

УДК 537.52:533.9.08

Веклич А.М., к.ф.-м.н., доц.,
Лебідь А.В., аспірант,
Тменова Т.А., студ.
Борецький В.Ф., к.ф.-м.н., асист.

Спектроскопічні дослідження плазми електродугового розряду з домішками міді та молібдену

В даній роботі досліджувались параметри плазми електродугового розряду між композитними Cu-Mo електродами в потоці аргону. Для розрахунку складу плазми у припущенні локальної термодинамічної рівноваги використано радіальні профілі температури та електронної концентрації отримані методами оптичної емісійної спектроскопії. Додатково розглянуто можливість використання спектральних ліній атома молібдену для діагностики плазми дугового розряду. В результаті обрано низку спектральних ліній MoI та рекомендовано значення сил осцилятора для цих ліній.

Ключові слова: плазма електродугового розряду, композитні Cu-Mo електроди, склад плазми, спектроскопічні константи, сила осцилятора.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Радіофізичний факультет, вул. Володимирська 64, Київ, Україна, e-mail: van@univ.kiev.ua

Статтю представив д.ф.-м.н. Анісімов І.О.

Вступ

Композитні матеріали на основі міді з додаванням тугоплавкого металу, зокрема молібдену, мають високу електроерозійну стійкість [1]. Такі матеріали використовуються для контактів комутуючої апаратури [1,2] та як ковзні контакти електротранспорту копалень [3]. Електричні розряди, що виникають під час експлуатації таких контактів взаємодіють із електродним матеріалом, який в результаті ерозії потрапляє в розрядний проміжок, що, в свою чергу, впливає на фізичні властивості плазми розряду. Таким чином, дослідження плазми електродугового розряду між мідь-молібденовими композитними електродами може бути корисним з точки зору оптимізації подібних контактних матеріалів.

Veklich A.N., Ph. D., Associate Professor,
Lebid A.V., post grad. stud.,
Tmenova T.A., stud.,
Boretskij V.F., Ph.D., Assistant Professor.

Spectroscopic investigations of electric arc plasma with additions of copper and molybdenum

This paper deals with investigations of plasma parameters of electric arc discharge between Cu-Mo composite electrodes in argon flow. The radial profiles of plasma temperature and electron density, obtained by optical emission spectroscopy, were used in calculation of plasma composition in assumption of local thermodynamic equilibrium. Additionally analysis of molybdenum atomic spectral lines for purposes of arc discharge plasma diagnostics was carried out. In result of selection several MoI spectral lines and their oscillator strength are recommended.

Key words: plasma of electric arc discharge, composite Cu-Mo electrodes, plasma composition, spectroscopic data, oscillator strength.

Taras Shevchenko Kiev National University, Radio Physics Faculty, 64, Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, e-mail: van@univ.kiev.ua

На жаль, авторам не відомі роботи, окрім [4,5], в яких би досліджувався зв'язок параметрів плазми електричної дуги із складом електродів. Тому метою даної роботи є визначення параметрів плазми електродугового розряду між композитними Cu-Mo електродами та дослідження їх електроерозійних властивостей.

Крім того, оскільки така плазма містить домішки молібдену, то додатково доцільно провести селекцію спектральних ліній MoI та їх спектроскопічних констант.

Експеримент

Дуга запалювалася між неохолоджуваними композитними Cu-Mo електродами в потоці аргону 6,33 л/хв. Сила струму становила 3,5 або

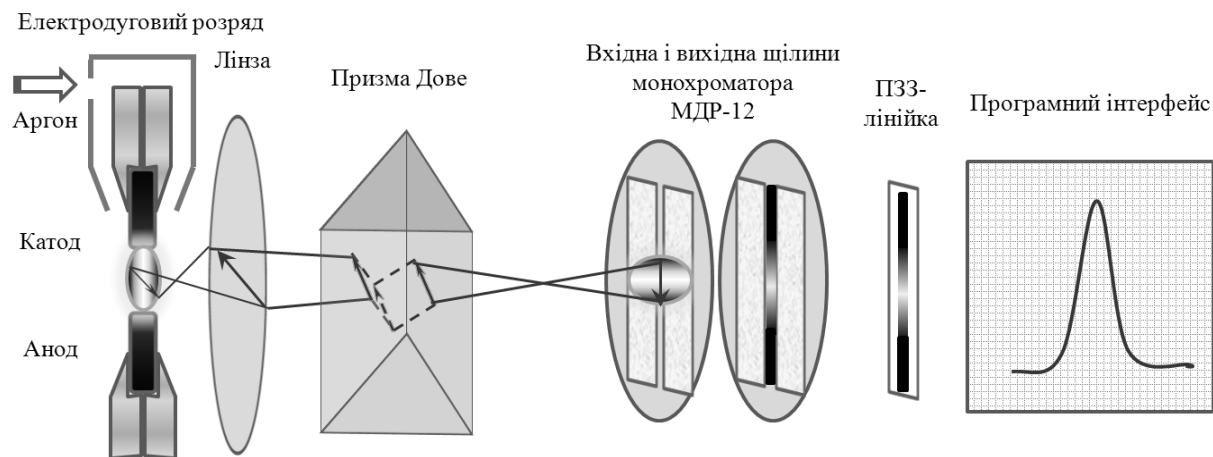


Рис.1 Реєстрація просторових розподілів інтенсивності випромінювання

30 А; в останньому випадку для запобігання каплеутворення електродного матеріалу використовували імпульсний режим: імпульс струму 30 А накладався на “черговий” розряд слабкого (3,5 А) струму. Тривалість імпульсу становила 30 мс. Міжелектродний проміжок складав 8 мм.

Використовували композитні Cu-Mo електроди, виготовлені за технологією електронно-променевого випаровування з наступною конденсацією у вакуумі [1]. 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 перпендикулярно до шарів матеріалу електрода.

Через просторову та часову нестабільність розряду використовували метод однократної томографічної реєстрації випромінювання спектральних ліній. Швидкісне сканування просторових розподілів інтенсивності випромінювання забезпечувала ПЗЗ-лінійка Sony ILX526A (B/W) з 3000 пікселів. Разом із

монохроматором МДР-12 в якості спектрального приладу (рис. 1) вона дозволяла реєструвати радіальні розподіли випромінювання у середньому перерізі каналу нестационарної дуги. Для керування процесом збору та обробки експериментальних даних використовували спеціально розроблений програмний інтерфейс [6].

Визначення просторового (радіального) розподілу випромінювання базується на припущенні осьової симетрії плазмового джерела, що дає можливість перерахувати спостережувані інтенсивності випромінювання у локальні [7].

Через часову та просторову нестабільність електричної дуги, реєстрували до 100 радіальних розподілів і виконували статистичну обробку експериментальних результатів.

Для реєстрації контурів спектральних ліній використовували установку, оптична схема якої детально описана в роботі [8]. Селекцію випромінювання плазми за певними кутами забезпечує інтерферометр Фабрі-Перо у режимі еталона, схрещений з приладом попередньої

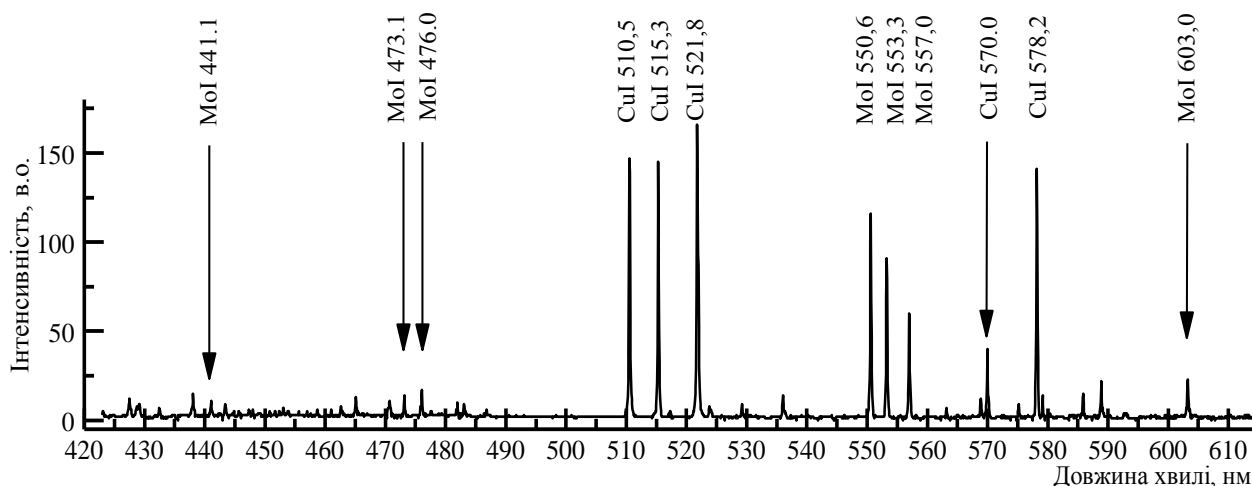


Рис.2 Спектр плазми електричної дуги між Cu-Mo електродами

монохроматизації. Таким чином, вимірюючи ширину певного інтерференційного максимуму, можна визначити ширину спектральної лінії у відповідній просторовій точці плазмового об'єкту.

Радіальний розподіл електронної концентрації визначено з півширини спектральної лінії CuI 515,3 нм за умови, що ефект Доплера незначно впливає на розширення досліджуваної лінії у порівнянні з квадратичним ефектом Штарка.

Реєстрацію та розшифрування спектру плазми електричної дуги виконано за допомогою дифракційного спектрометра з використанням програмного інтерфейсу [9].

Селекція спектральних ліній CuI та MoI

Спектроскопія багатокомпонентної плазми з домішками металів потребує ретельного визначення спектральних ліній, які придатні для діагностики. Селекція спектральних ліній атома міді та їх спектроскопічних констант виконана у роботі [10]. Таким чином, залучено CuI лінії: 510,5; 515,3; 521,8; 570,0; 578,2; 793,3 та 809,3 нм. У випадку композитного матеріалу мідь – молибден дослідження контурів спектральних ліній показали що, лінії CuI 427,5 та 465,1 нм перекриваються з лініями молибдену MoI 427,6 та 465,2 нм [11]. Саме тому, дані лінії міді вилучено з подальшого розгляду.

На основі аналізу спектра плазми (рис. 2) для діагностики обрано наступні лінії атома молибдену: 441,1; 473,1; 476,0; 550,6; 553,3; 557,0 і 603,0 нм. Дані лінії добре ізольовані в спектрі і достатньо інтенсивні для реєстрації.

Спектроскопічні константи для ліній атома молибдену наведені у джерелах [12-16], але ці дані суттєво відрізняються між собою. Як інструмент для вибору прийнятних спектроскопічних констант використано метод діаграм Больцмана.

Нахил лінії на діаграмі Больцмана відповідає температурі заселення енергетичних рівнів атомів у плазмі. У випадку, коли багатокомпонентна плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, ці нахили мають бути однакові для кожної з компонент плазми. Таким чином обрано значення сил осциляторів (дивись Табл. 1) з джерел [12-16], що забезпечують найкращий збіг нахилів прямих на діаграмі Больцмана. На рис. 3 а,б суцільні лінії проведено через точки, що відповідають спектральним лініям міді, а пунктирні лінії – через точки, які відповідають спектральним лініям атомів молибдену.

Таблиця 1
Рекомендовані спектральні лінії MoI, енергії збудження та відповідні добутки сил осциляторів на статистичні ваги

Довжина хвилі, нм	E_{up} , eV	$g_{if_{ij}}$	Посилання
441,17	4,89	1,512	[12]
473,14	5,24	1,551	[15]
476,02	5,25	2,031	[15]
550,65	3,59	1,149	[13]
553,3	3,58	0,854	[13]
557,04	3,56	0,460	[13]
603,0	3,59	0,359	[16]

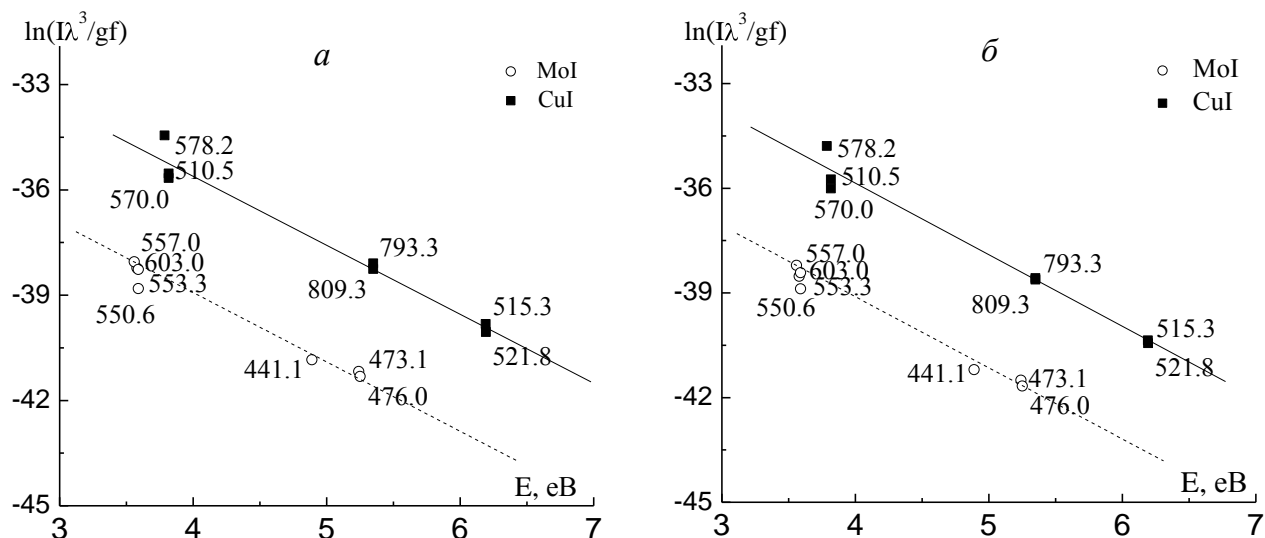


Рис.3 Діаграми Больцмана для радіусів $r=0$ мм (а) та $r=1.2$ мм (б) при силі струму 3,5 А

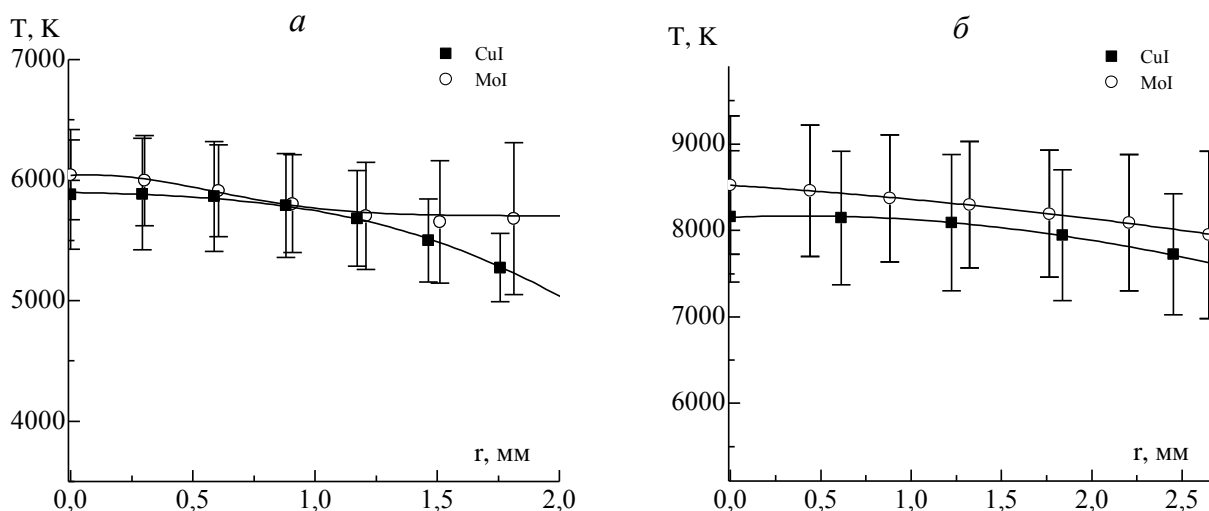


Рис.4 Радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між Cu-Мо електродами при силі струму 3,5 А

Рекомендовані лінії та спектроскопічні константи в аналогічний спосіб перевірені для випадку електричної дуги при силі струму 30 А.

Радіальні профілі температури плазми, визначені за спектральними лініями атомів міді та молібдену, показано на рис. 4 а,б.

Розрахунок складу плазми

Найвигідніший інтерферометр Фабрі-Перо (у режимі еталона) не дозволяє виконати вимірювання контурів ліній співвимірних із інструментальним контуром установки при силі струму 3,5 А. Тому, для визначення електронної концентрації пропонується скористатися алгоритмом [10], який спирається на раніше отримані параметри дугової плазми: а саме радіальні розподіли температури для 3,5 та 30 А, розподіл електронної концентрації для 30 А, та відношення інтенсивностей CuI та MoI ліній.

Якщо плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, її можна описати системою рівнянь, яка, в першу чергу, залежить від сорту частинок, що знаходяться в об'ємі плазми. У плазмі електродугового розряду між композитними Cu-Мо електродами в потоці аргону беруться до уваги атоми та іони аргону. Крім того, внаслідок термічної дії розряду на електроди в плазмі будуть присутні атоми та іони міді і молібдену. Для такого випадку система рівнянь буде мати наступний вигляд:

три рівняння Саха для атомів аргону, міді та молібдену:

$$S_i(T, N_e) = \frac{N_e N_{i^+}}{N_i}, \quad (1)$$

рівняння електронейтральності:

$$N_e = \sum N_{i^+}, \quad (2)$$

рівняння ідеального газу:

$$\frac{P}{kT} = 2N_e + \sum N_i \quad (3)$$

та співвідношення між концентраціями атомів міді та молібдену:

$$\frac{N_{Cu}}{N_{Mo}} = \frac{I_{Cu} \cdot \sum_{Cu} \cdot \lambda_{Cu}^2 \cdot (gf)_{Mo} \cdot e^{\frac{E_{Cu}}{kT}}}{I_{Mo} \cdot \sum_{Mo} \cdot \lambda_{Mo}^2 \cdot (gf)_{Cu} \cdot e^{\frac{E_{Mo}}{kT}}}, \quad (4)$$

де i - Ar, Cu, Mo, N_i та N_{i^+} - концентрації відповідних атомів та іонів.

Таким чином, радіальні профілі складу плазми розраховано шляхом розв'язання системи рівнянь з використанням розподілів температури та електронної концентрації в якості вхідних параметрів.

Обговорення результатів

Розраховані радіальні профілі складу плазми при струмах 3,5 та 30 А показано на рис. 5 а,б.

В обох випадках плазма головним чином складається з атомів аргону.

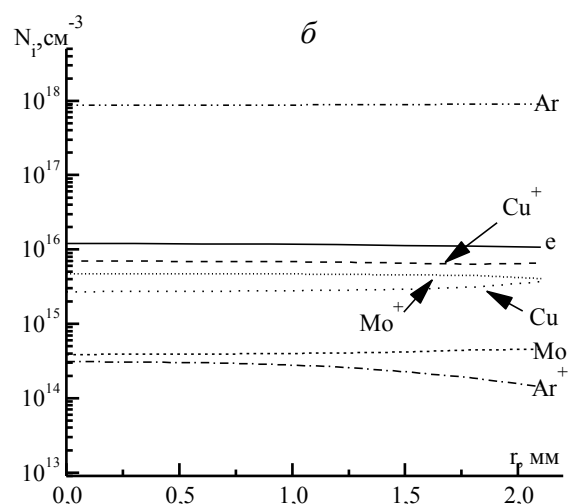
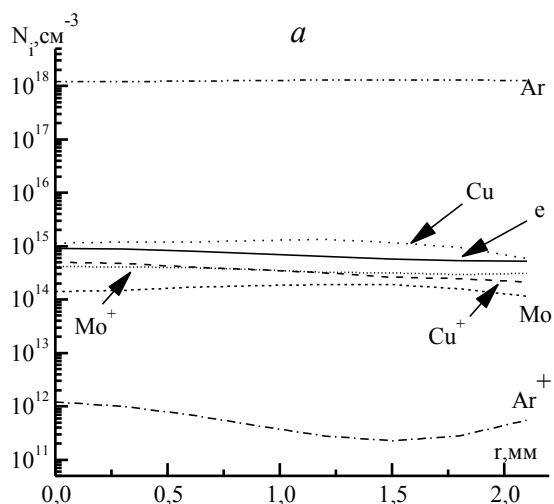


Рис.5 Радіальні розподіли концентрацій складових плазми електродугового розряду між Cu-Mo електродами при силі струму 3,5 (а) та 30 А(б)

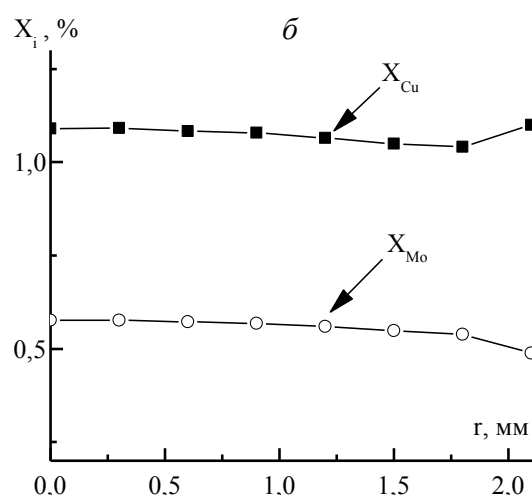
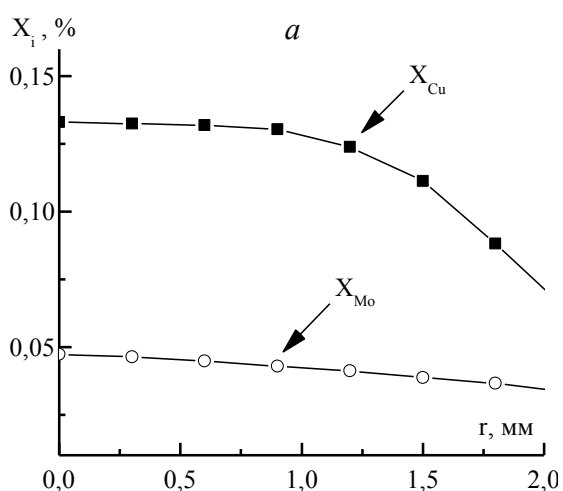


Рис.6 Радіальні розподіли вмісту міді та молібдену в плазмі електродугового розряду між Cu-Mo електродами при силі струму 3,5 (а) та 30 А(б)

Для аналізу поведінки металевої домішки в плазмі доцільно побудувати радіальні розподіли вмісту міді:

$$X_{Cu} = \left(\frac{N_{Cu} + N_{Cu^+}}{\sum N_i} \right) \cdot 100\% ,$$

та молібдену

$$X_{Mo} = \left(\frac{N_{Mo} + N_{Mo^+}}{\sum N_i} \right) \cdot 100\% ,$$

де $\sum N_i$ - сума концентрацій всіх компонентів плазми за винятком електронів. Вміст металів у плазмі зростає на порядок при збільшенні струму до 30 А (рис. 6).

Вміст молібдену в плазмі приблизно вдвічі менший за вміст міді для струмів 3,5 та 30 А. Але, внесок іонізації молібдену у провідність плазмового каналу порівняний із внеском міді. Дана ситуація пояснюється нижчою у порівнянні з міддю енергією іонізації молібдену.

У той же час іонізація аргону не відіграє помітної ролі.

Висновки

Методами оптичної емісійної спектроскопії плазми у припущенні локальної термодинамічної рівноваги досліджено фізичні властивості плазми електродугового розряду між композитними Cu-Mo електродами у потоці аргону при силі струму 3.5 та 30 А.

З аналізу радіальних розподілів складу плазми випливає, що іонізація молібдену, попри

нижчий його вміст, вносить значний внесок у провідність розрядного каналу.

Рекомендовано спектральні лінії атома молібдену та їх спектроскопічні константи, які придатні для діагностики плазми електро-дугового розряду.

Список використаних джерел

1. *Grechanyuk N.I.* Vapor-phase condensate in the system of Cu-W (Mo, Cr). Structure and properties. / N.I. Grechanyuk, R.V. Minakova, E.V. Homenko // Electron microscopy and material strength. – 2009. - №16. - P. 16-31 (in Russian).
2. *Minakova R.V.* The development tendencies of manufacturing technologies of composite materials and their contacts / R.V. Minakova, A.P. Kresanova, M.M. Churakov, E.V. Homenko // Electrical contacts and electrodes. – 1998. – P. 5-19 (in Russian).
3. *Miedzinski B.* Dynamics of sliding contacts in mine slow-speed railway transportation / B. Miedzinski, W. Dzierzanowski, J. Wandzio, N. Grechanyuk, V.N. Shoffa // Electrical contacts and electrodes. – 2012. - P. 63-69.
4. *Babich I.L.* Erosion of composite electrodes on copper base under the electric arc discharge action / I.L. Babich, A.N. Veklich, V.F. Boretskij et al. // Electrical contacts and electrodes. - 2008. - P. 14-21. (in Russian).
5. *Babich I.L.* Plasma of electric arc discharge between Cu-Mo electrodes / I.L. Babich, A.N. Veklich, R.V. Minakova // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radio Physics & Electronics. - 2007. - №10. - P. 9-12.
6. *Veklich A.N.* Technique of spectroscopic diagnostic of electric arc plasma / A.N. Veklich, V. Ye. Osidach // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radiophysics & Electronics. 2003. – №5. – P. 12-14 (in Ukrainian).
7. *Bockasten K.* Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma / K. Bockasten // Journ. of Opt. Soc. of Am. – 1961. – Vol. 51, № 9 – P. 943-947.
8. *Veklich A.* The determination of electron density in electric arc discharge plasma / A.N. Veklich, V. Ye. Osidach // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Physics & Mathematics. 2004. - №2. - P. 428-435 (in Ukrainian).
9. *Veklich A.* Technique of electric arc discharge plasma diagnostic: peculiarities of registration and treatment of spectra / Veklich A., Lebid A. // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radio Physics & Electronics. - 2012. - №18. - P. 6-9.
10. *Babich I.L.* Spectroscopy of electric arc plasma between composite electrodes Ag-CuO / I.L. Babich, V.F. Boretskij, A.N. Veklich, et al. // Electrical contacts and electrodes. - 2010. - P. 82-115. (in Ukrainian).
11. *Babich I.L.* Dynamics of sliding contacts in mine slow-speed railway transportation / I.L. Babich, V.F. Boretskij, A.N. Veklich, N.I. Grechanyuk, A.V. Lebid, R.V. Minakova, P.V. Soroka // Electrical contacts and electrodes. – 2012. - P. 91-100.
12. *Palmeri P.* Fine structure and transition probabilities in neutral molybdenum / P. Palmeri, J.F. Wyart // Physica Scripta. – 1998. – Vol.58. – P. 445-456.
13. *Whaling W.* Comprehensive transition probabilities in Mo I / W. Whaling, J.W. Brault // Physica Scripta. – 1988. – Vol.38. – P. 707-718.
14. *Schnehage S.E.* Oscillator strengths of neutral and singly ionized molybdenum / S.E. Schnehage, K. Danzmann, R. Kunemeyer, M. Kock // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1983. – Vol.29. – P. 507-516.
15. *Whaling W.* Lifetimes, branching ratios, and transition probabilities in molybdenum I / W. Whaling, P. Chevako, J.E. Lawler // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1986. – Vol.36. – P. 491-496.
16. *Whaling W.* Lifetimes, branching ratios, and transition probabilities in Mo I / W. Whaling, P. Hannaford, R.M. Lowe, E. Biemont, N. Grevesse // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1984. – Vol.32. – P. 69-80.

Надійшла до редколегії 18.02.13