

Дослідження плазми електродугового розряду між композиційними електродами на основі міді

І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич, М. І. Гречанюк*,
А. В. Лебідь, Р. В. Мінакова*, П. В. Сорока

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, van@univ.kiev.ua

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ,
29min@ipms.kiev.ua

Досліджено плазму електродугового розряду в потоці аргону між композиційними Cu—Mo електродами, виготовленими за різними технологіями. Методами оптичної емісійної спектроскопії отримано радіальні розподіли температури та електронної концентрації для струмів 3,5 та 30 А. Дані експериментальні результати були використані для розрахунку складу плазми у припущенні локальної термодинамічної рівноваги.

Ключові слова: плазма електродугового розряду, композиційні Cu—Mo електроди, склад плазми та вміст металів у розрядному проміжку.

Вступ

Композиційні матеріали на основі міді набули широкого застосування в якості матеріалів для електродів та контактів комутуючих приладів електротехнічного призначення (реле, комутатори, розмикачі тощо). Ефективність роботи таких пристроїв визначається ерозійною стійкістю електродного матеріалу і, отже, особливістю процесів переносу маси цього матеріалу у розрядному проміжку. Необхідно зазначити, що кількість парів електродного походження в розряді, який виникає при процесах комутації, залежить як від структури та складу електродів, так і від параметрів плазми [1, 2]. Саме тому дослідження параметрів такої плазми представляє інтерес для оптимізації складу та технології виготовлення композиційних матеріалів.

Найчастіше для виготовлення композиційних матеріалів застосовують методи порошкової металургії [3]: твердофазне спікання, що чергується з допресуванням; рідиннофазне спікання та капілярне просочування в поєднанні з додатковими методами обробки (термічна, обробка тиском, ультразвукова тощо). Композиційні матеріали на основі міді та срібла, які зміцнені оксидами, одержують також методами внутрішнього окиснення.

На сьогодні альтернативним методом одержання контактних композиційних матеріалів є електронно-променево випаровування металевих і неметалевих матеріалів у вакуумі. Попередніми дослідженнями вільно існуючої дуги між композиційними Cu—Mo електродами встановлено формування характерної вторинної структури робочого шару на поверхні електродів [4]. Ймовірно, значну роль у формуванні таких структур відіграють оксиди. Саме через цю обставину для усунення впливу кисню на формування вторинної структури доцільним є виконання аналогічних досліджень у потоці аргону.

У даній роботі досліджується електрична дуга в потоці аргону між Cu—Mo та Cu—Mo—LaB₆ електродами, отриманими методами порошкової металургії, та Cu—Mo електродами, одержаними методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі.

Експеримент

Електричну дугу запалювали між неохолоджуваними електродами у потоці аргону зі швидкістю 6,33 л/хв. Міжелектродний проміжок складав 8 мм, спектроскопічні дослідження властивостей плазми виконували для середнього перерізу стовпа дуги при струмах 3,5 або 30 А. З метою запобігання надмірного випаровування та електричної ерозії електродного матеріалу імпульси струму 30 А (30 мс) накладалися на “черговий” струм 3,5 А.

В якості електродів використовували циліндричні Cu—Mo (тип 1) та Cu—Mo—LaB₆ (тип 2) електроди діаметром 6 мм, виготовлені за технологією твердофазного спікання (рис. 1, а), а також пластини Cu—Mo (тип 3) товщиною 1 мм, отримані за технологією електронно-променевого випаровування з наступною конденсацією у вакуумі (рис. 1, б). Параметри електродів наведено у табл. 1.

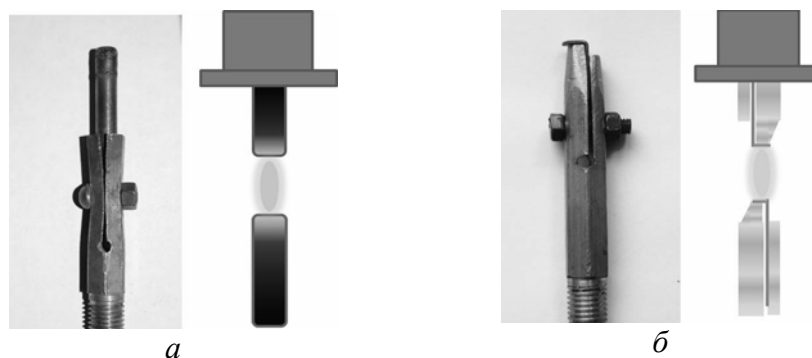


Рис. 1. Зовнішній вигляд електродів у тримачах та геометрія стовпа дуги між циліндричними та пластинчастими (тип 3) електродами.

Т а б л и ц я 1. Параметри композиційних Cu—Mo електродів

Тип	Склад	Технологія виготовлення	Співвідношення Cu : Mo, % (мас.)	Структура
1	Cu—Mo	Твердофазне спікання	50 : 50	Гетерогенна композиційна
2	Cu—Mo—LaB ₆	Твердофазне спікання	50 : 50 (LaB ₆ < 1%)	Гетерогенна композиційна
3	Cu—Mo	Електронно-променеве випаровування—конденсація у вакуумі	88 : 12 (Y, Zr < 1%)	Дисперсна шарувата

В залежності від технології виготовлення структура та склад електродів є різними. Електроди типів 1 і 2 мають гетерогенну композиційну структуру, співвідношення (% (мас.)) між Cu та Mo — 50 : 50.

Для електродів, виготовлених методом електронно-променевого випаровування—конденсації у вакуумі (тип 3), характерна шарувата структура. Як показали дослідження [4], вміст молібдену змінюється від шару до шару і може складати від 1 до 20% при середньому значенні 12%. На відміну від робіт [4, 5], у даній серії експериментів дуга горіла нормально до поверхні конденсації шарів молібдену.

Вимірювання радіальних розподілів випромінювання спектральних ліній

Через просторову та часову нестабільність використовували метод однократної томографічної реєстрації випромінювання спектральних ліній. Швидкісне сканування просторових розподілів інтенсивності випромінювання забезпечувала ПЗЗ-лінійка (B/W) Sony ILX526A з 3000 пікселів. Разом із спектральним приладом вона дозволяла виконувати записи радіального розподілу випромінювання у середньому перерізу розряду нестационарної дуги. Для керування процесом збору та обробки експериментальних даних застосовували спеціально розроблений програмний інтерфейс [6].

Визначення просторового (радіального) розподілу випромінювання базується на припущенні існування осової симетрії плазмового джерела. В цьому випадку є можливість перерахування спостережуваних інтенсивностей випромінювання у локальні [7]. Крім того, оскільки досліджувана електрична дуга не стабілізована як у просторі, так і в часі, використовували статистичну обробку експериментальних результатів.

Вимірювання радіальних розподілів контурів випромінювання спектральних ліній

Для реєстрації радіальних розподілів контурів спектральних ліній застосовували установку, оптична схема якої детально описана в роботі [8]. В цій установці селекцію випромінювання плазми за певними кутами забезпечує інтерферометр Фабрі—Перо у режимі еталона, сумісного з приладом попередньої монохроматизації. Таким чином, вимірювання ширини певного

інтерференційного максимуму дає змогу визначити ширину спектральної лінії у відповідній точці плазмового об'єкту.

Розроблений програмний інтерфейс дозволяє встановити розподіл електронної концентрації у розрядному каналі за умови, що ефект Доплера незначно впливає на розширення досліджуваної спектральної лінії у порівнянні з квадратичним ефектом Штарка.

Результати та їх обговорення Визначення температури

Для визначення температури плазми використовували метод діаграм Больцмана. Для застосування цього методу спочатку необхідно вибрати “зручні” для діагностики спектральні лінії, які мають відповідати певним вимогам: ці лінії повинні бути ізольовані в спектрі випромінювання і мати достатню інтенсивність для їх надійної реєстрації. Крім того, різниця між енергіями збудження їх верхніх рівнів повинна бути якомога більшою, що дає змогу визначити температуру з мінімально можливою похибкою. Тому для розрахунку температури плазми було залучено наступні спектральні лінії CuI: 427,5; 465,1; 510,5; 515,3; 521,8; 570,0; 578,2; 793,3 та 809,3 нм. Значення спектроскопічних констант взято з роботи [9].

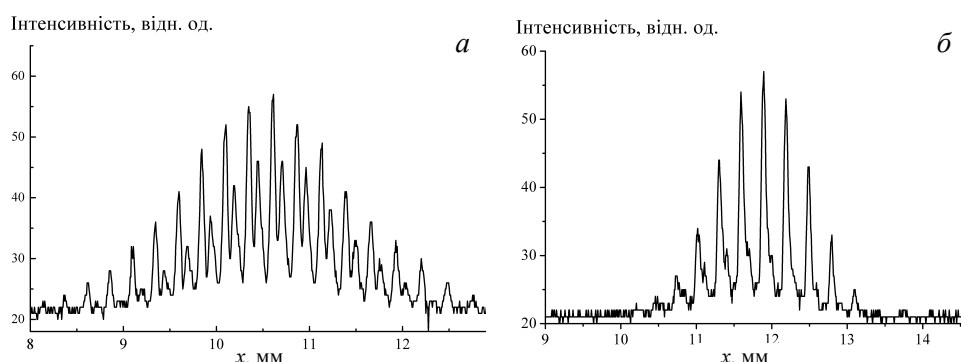


Рис. 2. Інтерферограми ліній CuI 427,5 (а) та 465,1 нм (б), одержані при дослідженні плазми дуги між електродами з композиційного матеріалу Cu—Mo.

Слід також зазначити, що спектроскопічні дослідження плазми електродугового розряду, яка містить пари кількох хімічних елементів, потребують обачного вибору спектральних ліній для діагностики. У випадку композиційного матеріалу мідь—молібден дослідження контурів спектральних ліній показали, що лінії CuI 427,5 та 465,1 нм перекриваються лініями молібдену MoI 427,6 та 465,2 нм (рис. 2). Саме тому дані лінії міді не можуть бути використані для діагностики такої плазми і в подальших розрахунках не використовувались.

На рис. 3 наведено радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду при силі струму 3,5 та 30 А. Температури розраховано методом діаграм Больцмана з використанням спектральних ліній CuI.

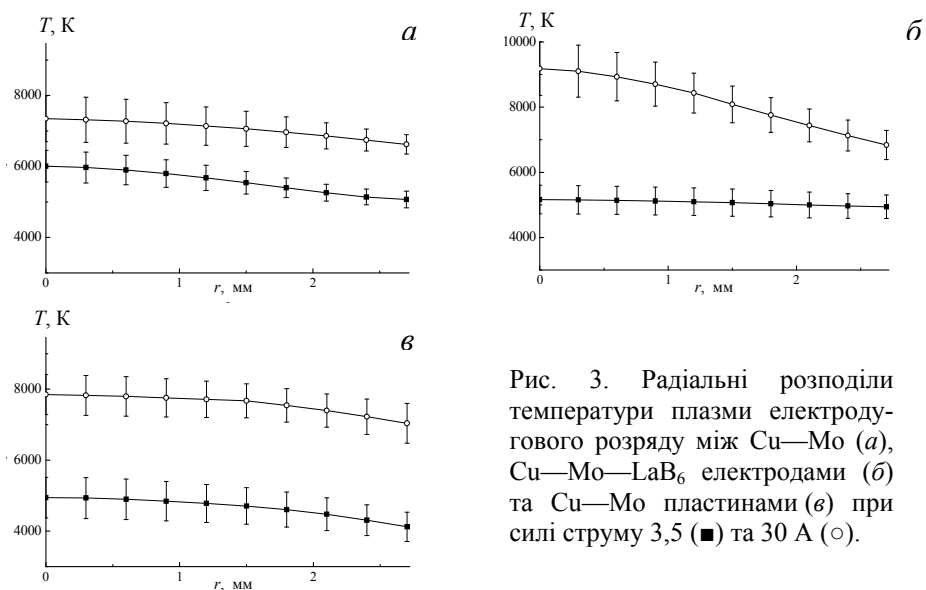


Рис. 3. Радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між Cu—Mo (а), Cu—Mo—LaB₆ електродами (б) та Cu—Mo пластинами (в) при силі струму 3,5 (■) та 30 А (○).

Визначення електронної концентрації

Електронну концентрацію в плазмі знаходили з півширини спектральної лінії, коли домінуючим механізмом уширення є квадратичний ефект Штарка:

$$N_e = K \cdot \Delta\lambda,$$

де K — коефіцієнт пропорційності, який визначає концентрацію електронів, нормовану на півширину лінії. Значення констант розширення ліній взято з роботи [10].

Електронну концентрацію виміряли з півширини спектральних ліній на експериментально зареєстрованих інтерферограмах за допомогою спеціально розробленого програмного інтерфейсу [8]. Як видно на рис. 4, розраховані профілі електронної концентрації для сили струму 30 А, одержані з півширини спектральних ліній атомів міді, для різних типів електродів досить добре співпадають.

На жаль, діапазон ширин спектральних ліній, які можна виміряти наявним інтерферометром Фабрі—Перо (у режимі еталона), не дозволяє виконати вимірювання контурів ліній, співвимірних з інструментальним контуром установки. Саме така ситуація реалізується у режимі роботи дуги при силі струму 3,5 А. Тому для визначення електронної концентрації пропонується скористатися алгоритмом, який спирається на раніше отримані параметри дугової плазми [9]. Розраховані таким чином профілі електронної концентрації для 3,5 А наведено на рис. 4.

Рівноважний склад плазми

Якщо плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, її можна описати системою рівнянь, яка в першу чергу залежить від сорту частинок, що знаходяться в її об'ємі. У плазмі електродугового розряду між композиційними Cu—Mo електродами в потоці аргону слід враховувати також наявність атомів та іонів аргону. Крім того, внаслідок термічної дії розряду на електроди в плазмі будуть присутні атоми та іони міді та молібдену.

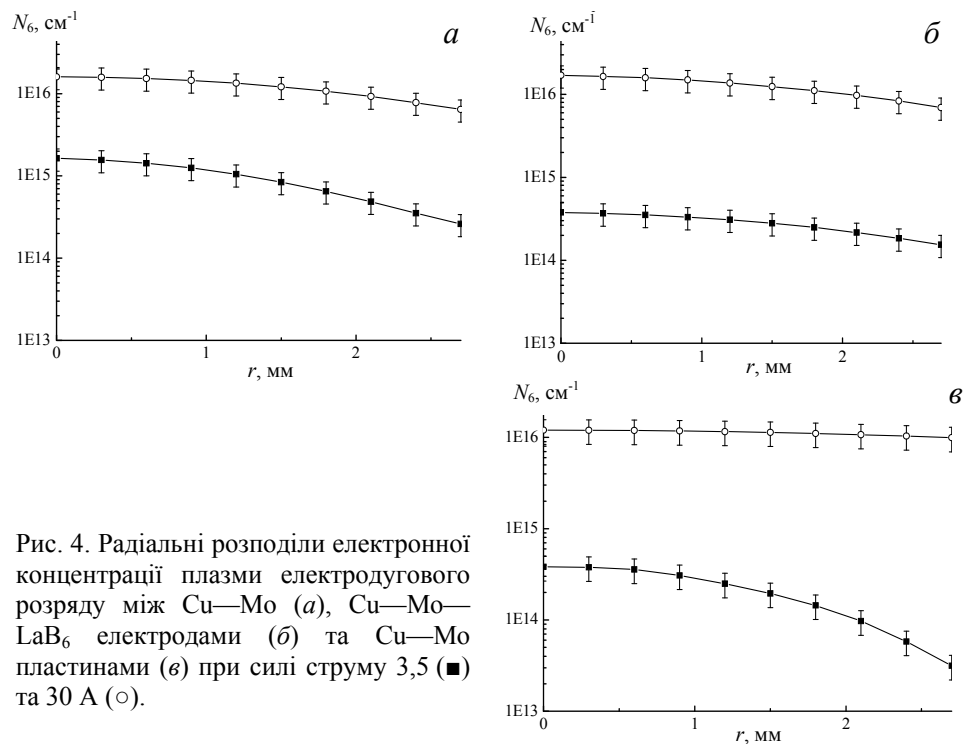


Рис. 4. Радіальні розподіли електронної концентрації плазми електродугового розряду між Cu—Mo (а), Cu—Mo—LaB₆ електродами (б) та Cu—Mo пластинами (в) при силі струму 3,5 (■) та 30 А (○).

Для такого випадку система рівнянь буде мати наступний вигляд: три рівняння Саха для атомів аргону, міді та молібдену:

$$S_i(T, N_e) = \frac{N_e N_{i^+}}{N_i}, \quad i \rightarrow \text{Ar, Cu, Mo}; \quad (1)$$

рівняння електронейтральності:

$$N_e = \sum N_{i^+}, \quad i \rightarrow \text{Ar, Cu, Mo}; \quad (2)$$

рівняння ідеального газу:

$$\frac{p}{kT} = 2N_e + \sum N_i, \quad i \rightarrow \text{Ar, Cu, Mo}; \quad (3)$$

Система (1)—(3) складається з п'яти рівнянь, що містять, окрім T та N_e , шість невідомих. Для того щоб знайти розв'язок цієї системи, тобто отримати концентрації частинок плазми, необхідно додати ще одну залежність. Для цього можна використати співвідношення між концентраціями атомів міді та молібдену, яке легко знайти із відношення інтенсивностей спектральних ліній MoI та CuI:

$$\alpha = \frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Mo}}} \sim \frac{I_{\text{CuI } 510,5}}{I_{\text{MoI } 550,6}} \cdot f(T), \quad (4)$$

де $f(T)$ — функція, яка може бути легко порашована для фіксованого значення T . Отримані у такий спосіб радіальні розподіли відношення концентрацій атомів міді та молібдену показано на рис. 5.

На основі експериментально вимірянних температури та концентрації електронів можна розрахувати компонентний склад плазми.

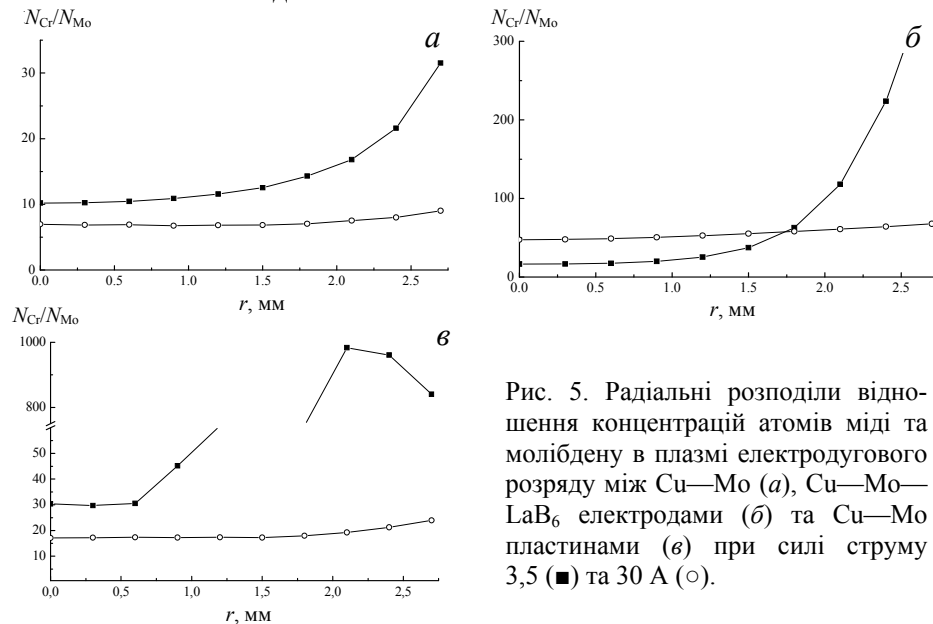


Рис. 5. Радіальні розподіли відношення концентрацій атомів міді та молібдену в плазмі електродугового розряду між Cu—Mo (а), Cu—Mo—LaB₆ електродами (б) та Cu—Mo пластинами (в) при силі струму 3,5 (■) та 30 А (○).

На рис. 6 показано радіальні розподіли концентрацій складових плазми електродугового розряду між композиційними Cu—Mo електродами. На рисунках видно, що основний внесок в електропровідність дугового каналу вносить іонізація міді. Це зумовлено різницею температур плавлення міді та молібдену, адже мідь у даних композитах відіграє роль легкоплавкого компонента, а молібден забезпечує їх ерозійну стійкість.

На рис. 7 наведено радіальні розподіли вмісту міді ($X_{\text{Cu}}, \% = (N_{\text{Cu}} + N_{\text{Cu}+}) \cdot 100 / \sum n_i$) і, відповідно, молібдену ($X_{\text{Mo}}, \% = (N_{\text{Mo}} + N_{\text{Mo}+}) \cdot 100 / \sum n_i$) в плазмі електродугового розряду між композиційними Cu—Mo електродами. Порівняння вмісту молібдену в плазмі дуги між різними типами електродів свідчить, що він є найбільшим для електродів, виготовлених за технологією твердофазного спікання (тип 1), як у випадку 3,5, так і 30 А. В той же час при збільшенні струму від 3,5 до 30 А температура плазми дуги між цими електродами зростає найменше, що свідчить про відносно великий вміст металів у розряді.

Висновки

Відпрацьована методика оптичної емісійної спектроскопії плазми між композиційними електродами Cu—Mo та Cu—Mo—LaB₆, виготовленими за технологією твердофазного спікання, при силі струму 3,5 та 30 А у потоці аргону. Вперше ця методика застосована для діагностики плазми електродугового розряду між композиційними електродами Cu—Mo, одержаними за технологією електронно-променевого випаровування і конденсації в вакуумі.

Показано, що лінії CuI 427,5 та 465,1 нм недоцільно використовувати для діагностики плазми між композиційними електродами на основі міді та молібдену через їх перекриття зі спектральними лініями молібдену.

Вміст молібдену у паровій фазі в плазмі електродугового розряду у потоці аргону між електродами Cu—Mo, виготовленими за технологією твердофазного спікання, приблизно в п'ять разів перевищує його вміст у порівнянні з іншими дослідженими типами електродів при силі струму як 3,5, так і 30 А.

При зростанні струму від 3,5 до 30 А відносно підвищення температури в плазмі електродугового розряду у потоці аргону між електродами Cu—Mo, отриманими за технологією твердофазного спікання, найменше у порівнянні з іншими дослідженими типами електродів. Цей ефект може бути пояснений більшим вмістом металів у паровій фазі в плазмі електродугового розряду між такими Cu—Mo електродами.

Встановлено, що внесок міді в провідність каналу є визначальним для всіх типів електродів у досліджуваному діапазоні струмів, а іонізація аргону стає помітною при зростанні до 30 А струму дуги між електродами Cu—Mo—LaB₆, одержаними твердофазним спіканням, та Cu—Mo, виготовленими випаровуванням і конденсацією в вакуумі.

Одержані результати вказують на доцільність подальших досліджень складу і структури робочого шару електродів у відповідності до параметрів плазми електродугового розряду між електродами із композиційних матеріалів, аналогічних проведеним у роботі [4].

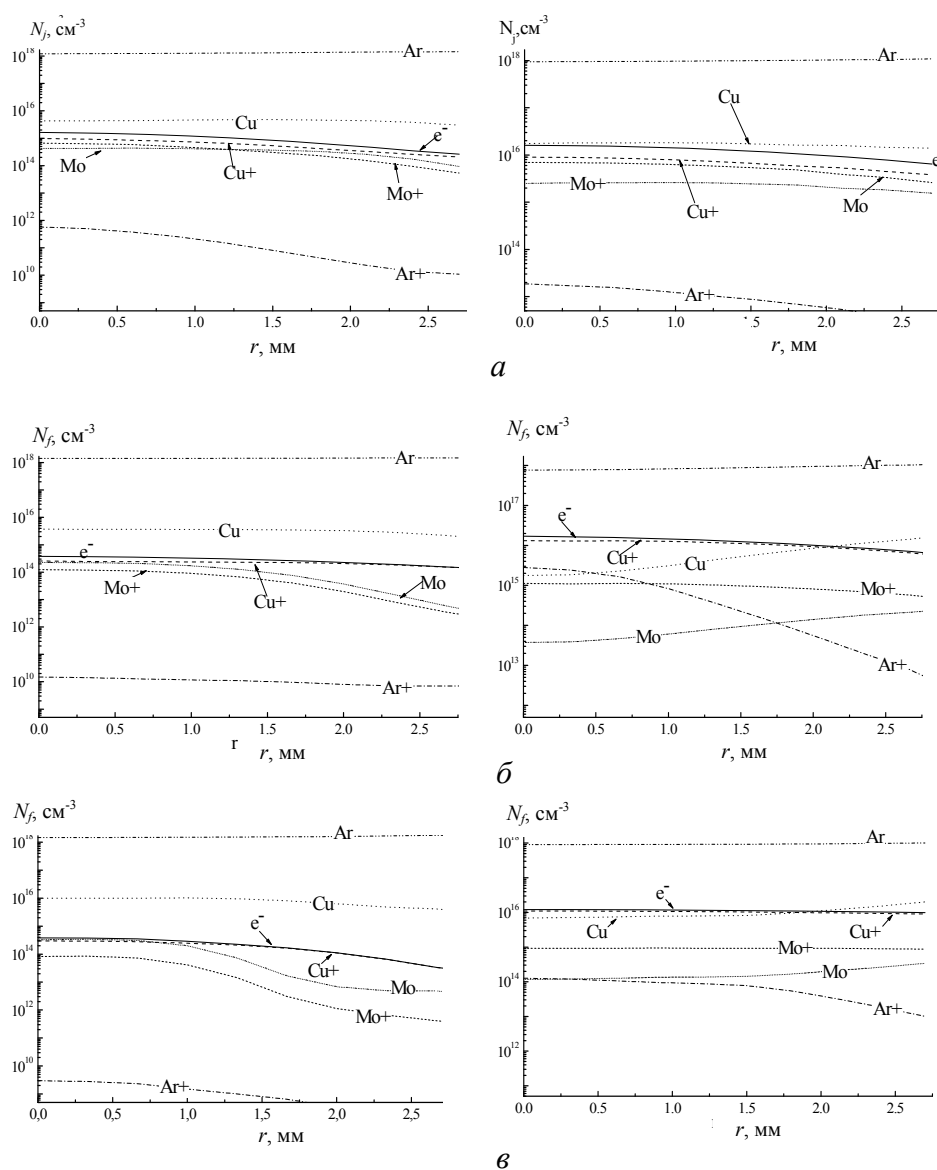


Рис. 6. Радіальні розподіли концентрацій складових плазми електродугового розряду між електродами Cu—Mo (тип 1) (а), Cu—Mo—LaB₆ (тип 2) (б) та пластинами Cu—Mo (тип 3) (в) при силі струму 3,5 (ліворуч) та 30 А(праворуч).

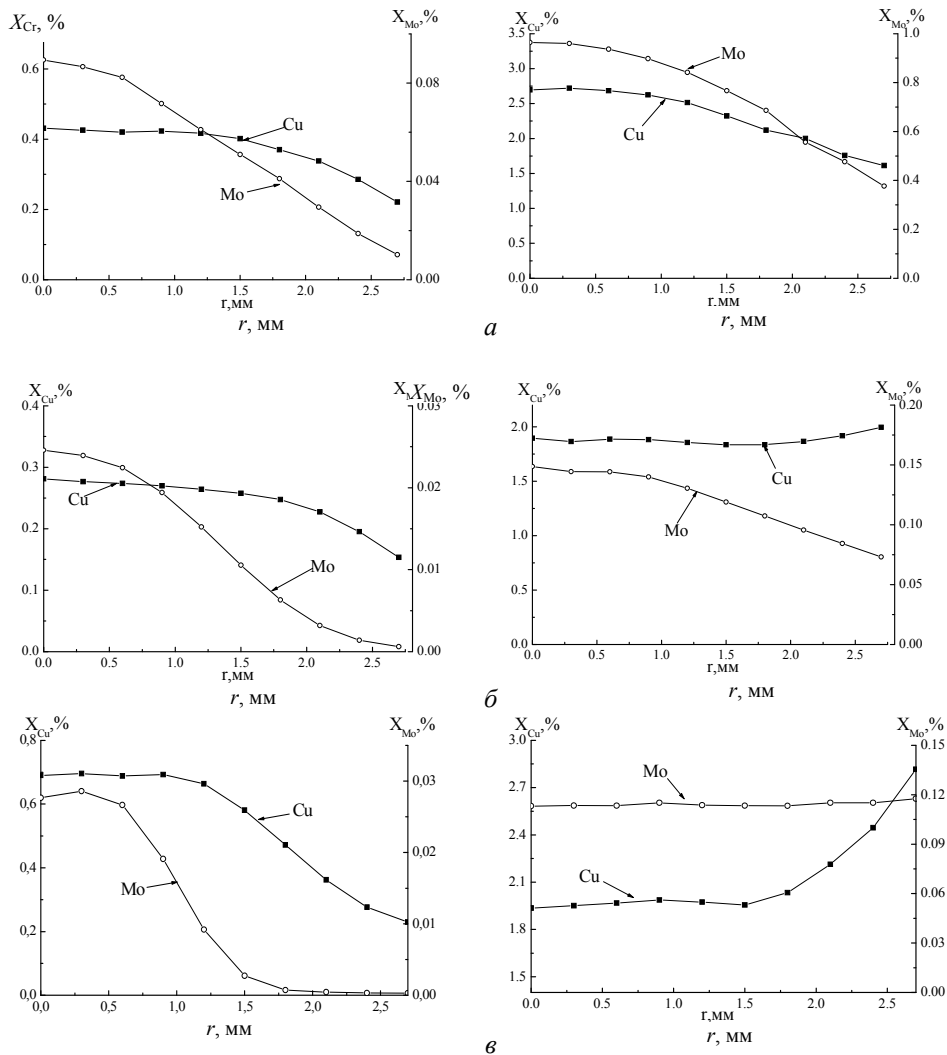


Рис. 7. Радіальні розподіли вмісту міді та молібдену в плазмі електродугового розряду між електродами Cu—Mo (тип 1) (а), Cu—Mo—LaB₆ (тип 2) (б) та пластинами Cu—Mo (тип 3) (в) при силі струму 3,5 (ліворуч) та 30 А (праворуч).

1. Cheminat B., Gadaud R. et Andanson P. Vaporisation d'une anode en argent dans le plasma d'un arc électrique // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1987. — **20**. — P. 444—452.
2. Maouhoub E. Influence of carbon dioxide on the radial temperature distribution in an argon arc // J. Plasma Physics. — 2000. — **63**, Part 2. — P. 97—114.
3. Гречанюк Н. И., Осокин В. А., Афанасьев И. Б., Гречанюк И. Н. Электронно-лучевая технология получения материалов для электрических контактов // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1998. — С. 51—66.
4. Бабич И. Л., Борецький В. Ф., Веклич А. Н. и др. Эрозия композиционных электродов на основе меди в условиях дугевого разряда // Там же, 2008. — С. 14—21.
5. Бабич І., Веклич А., Мінакова Р. Плазма електродугового розряду між композитними Cu—Mo електродами // Вісник Київського ун-ту імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. — 2007. — Вип. 10. — С. 9—12.
6. Веклич А. М., Осідач В. Є. Методика спектроскопічної діагностики плазми електричної дуги // Там же. — 2003. — Вип. 5. — С. 12—14.
7. Bockasten K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // J. of the Optical Society of America. — 1961. — **51**, No. 9. — P. 943—947.
8. Веклич А. М., Осідач В. Є. Визначення електронної концентрації в плазмі електродугового розряду // Вісник Київського ун-ту імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки. — 2004. — Вип. 2. — С. 428—435.
9. Бабич І. Л., Борецький В. Ф., Веклич А. М. та ін. Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. — С. 82—115.
10. Konjevich R., Konjevich N. Stark broadening and shift of neutral copper spectral lines // Fizika. — 1986. — **18**, No. 4. — P. 327—335.