bo‘lib, 3580 N talabidan past bo‘lganini ko‘rsatdi.

**Funksional talablar va ularning miqdoriy mezonlari.** Ishdan chiqish zanjiriga asoslanib, elektrod materiali uchun beshta funksional talab ajratildi (T1–T5), ularga zichlik va mikrostruktura barqarorligi kabi tizimli talablar tayanch bo‘lib xizmat qiladi. 1-jadvalda talablar, ularning elektrod-dagi vazifasi, bajarilmaganda yuzaga keladigan nuqson va adabiyotdan olingan miqdoriy mezonlar keltirilgan.

**T1. Yuqori elektr o‘tkazuvchanlik.** Elektr o‘tkazuvchanlik elektrod tanasidagi Joul issiqligini kamaytiradi va qoplamali po‘latda kontakt yuza-sining qizishini cheklaydi: TWI (b.y.) ma’lumotiga ko‘ra, yuqori o‘tkazuvchan qotishmalar kontakt qarshiligi past bo‘lgani uchun yuzani kamroq qizdiradi. Mis qotishmalari uchun asosiy mezon yuqori: Franczak va boshq. (2025a) 480 °C da eskirtirilgan CuCr0,7Zr0,05Sc0,05 qotishmasida 152 HV10 qattiqlikda 51,2 MS/m (taxminan 88 foiz), nikel qo‘shilgan CuCr0,3Ni0,1Zr0,05Sc0,05 qotishmasida taxminan 150 HV10 da 45,5 MS/m (taxminan 78 foiz) o‘tkazuvchanlikka erishgan. Dispersion mustahkamlangan Cu–Al2O3 qotish-malarida sharhga ko‘ra (Jia va boshq., 2026) usuliga qarab 57,24 foizdan 85 foizgacha qiymatlar keltirilgan.

Volfram–mis kompozitlarida o‘tkazuvchanlik tarkib va olish usuliga bog‘liq. Mondal va boshq. (2013) an’anaviy zichlashtirishda 10, 20 va 30 massa foizli misda 16,0, 32,6 va 40,0 foiz, mikroto‘lqinli zichlashtirishda esa 21,2, 35,2 va 43,1 foiz oldi. Liu va boshq. (2020) o‘ta mayda kukunlardan 5, 20 va 40 massa foizli misda 8,7, 33,5 va 49,5 foiz oldi. Shimdirish usuli yuqoriroq natija beradi: aralash kukundan olingan W–30Cu da 50,2 foiz, mis bilan qoplangan volfram kukunidan olinganida 56,4 foiz (Chen va boshq., 2017); volfram simlar skeletiga mis shimdirilgan W–20Cu da 58,6 foiz (Safahi va boshq., 2024); sferik kukunli shimdirilgan materialda 52 va 57,9 foiz (Zhuo va boshq., 2020). Mis–volfram va kumush–volfram elektr kontaktlari bo‘yicha Xitoy standarti GB/T

8320-2003 ning minimal talabi W–30Cu uchun 42 foiz, W–40Cu uchun 47 foizdir (Zhuo va boshq., 2020). Demak, bir xil tarkibda (20 massa foiz mis) natijalar 32,6 dan 58,6 foizgacha tarqaladi va bu usul ta'sirining tarkib o'zgarishidan kam bo'lmasligini ko'rsatadi. Volfram–mis kompozitlarining eng yaxshi o'tkazuvchanligi (58,6 foiz) yuqorida keltirilgan mis qotishmasi qiymatining (88 foiz) taxminan uchdan ikki qismini tashkil qiladi.

**T2. Yuqori issiqlik o'tkazuvchanlik.** Issiqlik o'tkazuvchanlik ish yuzasidagi issiqlikni suv bilan sovitiladigan elektrod tanasiga uzatib, yuza haroratini pasaytiradi va shu bilan T3 va T5 talablarini bevosita qo'llab-quvvatlaydi. Volfram–mis uchun Kim va boshq. (2001) 10, 20 va 30 massa foiz misli kompozitlarda xona haroratida taxminan 195, 227 va 246 W/(m·K) qiymatlarni, 500–700 °C da esa taxminan 352, 373 va 386 W/(m·K) gacha oshishini o'lchagan. Chen va boshq. (2017) W–30Cu da aralash kukun uchun 210, mis bilan qoplangan kukun uchun 234 W/(m·K) oldi; Ouyang va boshq. (2021) W–20Cu da bog'lash ishlovidan keyin 218 dan 233 W/(m·K) gacha oshishini, Hou va boshq. (2019) uchqunli plazma zichlashtirishda W–30Cu uchun 235 W/(m·K) ni keltirdi. Mis qotish-malari uchun taqqoslanadigan issiqlik o'tkazuvchanlik qiymatlari bu tahlilga kiritilgan manbalarda tekshirilmadi, shuning uchun solishtirish T1 bo'yicha o'tkazuvchanlik darajasida cheklandi. Elektrod uchun issiqlik o'tkazuvchanlikning minimal talab qilinadigan qiymati tahlil qilingan manbalarda berilmagan.

**T3. Yuqori haroratda mustahkamlik va qattiqlik.** Bu talab ish yuzasining kuch ostida shaklini saqlashini belgilaydi. Mis qotishmalarida asosiy zaiflik yumshash: Jia va boshq. (2026) sharhida CuCrZr uchun 500 °C dan yuqori haroratda mustahkamlikning keskin yo'qolishi qayd etilgan, dispersion mustahkamlangan qotishmalar esa tuzilmasini yaxshiroq saqlaydi (Cu–Al2O3 da 600 °C da tavlashda dislokatsiya zichligi atigi 15 foizga kamaygan, sof misda esa 50 foizdan ko'proq). Rdzawski va boshq. (2023) kuzatuvlari ham shunga mos keladi: xizmat davomida qattiqlik 170–190 HV dan taxminan 90 HV gacha tushgan.

Volfram–mis uchun xona haroratidagi qattiqlik mis qotishmalarinikidan yuqori: W–30Cu da 213 HV (aralash kukun) va 238 HV (mis bilan qoplangan kukun) (Chen va boshq., 2017), mikroto'lqinli zichlashtirilgan W–20Cu da 349 HV (Mondal va boshq., 2013), W–5Cu da 395 HV, W–40Cu da 244 HV (Liu va boshq., 2020). Yuqori haroratdagi ma'lumotlar mustahkamlik bo'yicha mavjud. Tejado va boshq. (2018) infiltratsiya usulida olingan W–30Cu ni yuqori vakuumda xona haroratidan 800 °C gacha sinab, cho'zilishdagi oquvchanlik chegarasi 432 MPa dan taxminan 80 MPa gacha, egilishdagi oquvchanlik mustahkamligi 575 dan 95 MPa gacha, sinish qovushqoqligi 17,5 dan 4 MPa·m½ gacha va elastiklik moduli 175 dan 110 GPa gacha pasayganini aniqladi; mualliflar buni mis fazasining yumshashi va termik degradatsiyasi bilan bog'ladi va 800 °C da sinish asosan volfram skeleti bilan boshqarilishini qayd etdi. Safahi va boshq. (2025) zich W–20Cu da siqilish mustahkamligi 25 °C da 1085 MPa dan 600 °C da 431 MPa gacha, oquvchanlik chegarasi 724 dan 253 MPa gacha tushganini mis fazasining yumshashi va dinamik rekristallanishi bilan izohladi. Biroq tahlil qilingan manbalarda volfram–mis uchun yuqori haroratdagi qattiqlik yoki yumshash harorati haqida tekshirilgan ma'lumot topilmadi.

**T4. Yeyilish va plastik deformatsiyaga bardoshlilik.** Bu talab ish yuzasi diametri va tekisligining barqarorligini ta'minlaydi, chunki diametr o'sishi tok zichligini pasaytiradi. Mis qotishmalari uchun miqdoriy ko'rsatkichlar mavjud: Zhao va boshq. (2023) ish yuzasi diametrining 5 dan 7,02 mm gacha o'sishini, Franczak va boshq. (2025a) esa 500 payvanddan keyin ish yuzasi materialining 0,20–0,45 mm yo'qolishini keltirdi (Sc bilan legirlangan qotishmalarda pastki va yuqori elektrod uchun 0,20/0,29 va 0,25/0,35 mm, tijorat elektrodida 0,27/0,45 mm). Volfram–mis uchun yeyilish bo'yicha ma'lumotlar elektr yoyi eroziyasiga tegishli: mis bilan qoplangan kukundan olingan W–30Cu da 200 yoy uzilishidan keyin massa yo'qolishi aralash kukundagiga nisbatan ikki marta kam bo'lgan (Chen va boshq., 2017); grafen qo'shilgan CuW80 kontaktlarida 63 kA to'la quvvatli uzilishlar soni 16 dan 20 gacha oshgan (Liu va boshq., 2024). Bu natijalar elektr uzgichlari kontaktlariga tegishli; nuqtaviy payvandlash sharoitida volfram–mis ish yuzasining yeyilishi bo'yicha ma'lumot topilmadi.

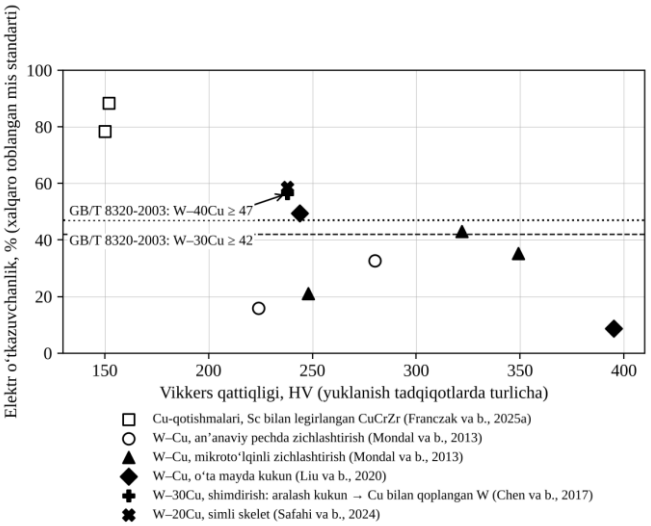
**T5. Kimyoviy passivlik.** Kimyoviy passivlik elektrodning rux va po'lat bilan qotishma hosil

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

qilishiga va yopishishga qarshiligini bildiradi. Franczak va boshq. (2025a) 500 payvanddan keyin pastki elektrodda rux diffuziya qatlamini 8,28 µm (nikel va skandiy bilan legirlangan qotishma), 12,4 µm (skandiyli qotishma) va 19,9 µm (tijorat qotishmasi) deb o‘lchadi; tijorat elektrodida taxminan 400 payvanddan keyin yopishish kuzatilgan. Franczak va boshq. (2025b) Cu–Sc qotishmalarida 500 payvanddan keyin pastki elektrodda qatlam 8,7–13,2 µm, Cu–Zr0,1 mos yozuvida esa 18,5 µm ekanini, taxminiy elektrod resursi esa Cu–Zr0,1 da taxminan 450 payvand, Cu–Sc qotishmalarida 550–650 payvand ekanini bildirdi. Rdzawski va boshq. (2023) rux diffuziyasini sekinlashtiruvchi kichik qo‘shimchalarni resursni oshirish yo‘li sifatida taklif qildi. Volfram–mis uchun rux bilan o‘zaro ta’sir, yopishish va qotishma hosil bo‘lishi bo‘yicha tekshirilgan ma’lumot topilmadi.

**Tizimli talablar: zichlik va mikrostruktura barqarorligi.** T1–T4 talablarining bajarilishi tuzilmaning sifatiga bog‘liq. Shimdirish usulida skeletda yopiq g‘ovaklar bo‘lsa, ularni mis bilan to‘ldirib bo‘lmaydi; misning volframda ho‘llash burchagi taxminan 1150 °C da 25° dan 1300–1400 °C da deyarli nolgacha kamayadi (Matějíček, 2021). Mis bilan qoplangan volfram kukuni W–30Cu da nisbiy zichlikni 98,0 dan 99,1 foizga, o‘tkazuvchanlikni 50,2 dan 56,4 foizga, issiqlik o‘tkazuvchanlikni 210 dan 234 W/(m·K) ga va qattiqlikni 213 dan 238 HV ga oshirgan (Chen va boshq., 2017); volfram sim skeletida W–20Cu ning zichligi 99,99 foizdan yuqori bo‘lgan (Safahi va boshq., 2024). Zichligi past namunada qattiqlik ham past: an’anaviy zichlashtirilgan W–10Cu 224 HV, W–20Cu esa 280 HV bergan (Mondal va boshq., 2013). Mikrostruktura barqarorligi issiqlik kengayish koeffitsientlarining katta farqi bilan bog‘liq: volfram 4,6 × $10^{-6}$ $K^{-1}$, mis esa 17,5 × $10^{-6}$ $K^{-1}$ (Chen va boshq., 2017); Tejado va boshq. (2018) bu farq fazalar chegarasida termik kuchlanishlarga olib kelishini va qismlarning chidamliligiga ta’sir qilishini ta’kidlaydi.

**Elektr o‘tkazuvchanlik va qattiqlik nisbati; dalillar holati.** 2-rasmda W–Cu va mis qotishmalari uchun elektr o‘tkazuvchanlik va qattiqlik nisbati ko‘rsatilgan. Mis qotishmalari yuqori o‘tkazuvchanlik (78–88 foiz) va past qattiqlikda (taxminan 150 HV10) joylashgan, volfram–mis kompozitlari esa teskari holatda: qattiqlik yuqori, o‘tkazuvchanlik past. Volfram–mis ichida mis ulushi ortishi bilan o‘tkazuvchanlik oshadi va qattiqlik pasayadi (Liu va boshq., 2020: 5 massa foiz misda 8,7 foiz va 395 HV, 40 massa foiz misda 49,5 foiz va 244 HV). Shimdirish usuli va qoplangan kukun ikkala ko‘rsatkichni birgalikda oshiradi (Chen va boshq., 2017; Safahi va boshq., 2024), shuning uchun nuqtalar yuqori o‘ng tomonga siljiydi.




***2-rasm. Mis qotishmalari va W–Cu kompozitlarining elektr o‘tkazuvchanligi va qattiqligi (nashr etilgan ma’lumotlar bo‘yicha, qattiqlik har xil yuklanishda o‘lchangan).***

2-jadval

***Volfram–mis kompozitlari uchun dalillar holati***

| Talab | W–Cu bo‘yicha mavjud ma’lumot | Dalil darajasi | Asosiy manbalar |
|---|---|---|---|
| T1. Elektr o‘tkazuvchanlik | Tarkib va olish usuli bo‘yicha ko‘p tadqiqot | Yetarli | Mondal va boshq., 2013; Liu va boshq., 2020; Chen va boshq., 2017; Zhuo va boshq., 2020; Safahi va boshq., 2024 |
| T2. Issiqlik o‘tkazuvchanlik | Xona haroratida ko‘p tadqiqot; yuqori haroratda (700 °C gacha) bitta | Yetarli (xona harorati); cheklangan (yuqori harorat) | Kim va boshq., 2001; Chen va boshq., 2017; Ouyang va boshq., 2021; Hou va boshq., 2019 |
| T3. Yuqori haroratdagi mustahkamlik | Cho‘zilish, egilish, siqilish mustahkamligi (800 °C gacha) | Cheklangan | Tejado va boshq., 2018; Safahi va boshq., 2025 |
| T3. Issiq qattiqlik, yumshash harorati | Tekshirilgan ma’lumot topilmadi | Yo‘q | – |
| T4. Yeyilish, deformatsiya | Faqat yoy eroziyasi (elektr kontaktlari) | Cheklangan (yoy eroziyasi); yo‘q (payvandlashdagi yeyilish) | Chen va boshq., 2017; Liu va boshq., 2024 |
| T5. Kimyoviy passivlik (rux) | Tekshirilgan ma’lumot topilmadi | Yo‘q | – |
| Po‘lat bilan kontakt qarshiligi | Tekshirilgan ma’lumot topilmadi (mis uchun o‘lchovlar bor) | Yo‘q | – |

2-jadvalda har bir talab bo‘yicha volfram–mis kompozitlari uchun dalillar holati umum-

lashtirilgan. Elektr va issiqlik o‘tkazuvchanlik (xona haroratida) bo‘yicha dalillar yetarli. Yuqori haroratdagi issiqlik o‘tkazuvchanlik va mustahkamlik bo‘yicha ma’lumot cheklangan, qolgan uchta yo‘nalish bo‘yicha ma’lumot topilmadi: payvandlash sharoitidagi yeyilish, rux bilan o‘zaro ta’sir va po‘lat bilan kontakt qarshiligi.

**Tadqiqot natijalari tahlili.** Olingan tizim volfram–mis elektrod materialining kuchli va noaniq tomonlarini ajratib ko‘rsatadi. Kuchli tomon T3 va T4 talablari bilan bog‘liq: xona haroratidagi qattiqlik mis qotishmalarinikidan yuqori, yuqori haroratda esa volfram skeleti sinish va deformatsiyada asosiy yuk ko‘taruvchi bo‘lib qoladi (Tejado va boshq., 2018). Zaif tomon T1 talabida: eng yaxshi o‘tkazuvchanlik mis qotishmalarining taxminan uchdan ikki qismini tashkil qiladi, demak, bir xil tok va kontakt sharoitida elektrod ko‘proq qizishi mumkin. Bu qizishning haqiqiy qiymatini baholash uchun po‘lat bilan kontakt qarshiligini bilish kerak, chunki kontakt qarshiligi issiqlik ajralishining asosiy manbai sifatida qaraladi (Hamedi va Atashparva, 2017), ammo bu miqdor volfram–mis uchun o‘lchanmagan. Mis uchun o‘tkazilgan o‘lchovlar (Cu-ETP, 400 °C gacha) kontakt qarshiligi harorat va bosim oshishi bilan kamayishini ko‘rsatadi (Biele va boshq., 2021), ammo bu natijalarni volfram–mis va po‘lat juftligiga o‘tkazish uchun asos yo‘q.

Mustahkamlik bo‘yicha ma’lumotlarni ehtiyotkorlik bilan o‘qish kerak. Tejado va boshq. (2018) va Safahi va boshq. (2025) natijalari kuchli pasayishni ko‘rsatadi: W–20Cu da siqilish mustahkamligi 600 °C da taxminan 60 foiz kamaygan, W–30Cu da cho‘zilishdagi oquvchanlik chegarasi 800 °C da taxminan 80 MPa gacha tushgan. Bu mis fazasi yumshashining hal qiluvchi ta’sirini ko‘rsatadi va volfram–mis «yumshamaydi» degan tasavvurga zid keladi. Shu bilan birga bu sinovlar vakuumda va sekin deformatsiya tezligida o‘tkazilgan; payvandlashdagi tez termik sikl va elektrod kuchi bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri solishtirib bo‘lmaydi. Elektrod ish yuzasining haqiqiy harorati bu tahlildagi manbalarda berilmagan, shuning uchun mis qotishmalarida mustahkamlik keskin pasayadigan haroratga (500 °C dan yuqori) volfram–mis elektrodining ish yuzasida erishilishi yoki erishilmasligi hozircha aniqlanmagan.

Kimyoviy tarmoqda (T5) holat eng noaniq. Mis qotishmalarida rux diffuziyasi va latun hosil bo‘lishi resursni belgilovchi omil ekani aniq (Zhao va boshq., 2023; Franczak va boshq., 2025a). Volfram–mis ish yuzasida mis fazasi uzluksiz tarmoq sifatida chiqib turadi, shuning uchun u ruxga mis qotishmalaridagi kabi ta’sirchan bo‘lishi mumkin. Bu faqat taxmin bo‘lib, tajribada tekshirilmagan. TWI (b.y.) o‘tga chidamli materiallarni nuqtaviy payvandlash uchun yaroqsiz deb baholaydi, ammo bu bahoning sababi manbada izohlanmagan va uni tasdiqlovchi yoki rad etuvchi o‘lchov ham topilmadi. Volfram–mis uchun amaliy o‘rin, ehtimol, butun elektrod sifatida emas, balki qo‘shimcha (insert) yoki proyeksion payvandlash elektrodi sifatida bo‘lishi mumkin, bu esa keyingi tadqiqotlarni talab qiladi.

Natijalar volfram–mis elektrodlari uchun quyidagi tartibdagi minimal sinov dasturini taklif qilishga imkon beradi: (1) yuqori haroratdagi qattiqlik 600 °C va undan yuqorigacha, namunani sovitmasdan o‘lchash; (2) qoplamali po‘lat bilan kontakt qarshiligining payvandlash davomidagi o‘zgarishi; (3) ruxli sirt bilan yopishish va qotishma hosil qilish tajribasi; (4) kamida mis qotishmasi bilan bir xil sharoitda ish yuzasi diametri o‘sishi va materialning yo‘qolishini kuzatuvchi resurs sinovi. Dastlabki ikki o‘lchovni laboratoriya sharoitida bajarish mumkin va ular qolgan sinovlarga o‘tish zarurligini aniqlashga yordam beradi.

Tahlilning cheklovlari: qiymatlar turli sinash usullari va yuklanishlarda olingan, shuning uchun 2-rasm nuqtalari faqat yo‘nalishni ko‘rsatadi; dispersion mustahkamlangan misning xossalari bir sharhdagi keltirma sifatida kiritilgan (Jia va boshq., 2026); mis qotishmalari bo‘yicha qiymatlar kam sonli yaqin tadqiqotlardan olingan; «ma’lumot yo‘q» baholari tahlil qilingan manbalar doirasi bilan cheklangan.

**Xulosalar:**

1. Nuqtaviy payvandlash elektrodining ishdan chiqishi ikki o‘zaro bog‘liq tarmoqda – issiqlik (yumshash, donlar o‘sishi, deformatsiya) va kimyoviy (rux diffuziyasi, latun, yopishish) tarmoqlarda – kechadi va ish yuzasi maydonining kattalashishi hamda payvand yadrosining kichrayishi bilan yakunlanadi; shu asosda beshta funksional talab (T1–T5) ajratildi.

2. Mis qotishmalari uchun talablar miqdoriy ravishda belgilanadi: o‘tkazuvchanlik 78–88 foiz,

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

boshlang‘ich qattiqlik 150–190 HV, xizmat davomida qattiqlik taxminan 90 HV gacha tushadi, 500 payvanddan keyin rux diffuziya qatlami 8–20 μm, ish yuzasi materialining yo‘qolishi 0,20–0,45 mm.

3. Volfram–mis kompozitlarida o‘tkazuvchanlik eng yaxshi holatda 58,6 foizga, qattiqlik 238 HV ga (shimdirish usuli) yetadi; mis qotishmalariga nisbatan o‘tkazuvchanlik past, xona haroratidagi qattiqlik yuqori. Yuqori haroratda mustahkamlik mis fazasining yumshashi hisobiga keskin pasayadi (W–30Cu da oquvchanlik chegarasi 432 dan taxminan 80 MPa gacha, 800 °C).

4. Volfram–mis uchun elektr va issiqlik o‘tkazuvchanlik (xona haroratida) bo‘yicha dalillar yetarli; yuqori haroratdagi mustahkamlik bo‘yicha cheklangan; yuqori haroratdagi qattiqlik, po‘lat bilan kontakt qarshiligi, ruxga nisbatan passivlik va elektrod resursi bo‘yicha tekshirilgan nashr etilgan ma’lumot topilmadi.

5. Volfram–mis kompozitlarini payvandlash elektrodi sifatida tanlash to‘g‘risidagi qaror yuqori haroratdagi qattiqlik, kontakt qarshiligi, rux bilan o‘zaro ta’sir va resurs sinovlari bajarilgandan keyin asoslanishi mumkin; bu o‘lchovlar sinov dasturining birinchi qadamlari bo‘lishi kerak.

**Minnatdorchilik.** Mualliflar tadqiqot davomida ishlab chiqarish va texnik ma’lumotlardan foydalanish imkonini bergani uchun “O‘zbekiston texnologik metallar kombinati” aksiyadorlik jamiyatiga, laboratoriya resurslari va ilmiy maslahat uchun Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti rahbariyatiga minnatdorchilik bildiradi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] Biele, L., Schaaf, P., & Schmid, F. (2021). Method for contact resistance determination of copper during fast temperature changes. Journal of Materials Science. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05490-w

[2] Chen, W., Shi, Y., Dong, L., & et al. (2017). Infiltration sintering of WCu alloys from copper-coated tungsten composite powders for superior mechanical properties and arc-ablation resistance. Journal of Alloys and Compounds, 728, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.164

[3] Chen, Y.-Y., Liu, Z., Meka, S. R., Huang, Y., & et al. (2025). Effect of interface structure on advanced bonding between tungsten-based materials and Cu alloys: A review. Tungsten, 7(3), 479–496. https://doi.org/10.1007/s42864-024-00313-w

[4] Franczak, K., Kwaśniewski, P., Kiesiewicz, G., Ściężor, W., Sadzikowski, M., Kordaszewski, S., Micek, P., Kuca, D., & Pestrak, R. (2025a). Investigation of electrode cap life made of new Cu–Cr–Zr copper alloys with scandium addition dedicated for resistance spot welding of galvanized steel sheets. Materials, 18(21), 4950. https://doi.org/10.3390/ma18214950

[5] Franczak, K., Kwaśniewski, P., Kiesiewicz, G., Ściężor, W., Sadzikowski, M., Kordaszewski, S., & Noga, P. (2025b). Research on zinc diffusion in the resistance spot welding process of galvanised steels using Cu-Sc and Cu-Zr alloy electrodes. Welding in the World, 70(7), 2643–2658. https://doi.org/10.1007/s40194-025-02116-0

[6] Hamedi, M., & Atashparva, M. (2017). A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. Welding in the World, 61(2), 269–290. https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4

[7] Hou, C., Song, X., Tang, F., & et al. (2019). W–Cu composites with submicron- and nanostructures: Progress and challenges. NPG Asia Materials, 11, 74. https://doi.org/10.1038/s41427-019-0179-x

[8] Jia, Y., Guo, L., Li, W., Zhang, S., Shi, X., & Yin, S. (2026). Recent development of oxide dispersion-strengthened copper alloys for application in nuclear fusion. Journal of Nuclear Engineering, 7(1), 10. https://doi.org/10.3390/jne7010010

[9] Kim, Y. D., Oh, N. L., Oh, S. T., & et al. (2001). Thermal conductivity of W–Cu composites at various temperatures. Materials Letters, 51, 420–424.

[10] Liu, J. K., Wang, K. F., Chou, K. C., & et al. (2020). Fabrication of ultrafine W–Cu composite powders and its sintering behavior. Journal of Materials Research and Technology, 9, 2154–2163. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.046

[11] Liu, T., Han, Y., Jia, D., & et al. (2024). Graphene-enhanced CuW composites for high-voltage circuit breaker electrical contacts. Applied Sciences, 14, 2731. https://doi.org/10.3390/app14072731

[12] Long, W., Yan, Y., You, M., & et al. (2025). High-performance W–Cu composites preparation technology, modulation strategy and strengthening mechanism. Journal of Materials Research and Technology, 36, 3240–3260.

[13] Lungu, M. V. (2019). Synthesis and processing techniques of tungsten copper composite powders for electrical contact materials – a review. Oriental Journal of Chemistry, 35, 491–515. https://doi.org/10.13005/ojc/350201

[14] Matějíček, J. (2021). Preparation of W–Cu composites by infiltration of W skeletons – review. In METAL 2021: 30th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, Czech Republic. https://doi.org/10.37904/metal.2021.4248

[15] Mondal, A., Upadhyaya, A., & Agrawal, D. (2013). Effect of heating mode and copper content on the densification of W–Cu alloys. Indian Journal of Materials Science, 2013, 603791. https://doi.org/10.1155/2013/603791

[16] Ouyang, M., Wang, C., Zhang, H., & et al. (2021). Effects of bonding treatment and ball milling on W–20 wt.% Cu composite powder for injection molding. Materials, 14, 1897. https://doi.org/10.3390/ma14081897

[17] Parker, J. D., Williams, N. T., & Holliday, R. J. (1998). Mechanisms of electrode degradation when spot welding coated steels. Science and Technology of Welding and Joining, 3, 65–74. https://doi.org/10.1179/stw.1998.3.2.65

[18] Rdzawski, Z., Kwaśniewski, P., Głuchowski, W., Łagoda, M., Maleta, M., Boczkal, S., & Franczak, K. (2023). Research on changes in microstructures and mechanical properties of welding caps as a result of their usage during resistance spot welding process. Archives of Metallurgy and Materials, 68(1), 295–306. https://doi.org/10.24425/amm.2023.141506

[19] Safahi, H., Baniassadi, M., & Faraji, G. (2024). Processing of fully dense and high conductivity W–20Cu composite via copper melt infiltration into a pressed tungsten wire skeleton. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 124, 106809. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106809

[20] Safahi, H., Sabour, M. R., Baniasadi, M., & et al. (2025). Fracture behavior of W–20Cu composite processed via copper melt infiltration into tungsten wire skeleton. Engineering Failure Analysis, 172, 109426. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109426

[21] Sheikhi, M., Valaee-Tale, M., Mazaheri, Y., & et al. (2024). Electrode lifetime in resistance spot welding of coated sheets: Experiments and modeling. Materials Today Communications, 38, 107903.

[22] Tejado, E., v. Müller, A., You, J. H., & Pastor, J. Y. (2018). Evolution of mechanical performance with temperature of W/Cu and W/CuCrZr composites for fusion heat sink applications

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

Baxadirov, K. G., & Xakimov, S. B. (2026). Nuqtaviy qarshilik payvandlash elektrodlariga qo‘yiladigan talablar va volfram–mis kompozitlarini baholash mezonlari. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(4). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.6