

Arustamov Vladimir Nikolaevich

Ion plazmasi va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi,
fizika-matematika fanlari nomzodi,

[Tel: \(90\)189 85 10](tel:(90)189 85 10) e-mail: v.arustamov@iplt.uz

Kaxramonov Boburjon Ro'ziboevich

Ion plazmasi va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi, PhD.

[Tel: \(97\)141 22 85](tel:(97)141 22 85) e-mail: boburjon2285@gmail.com.

Khudayqulov Ilyos Xolmurodovich

Ion plazmasi va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi, PhD.

[Tel: \(90\)352 07 86](tel:(90)352 07 86) e-mail: i_khudaykulov@mail.ru.

UO'K 57.022.023.577.11.12

**VAKUUM YOY RAZRYADI JARAYONIDA KOAKSIAL
ELEKTROD SISTEMALARIDA TOMCHI FRAKSIYASINI O'LCHAM
TAQSIMOTI**

Annotatsiya: Vakuum yoy razryadlari (VYR) zamonaviy yuqori samarali qoplama texnologiyalarida, jumladan, ion-plazma purkash, katodik yoyli bug'lanish va metall keramika qoplamalarini olishda keng qo'llanilmoqda. Катоддан 15–23 sm masofada kichik diametrli tomchilar (1 - 4 μ m) ning ion oqimidagi ustunligi kuzatildi. Ток зичлигининг қиймати катоддан 2 ва 10 sm masofaga keskin kamayishi aniqlandi. Ushbu kattaliklanning tajriba asosida aniqlanishi vakuum yoy asosidagi texnologiyalarni yanada optimallashtirishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Vakuum-yoy plazma, katod eroziyas, ionlashish darajasi, tok zichligi, tomchi taqsimoti, mis, titan, alyuminiy, mikrotomchilar.

Арустамов Владимир Николаевич

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий с.н.с.

кандидат физико-математических наук

Кахрамонов Бобуржон Рузибоевич

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий с.н.с. PhD.

Худайкулов Илёс Холмурадович

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий с.н.с. PhD.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ФРАКЦИЙ КАПЕЛЬ В КОАКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМАХ В ПРОЦЕССАХ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Аннотация: Вакуумные дуговые разряды (ВДР) широко используются в современных высокопроизводительных технологиях нанесения покрытий, таких как ионно-плазменное распыление, катодное дуговое испарение и изготовление металлокерамических пленок. Было обнаружено, что на расстоянии 15–23 см от поверхности катода в ионном потоке преобладают мелкие капли (диаметром 1–4 мкм). Более того, наблюдалось резкое уменьшение плотности тока на расстояниях катод–образец 2 см и 10 см. Экспериментальное определение этих пространственных распределений дает критически важные данные для оптимизации процессов осаждения на основе вакуумной дуги.

Ключевые слова: вакуумно-дуговая плазма; эрозия катода; степень ионизации; плотность тока; распределение размеров капель; медь; титан; алюминий; микрокапли.

Arustamov Vladimir Nikolaevich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies Senior Researcher,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Kakhramonov Boburjon Ruziboevich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies Senior Researcher, PhD.

Khudaykulov Ilyos Kholmuradovich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies Senior Researcher, PhD.

SIZE DISTRIBUTION OF DROPLET FRACTIONS IN COAXIAL ELECTRODE SYSTEMS DURING VACUUM ARC DISCHARGE PROCESSES

Abstract: Vacuum arc discharges (VAD) are extensively employed in state-of-the-art high-performance coating technologies, such as ion-plasma sputtering,

cathodic arc evaporation, and the fabrication of metal-ceramic films. It was found that, at 15–23 cm from the cathode surface, small droplets (1–4 μm in diameter) predominate within the ion flux. Moreover, the current density was observed to decrease sharply at cathode–sample distances of 2 cm and 10 cm. The experimental determination of these spatial distributions provides critical data for optimizing vacuum-arc-based deposition processes.

Keywords: Vacuum-arc plasma; cathode erosion; ionization degree; current density; droplet size distribution; copper; titanium; aluminum; microdroplets.

Kirish

VYRida katod sirtidan hosil boʻladigan plazma oqimi va unga bogʻliq eroziya hodisalari zamonaviy vakuumli qoplama texnologiyalarining nazariy asoslaridan biri sifatida koʻplab tadqiqotchilar tomonidan chuqur oʻrganilgan. Bu razryadlarda yuzaga keladigan katod dogʻlari yuqori lokal haroratda bugʻlanish va erish jarayonlarini boshlaydi. Natijada, yuqori energiyali ion va tomchi oqim hosil boʻladi [1]. Metall plazmasining koʻp komponentli, yuqori ionlashgan holati, shuningdek, yuqori tok ostida hosil boʻladigan eroziya oqimining kinetik xususiyatlari, tajriba asosida aniqlangan va uning fizikaviy mohiyati chuqur yoritilgan [2]. VYRining elektr-mexanik va energetik xususiyatlari, jumladan, ion kinetikasi, elektron harorati va katod–anod oʻzaro taʼsiri sistematik ravishda nazariy va eksperimental jihatdan yoritilgan [3-4]. Plazmadagi ion energiyasi va ionlashish darajasining tok zichligiga bogʻliqligi tajribada aniqlanib, yuqori tok ostida bu parametrlarning eksponensial oʻsishini koʻrsatgan [5]. Ion oqimining radial taqsimoti esa klassik $1/R^2$ qonuniga muvofiq ekanligi isbotlangan [6], hamda plazma modellari orqali katoddan ajralgan tomchilarning tarqalish xususiyatlari statistik va kinetik mexanika asosida modellashtirilgan [7]. Yuqori energiyali plazmaning qattiq jism sirtiga taʼsiri natijasida yuzaga keladigan struktura oʻzgarishlari va fazoviy izotropiya masalalari ham chuqur tahlil qilingan [8]. Katoddan ajralgan tomchilarning oʻlchami va masofaga bogʻliqligi elektron mikroskopiya orqali tekshirilgan boʻlib, natijalar tomchili oqimning kinetik yoʻnalishini ochib bergan [9]. Shu bilan birga tok zichligi bilan katod materialining

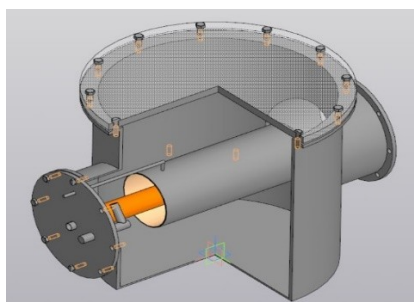
chiqish ishi o'rtasidagi bog'liqlik turli metall materiallar uchun farqlanishi aniqlangan [10].

Zamonaviy optik va tok zichligi sensorlari asosida olib borilgan o'lchovlar vakuum yoy plazmasining energetik va morfologik tahlilini yuqori aniqlikda bajarish imkonini bergan [11]. Yuqori ionlashgan plazma ostida olingan qoplamalarda yuqori silliqlik va zichlik namoyon bo'lishi eksperimental tarzda asoslangan [12]. Shuningdek po'lat quvurlarni keng qamrovli vakuumli yoy bilan ishlov berish va ularning ichki yuzasiga maxsus qoplamalarni qoplamalarni qoplash yuqori korroziyaga qarshi himoyasini ta'minlaydi [13].

Ushbu tadqiqotda aynan shunday konfiguratsiyada vakuum yoy razryadi orqali hosil bo'lgan eroziya oqimining strukturaviy va ion-komponent xossalari eksperimental usullar bilan tahlil qilindi. Olingan natijalar vakuum yoy usulida changlatish asosida metall quvurlarning eroziyalanishi, tomchi fraksiyasini masofaga bog'liqligi va plazma tokining zichligining bog'liqligi hamda ahamiyati tushuntirib berilgan.

Tajriba qurilmasi va metodikasi

Tadqiqot vakuum-yoy razryadi asosida ishlaydigan laboratoriya qurilmasida olib borildi (1-rasm). Ushbu qurilma vakuum kamerasi, koaksial silindrsimon elektrodlar tizimi, vakuumli nasos bloki, elektr quvvat manbai, ion-zond tizimi hamda nazorat panelidan iborat. Qurilmaning asosiy funksiyasi — metall quvurlar ichki sirtini vakuum yoy yordamida tozalash va ion-plazma asosida qoplama hosil qilishdan iborat. Katod va anod sifatida ishlatiladigan silindrsimon elektrodlar o'zaro koaksial joylashgan bo'lib, ular orasidagi fazoda ionlashgan bug' va tomchilardan tashkil topgan plazma oqimi shakllanadi.



1-rasm. Koaksial elektrodlar asosida vakuum-yoy razryadi orqali sirt tozalash va qoplama hosil qilish uchun ishlab chiqilgan laboratoriya qurilmasi 3D modeli.

Tajriba davomida vakuum kameradagi ishchi bosim 10^{-3} Pa gacha pasaytirildi. Elektrodlar orasidagi masofa 10 sm dan 25 sm gacha bosqichma-bosqich o'zgartirilib, har bir holatda ion oqimining tok zichligi zondlash usuli orqali bevosita o'lchandi.

Katoddan ajralib chiqayotgan bug'langan atomlar va ionlarning oqimi quyidagi ifoda asosida modellashirildi:

$$G \approx N_a v_a m_a \quad (1)$$

bu yerda: G - umumiy oqim (g/s), N_a - zarrachalar son zichligi (cm^{-3}) hamda v_a - ularning o'rtacha tezligi (cm/s), m_a esa - zarracha massasi (g).

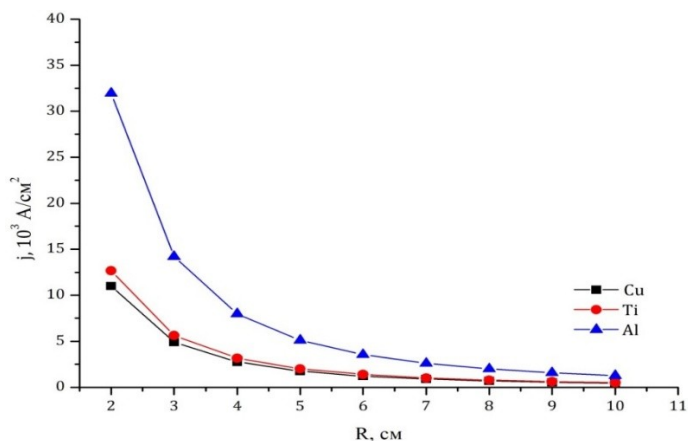
Shu asosda zarrachalar soni quyidagicha baholandi:

$$N_a \approx \frac{Q}{m_a v_a} \quad (2)$$

bu yerda Q –katoddagi (material) issiqlik miqdori.

Natjilar va tahlillar

Tadqiqot natijalarida vakuum yoy razryadi boshlanganda so'ng koaksial silindrsimon elektrodlar orasidagi ion toki zichligining masofaga bog'liqlik grafigi quyidagi 2-rasmda keltirilgan.



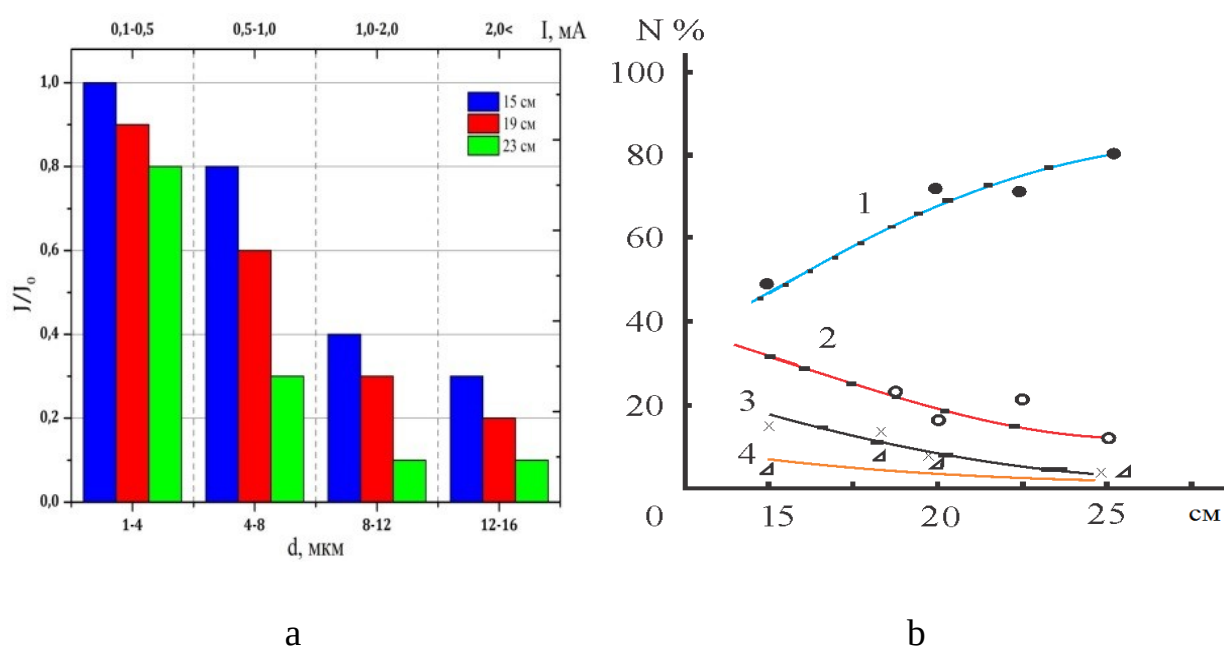
2-rasm. Mis, titan va alyuminiy uchun tok zichligining yoy zaryadidagi masofaga bog'liqligi.

Bu jarayonda mis, titan va alyuminiy uchun ion toklari zichligi o'lchangan, 2-rasmdagi grafikdan ko'rishimiz mumkinki katod oldi sohasida hosil bo'lgan ionlar oqimi anodga yaqinlashgan sari kamayib boradi. Bunda, katod oldi sohasida hosil bo'lgan ionlar musbat ishoraga ega anod ham musbat ishoraga ega bo'lganligi uchun anodga yaqin hududda ionlarning konsentrasiyasi kamayadi. Ko'rinadiki, 80V kuchlanishda mis uchun taxminan katoddan 1 sm masofada ion toki zichligi $44 \cdot 10^3 \text{ A/sm}^2$ ga to'g'ri kelyapti. Katoddan uzoqlashgan sari ion tok zichligi kamayib 8sm masofada $0,69 \cdot 10^3 \text{ A/sm}^2$ teng bo'lmoqda. Xuddi shu jarayonni titan uchun tajribada ko'rganimizda katoddan 1sm masofada $50 \cdot 10^3 \text{ A/sm}^2$ ga 8sm masofada esa $0,79 \cdot 10^3 \text{ A/sm}^2$ ga to'g'ri keldi. Bundan kelib chiqadiki mis va titan uchun o'tkazgan tajribamizda olingan natijalar ustma ust tushganini va qiymatlari bir biriga yaqin ekanligini ko'rishimiz mumkin. Natijalarni bir biriga yaqinligini bir xil sharoitda o'tkazilgan tajribadan va mis bilan titanning chiqish ishi bir biriga yaqin ekanligi orqali tushuntirish mumkin. Alyuminiyda esa chiqish ishi titan va misga nisbatdan kichik ekanligi sababli hosil bo'layotgan tok zichligi yuqori ekanligini ko'rsatdi. Al barcha masofalarda mis va titanga nisbatdan eng yuqori tok zichligiga ega bo'lib, bu uning katod material sifatida yuqori ionlashuv ko'effitsientiga ega ekanligini bildiradi. Cu va Ti oqimlari o'zaro yaqin qiymatlarda bo'lib, ular ham masofa oshishi bilan barqaror pasayadi. Masofa 2 sm dan 10 sm gacha oshganda tok zichligi keskin kamayadi, bu ion oqimining tarqalish qonuniyatlariga mos keladi.

Eroziyaga uchragan tomchilar tezligi $v_a = 5 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ sm/s}$ va $m_a \cong 10 - 22 \text{ g}$ massasini hisobga olgan holda, biz $N_a \cong 2 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ sm}^3$ ni olamiz. Bundan kelib chiqadiki, erkin yugurish yo'l uzunligi $\lambda \cong 1 - 5 \text{ sm}$ ni tashkil qiladi, katod tekisligidan katta masofada Tomchilar uchish vaqtida to'qnashadi [14].

Koaksial silindrsimon elektrodlar orasidagi ion toklarini erozialangan tomchi o'lchamiga bog'liqligi 3a-rasmda keltirilgan. Bunda eroziyaga uchragan tonchilar

shartli ravushda 4 xil diametrga (1-4, 4-8, 8-12, 12-16 μm) bo'lib, erozion oqimning nisbiy ion oqimi zichligi (J/J_0) turli masofalarda (15, 19 va 23 sm) tahlil qilindi. J_0 -max qiymat tomchi diametri 4 μm gacha bo'lgan katoddan 15 sm masofada deb olinib, qolgan ion toklari shu qiymatga nisbatdan solishtirildi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, tomchilar diametri oshgan sari oqim zichligi kamaymoqda. Eng yuqori oqim 4 μm gacha oralig'ida kuzatildi va bu qiymat katoddan 15 sm masofada maksimal darajada bo'ldi. Masofa oshgani sari barcha diametrlar uchun oqim zichligi sezilarli ravishda kamaydi.



3-rasm. Eroziyaga uchragan po'latda ion tok zichligining katod yuzasidan turli masofadagi ion o'lchamiga bog'liqligi. (a); MikroTomchilarning o'lchamiga ko'ra taqsimoti: 1 – tomchi hajmi- 4 mkmgacha bo'lgan tomchilar; 2 – tomchi hajmi- 4-8 mkmlik tomchilar; 3 – tomchi hajmi- 8-12 mkmlik tomchilar; 4 – tomchi hajmi -12-16 mkmlik tomchilar (b).

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, erozion oqimda asosan kichik diametrli tomchilar (1-4 μm) ustunlik qiladi, bu ularning yuqori ionlashish darajasiga ega ekanligini anglatadi. 15 sm masofada barcha Tomchi o'lchamlari bo'yicha oqim zichligi yuqori bo'lib, bu masofa optimal sharoitlar ostida

ishlatilganini bildiradi. Tomchi diametri ortgan sari (ayniqsa 8-16 μm oralig'ida) oqim zichligi ancha kamaygan, bu katta tomchili Tomchilar oqimda kam ishtirok etishini ko'rsatadi.

Turli o'lchamdagi tomchilarning umumiy oqimdagi foiz nisbati katoddan turli masofalar (15-25 sm) bo'yicha taqsimoti 3b-rasmda keltirilgan. Rasmdan ko'rishimiz mumkinki, tomchilar diametri 4 μm gacha bo'landa masofa oshgan sari 40% dan 80% gacha oshganligini ko'rsatmoqda. Yirik diametrli tomchilar miqdori esa katoddan uzoqlashgan sari kamayadi.

Xulosa

O'tkazilgan tadqiqotlar vakuum yoy razryadi sharoitida koaksial silindrsimon elektrodlar orasida hosil bo'ladigan eroziya oqimining fazoviy-taqsimiy xossalari va ion-komponent tarkibini chuqur o'rganish imkonini berdi. Katoddan uzoqlashgan sari ion oqimining zichligi keskin kamayadi va bu pasayish $1/R^2$ qonuniyatiga yaqin tarzda sodir bo'lishi aniqlangan. Ayniqsa, 15–23 sm oralig'ida kichik diametrli tomchilar (1 - 4 μm) ning ion oqimidagi ustunligi kuzatilib, bu fraksiya yuqori ionlashuv darajasiga ega ekanligi bilan izohlanadi. Katoddan 2 sm dan 10 sm masofagacha oshganda tok zichligi keskin kamayadi, bu ion oqimining tarqalish qonuniyatlariga mos keladi.

Ushbu parametrlarni hisobga olish, vakuum yoy asosida yuqori sifatli va bir jinsli qoplamalar hosil qilishda nazariy va amaliy jihatdan asos bo'lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Андерс А. Физика катодных пятен и энергия-конденсационная технология // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28, № 6. – С. 471–490.
2. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. – Noyes Publications, 1995. – 885 p.
3. Месяц Г. А. Импульсные газоразрядные и плазменные процессы. – Москва: Наука, 2000. – 382 с.
4. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. – John Wiley & Sons, 2005. – 813 p.

5. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. – Springer, 2008. – 428 p.
6. Kutzner J., Hippler R. Ion energy distributions in pulsed vacuum arc plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1994. – Vol. 27, No. 10. – P. 2178–2185.
7. Kushner M. J. Modelling of microstructure evolution during plasma processing // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85, No. 4. – P. 2103–2110.
8. Степанов В. С., Абраменков А. А. Воздействие плазмы вакуумной дуги на структуру металлических поверхностей // Поверхность. – 2010. – № 8. – С. 56–61.
9. Евтушенко А. Ю. Исследование капельного потока в вакуумной дуге с помощью электронной микроскопии // Вакуумная техника и технология. – 2012. – № 3. – С. 74–78.
10. Петров А. В., Корешков А. В. Связь плотности тока с выходной работой в вакуумной дуге // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 11. – С. 98–102.
11. Алявдин А. А., Сазонов С. В. Использование современных оптических методов для диагностики плазменных потоков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – № 2. – С. 32–35.
12. Chen H., Zhang G. Influence of ion energy on microstructure and properties of coatings deposited by vacuum arc // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 302. – P. 285–290.
13. Arustamov V. N. et al. Plasma Vacuum-Arc Treatment Technology for the Metal Pipe Surfaces of Solar Thermal Power Plants // Applied Solar Energy. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 483-490. DOI: 10.3103/S0003701X24602643
14. В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х.Худайкулов, Б.Р. Кахрамонов «К вопросу о генерации плазменного потока вакуумным дуговым разрядом и осаждения покрытий». Узбекский физический журнал, 2018г.Том 20 №3 сс. 192-196, [01.00.00, № 5]. <https://doi.org/10.52304/.v20i3.90>