

## Електродуговий розряд між латунними електродами: особливості спектроскопії плазми та мікроструктурних змін робочого шару електродів

І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич, Л. О. Крячко\*,  
А. В. Лебідь, Р. В. Семенишин, С. О. Фесенко, М. Є. Головкова\*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна,  
e-mail: [van@univ.kiev.ua](mailto:van@univ.kiev.ua)

\*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
Київ, e-mail: [29min@ipms.kiev.ua](mailto:29min@ipms.kiev.ua)

*Методами лазерної абсорбційної та оптичної емісійної спектроскопії проведено діагностику плазми вільно існуючого дугового розряду між електродами з латуні при силі струму  $I = 3,5$  і  $30$  А. Збіг результатів, одержаних цими методами, підтвердив наявність локальної термодинамічної рівноваги в зазначених умовах. Проведено селекцію спектроскопічних констант спектральних ліній Zn I і видано рекомендації щодо можливості їх використання для визначення температури плазми з домішками цинку і електронної концентрації в такій плазмі. Металографічними методами досліджено особливості поведінки цинку в електродах з латуні під дією дуги. Виявлено закономірності надходження цинку на робочу поверхню електродів і його роль у функціонуванні розряду.*

**Ключові слова:** низькотемпературна плазма, оптична спектроскопія, пари цинку, мікроструктура робочого шару.

### Вступ

В низьковольтних комутаційних апаратах широкого застосування набули контакт-деталі з композиції Ag—CdO, але через їх токсичність в провідних країнах замість них було впроваджено контакти з композиції Ag—SnO<sub>2</sub> [1, 2]. Проте вони не змогли повноцінно замінити перевірені часом і ґрунтовно досліджені контакти з Ag—CdO, тому роботи по вдосконаленню запропонованої композиції і пошуку нових перспективних матеріалів і досі не припиняються. Зокрема, поряд з іншими оксидами значну увагу було приділено оксиду цинку, зважаючи на схожість деяких властивостей ZnO і CdO. Ці оксиди мають порівняно низький електричний опір [3], у той час як самі метали Zn і Cd характеризуються досить високим тиском насиченої пари [4]. Як впливає з аналізу численних публікацій і патентної літератури [5—16], оптимальні умови використання цього оксиду в складі контактів на основі срібла, як в самостійному вигляді, так і в комплексі з оксидами інших металів (SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO тощо), вивчались упродовж десятиліть.

Унікальність оксиду кадмію визначається такими властивостями, як низька температура його дисоціації ( $815 \pm 15$  °C [3]) при високому тиску утворених парів Cd, завдяки чому, згідно з припущенням автора роботи [17], тепла енергія дуги вимушено витрачається на їх іонізацію, що

© І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич, Л. О. Крячко, А. В. Лебідь,  
Р. В. Семенишин, С. О. Фесенко, М. Є. Головкова, 2014

зменшує її руйнівну дію на основу матеріалу — срібло. В той же час ZnO сублімує при  $t = 1800$  °C без розкладання, внаслідок чого його ефективність у порівнянні з CdO виявляється дещо нижчою. Проте в роботі [18] експериментальними дослідженнями та розрахунками показано, що введення в матрицю з міді або срібла ультрадисперсного порошку ZnO із середнім розміром частинок  $d \approx 0,008$  мкм забезпечує композиту властивості, порівняні з тими, що притаманні матеріалам з CdO.

В роботі [19] встановлено, що композитні матеріали на основі Ag—SnO<sub>2</sub> та Ag—ZnO мають досить високу ерозійну стійкість. При цьому мікроструктурні дослідження поверхні електродів показали, що домішка оксиду цинку суттєво впливає на розподіл оксидів поблизу робочого шару. Спектроскопічні дослідження плазми електродугового розряду в повітрі між композитними електродами Ag—SnO<sub>2</sub>—ZnO у припущенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) підтвердили відчутний вплив домішки оксиду цинку на параметри плазми [20]. Ці дослідження дозволили також виконати попередню селекцію спектральних ліній Zn I та їх спектроскопічних констант. Але через нерегулярну емісію металу з поверхні композитних електродів Ag—SnO<sub>2</sub>—ZnO похибка визначення спектроскопічних констант обраних спектральних ліній атому цинку виявилась досить значною.

Мета даної роботи — уточнити спектроскопічні константи вибраних спектральних ліній Zn I, використовуючи електроди з латуні як джерело термічної плазми з домішками парів цинку; підтвердити існування ЛТР в такій плазмі; встановити взаємозв'язок параметрів плазми і мікроструктурних змін робочого шару досліджуваних електродів.

### **Експеримент** **Вимірювання радіальних профілів випромінювання** **спектральних ліній**

Електричну дугу ініціювали в повітрі між плоскими електродами, що не охолоджувались. Діаметр електродів був 6 мм, відстань між електродами становила 8 мм, сила струму електричної дуги — 3,5 та 30 А. В якості електродів використовували прутки з латуні Л60. Для запобігання краплеутворення електродного матеріалу застосовували імпульсний режим: імпульс струму 30 А накладався на “черговий” розряд слабого струму (3,5 А). Тривалість імпульсу складала 30 мс. Припускали, що дуговий розряд має осьову симетрію. Досліджували квазістаціонарний режим.

На рис. 1, *a* показано схему експериментальної установки для реєстрації випромінювання спектральних ліній. Випромінювання плазми дуги фокусували на вхідній щілині монохроматора МДР-12. Оскільки дуговий розряд не є стабільним в просторі та часі, запропонована оптична схема дозволяє вимірювати одночасно лише один радіальний профіль інтенсивності окремої спектральної лінії [21]. Швидку реєстрацію радіальних профілів інтенсивностей випромінювання центрального перерізу стовпа плазми виконували ПЗЗ лінійкою Sony ILX526A (B/W), яка містить 3000 пікселів. Сенсор розташовувався на вихідній щілині монохроматора (рис. 1, *a*). Беручи до уваги нестабільність розряду, виконували усереднення збережених просторових розподілів випромінювання.

Для знаходження локальних значень випромінювання спектральних ліній застосовували перетворення Абеля [22]. Враховували також нерівно-

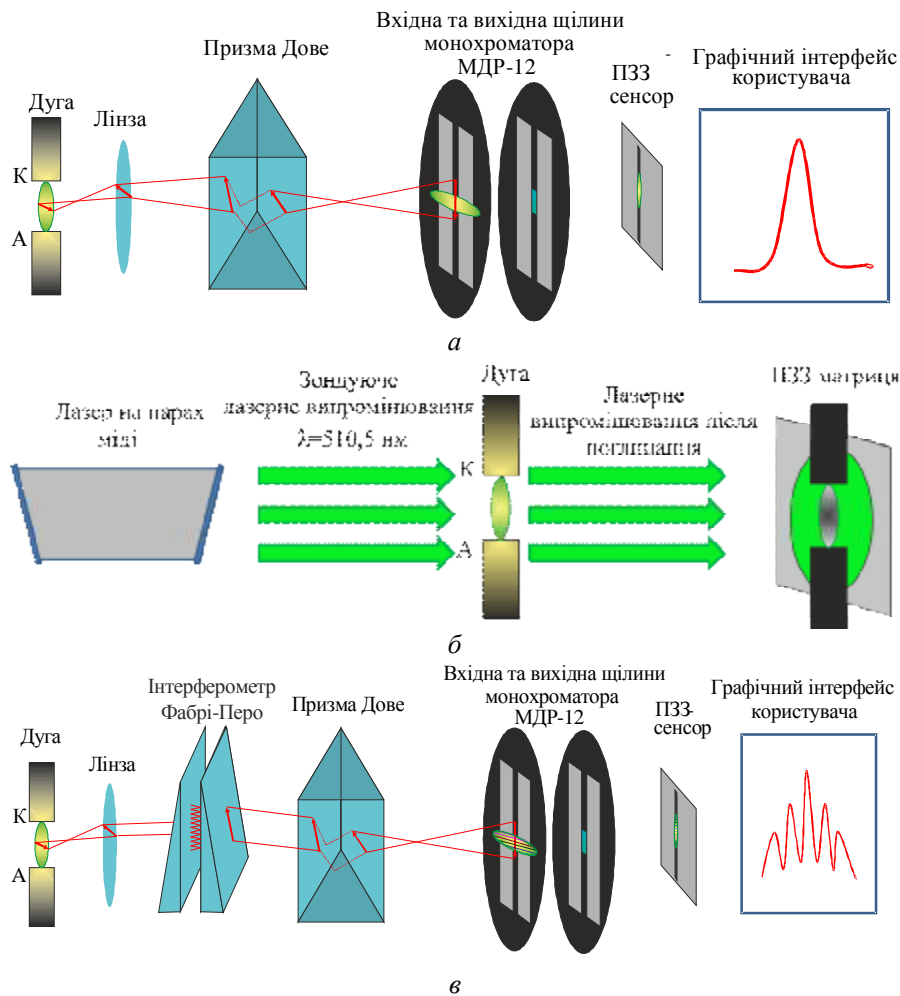


Рис. 1. Експериментальні установки для реєстрації випромінювання спектральних ліній (а), для лінійної лазерної абсорбційної спектроскопії плазми (б) та для вимірювання півширини спектральних ліній (в).

мірність спектральної чутливості експериментальної установки. Визначення радіальних профілів температури плазми в припущенні локальної термодинамічної рівноваги здійснювали методом діаграм Больцмана з використанням вимірних профілів випромінювання спектральних ліній атомів цинку та міді.

### Вимірювання концентрації атомів міді в плазмі

Визначення концентрації атомів міді в плазмі здійснювали методом лазерної абсорбційної спектроскопії (ЛАС). Як видно на рис. 1, б, як джерело випромінювання на довжині хвилі 510,5 нм застосовували лазер на парах міді "Кріостат 1". Це випромінювання може бути поглинуте енергетичним рівнем  $^2D_{5/2}$  атомів міді в плазмі. Поперечний переріз лазерного променя перевищував розміри плазми дуги. Таким чином, за допомогою ПЗЗ матриці можна було реєструвати розподіл поглинання плазми у різних просторових точках (рис. 1, б).

Розподіли яскравості зондуючого  $I_0$  та поглинутого  $I_1$  випромінювання лазера застосовано для розрахунку оптичної густини плазми  $\tau = \ln(I_0/I_1)$ . Для визначення просторового розподілу коефіцієнта поглинання використовували перетворення Абеля [22]. Вважали, що півширина спектральної лінії лазера є вужчою у порівнянні з шириною лінії поглинання плазми. Отже, коефіцієнт поглинання  $\kappa_0$  можна розглядати як поглинання в центрі досліджуваної спектральної лінії.

Встановлено, що для плазми дуги при силі струму 3,5 А домінуючим механізмом уширення спектральної лінії 510,5 нм є ефект Доплера. Для розрахунку доплерівської півширини  $\Delta\lambda_D$  було використано попередньо виміряне значення температури плазми

$$\Delta\lambda_D = 7,16 \cdot 10^{-7} \lambda \sqrt{T/\mu},$$

де  $\mu$  — атомна маса. Тому, знаючи коефіцієнт поглинання та уширення спектральної лінії, можна знайти заселеність  $N_k$  енергетичного рівня  $^2D_{5/2}$  атома міді [23]. Слід зауважити, що величина заселеності енергетичного рівня є незалежною від припущення наявності ЛТР. Розподіл атомів міді  $N_{Cu}$  може бути легко отриманий з  $N_k$  з використанням розподілу Больцмана.

### **Вимірювання радіальних розподілів концентрації електронів**

В комбінації із інтерферометром Фабрі—Перо експериментальна установка дає можливість реєстрації контурів спектральних ліній в різних просторових точках об'єму плазми (рис. 1, в). Випромінювання спектральної лінії плазми реєстрували у вигляді інтерферограм, кожен максимум якої відповідає контуру лінії в певній просторовій точці. Визначення півширини ліній з отриманих інтерферограм є складною задачею у випадку неоднорідної плазми, тому було запропоновано метод, що базується на моделюванні інтерферограми [24]. Радіальні розподіли півширин спектральних ліній, які випромінюються електродуговою плазмою, отримано з порівняння експериментальних та змодельованих інтерферограм.

Знаходження електронної концентрації в плазмі здійснено з використанням інтерферограм спектральних ліній, домінуючим ефектом уширення яких був квадратичний ефект Штарка. При силі струму плазми 3,5 А півширина спектральної лінії є співвимірною з інструментальним контуром інтерферометра Фабрі—Перо, що унеможливило визначення електронної концентрації плазми зазначеним методом. В цьому випадку використано метод, запропонований в роботі [23].

### **Результати та їх обговорення**

#### **Температура плазми дугового розряду між латунними електродами**

Як уже зазначено, в цій роботі досліджували вільно існуючий дуговий розряд між латунними електродами при силі струму 3,5 та 30 А. Профілі температури плазми, отримані методом діаграм Больцмана з використанням спектральних ліній Cu I 510,5, 515,3, 521,8, 570,0, 578,2 та 793,3 нм, наведено на рис. 2. Спектроскопічні константи для ліній Cu I попередньо відібрано в роботі [23]. У випадку сили струму 30 А спектральна лінія Cu I 521,8 нм не долучена до обрахунку температури через можливе самопоглинання або перекривання зі спектральною лінією Cu I 522,0 нм.

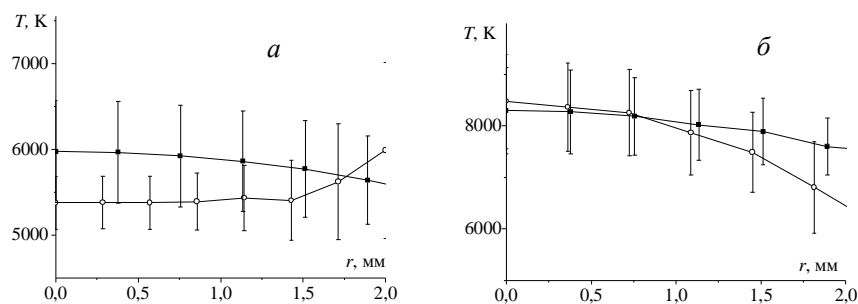


Рис. 2. Радіальні профілі температури плазми дугового розряду між латунними електродами, розраховані за лініями Cu I (■) та Zn I (○) при  $I = 3,5$  (а) та 30 А (б).

### Т а б л и ц я 1. Спектральні лінії Zn I та їх спектроскопічні константи

$\lambda$ , нм	$\log(gf_{ji})$	$E_i$ , eV	Посилання
462,9	-0,930	8,473	[25]
462,0	-0,860	6,654	[26]
472,2	-0,454	6,654	[27]
481,0	-0,292	6,654	[27]
636,2	-0,158	7,743	[28]

Окрім спектральних ліній Cu I, для визначення температури плазми використано спектральні лінії Zn I (табл. 1).

На рис. 2 видно, що температури, отримані із залученням спектральних ліній обох атомів (міді та цинку), в межах похибки збігаються в обох випадках: при  $I = 3,5$  та 30 А. Таким чином, відібрані спектральні лінії Zn I та їх спектроскопічні константи (табл. 1) можуть бути рекомендовані для застосування в оптичній емісійній спектроскопії термічної плазми з домішками парів цинку. Розбіжність між профілями температур, отриманими з випромінювання Zn I та Cu I на периферії розряду, може бути спричинена відхиленням стану плазми від ЛТР, а саме розбіжністю між електронною температурою та температурою важких частинок.

Зі збігу профілів температур, отриманих з використанням спектральних ліній двох елементів, можна зробити висновок, що в такій плазмі має місце ЛТР. Зазначимо, що ці результати було отримано в припущенні наявності ЛТР в плазмі, зокрема, вважали, що має місце виконання розподілу Больцмана для заселеності рівнів атомів міді та цинку. Для перевірки цієї гіпотези необхідно використати іншу методику, незалежну від такого припущення. Більше того, це дало б можливість додатково перевірити доцільність застосування залучених спектральних ліній Zn I та їх спектроскопічних констант.

### Склад плазми електродугового розряду між латунними електродами

Для визначення концентрації атомів міді в плазмі як альтернативний використовували метод лазерної абсорбційної спектроскопії, що відповідає умові незалежності від припущення про наявність ЛТР в плазмі розряду. На рис. 3 наведено радіальний розподіл заселеності  $N_k$  енергетичного рівня  $^2D_{5/2}$  атома міді, отриманий з поглинання плазмою лазерного

випромінювання, а також радіальний профіль концентрації атомів міді  $N_{Cu}$ , який був розрахований із розподілу  $N_k$  та попередньо отриманого профілю температури.

Профілі концентрації атомів міді та температури використано як початкові параметри для розрахунку складу плазми в припущенні ЛТР (рис. 4). Для цього потрібно розв'язати наступну систему рівнянь: рівняння Саха — для атомів цинку, міді, азоту та кисню; два рівняння дисоціації — для молекул азоту та кисню; рівняння електронейтральності; рівняння ідеального газу; відношення вмісту кисню та азоту в повітрі. Додатково в розрахунку складу плазми використано відношення між концентраціями атомів міді та цинку, яке отримане із співвідношення інтенсивностей спектральних ліній Cu I 570,0 нм та Zn I 626,3 нм.

На рис. 5 показано радіальні розподіли електронної концентрації в плазмі електродугового розряду при силі струму 3,5 та 30 А. Електронну концентрацію при  $I = 30$  А отримано з ширин спектральних ліній Cu I 515,3 нм, Zn I 472,2 та 481,0 нм. Константи розширення цих спектральних ліній подано в табл. 2. Як впливає з таблиці, електронні концентрації, одержані з ширини різних ліній, майже збігаються. Електронна концентрація при  $I = 3,5$  А розрахована з абсолютної інтенсивності спектральної лінії Cu I 515,3 нм та відношення випромінювання спектральних ліній Cu I 570,0 нм і Zn I 626,3 нм [23].

Одержані методом оптичної емісійної спектроскопії (ОЕС) радіальні профілі електронної концентрації та температури плазми при силі струму 3,5 та 30 А використано як початкові параметри для розрахунку складу плазми в припущенні ЛТР (рис. 8). Застосували методику розрахунку, яка аналогічна описаній раніше. Залучення отриманих результатів

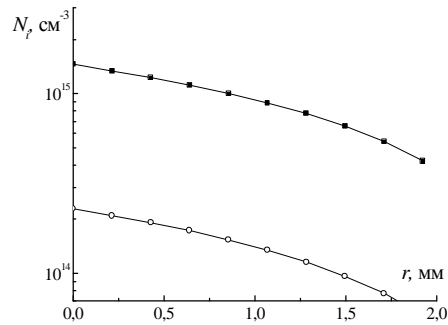


Рис. 3. Заселеність енергетичного рівня  $^2D_{5/2}$  атома міді  $N_k$  (○), отримана методом ЛАС, та розподіл концентрації атомів міді  $N_{Cu}$  (■) в плазмі при силі струму  $I = 3,5$  А.

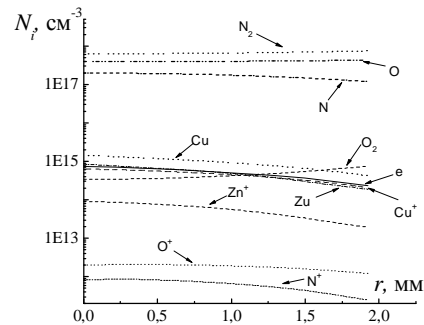


Рис. 4. Склад плазми  $N_i$  електродугового розряду між латунними електродами при силі струму 3,5 А, розрахований з експериментально отриманих  $T$  та  $N_{Cu}$ .

## Т а б л и ц я 2. Константи розширення Штарка для спектральних ліній Zn I та Cu I

Елемент	$\lambda$ , нм	$w$ , нм	$T$ , К	$N_e$ , $\text{cm}^{-3}$	Посилання
Zn I	472,2	0,534	5000	$10^{17}$	[29]
Zn I	481,0	0,654	5000	$10^{17}$	[29]
Cu I	515,3	0,346	10000	$10^{17}$	[30]

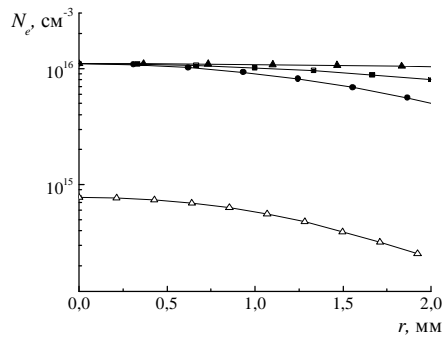


Рис. 5. Радіальні розподіли концентрації електронів в плазмі дугового розряду силою струму  $I = 3,5$  ( $\Delta$ ) та  $30$  А ( $\blacksquare$  — Zn I 472,2 нм,  $\bullet$  — Zn I 481,0 нм,  $\blacktriangle$  — Cu I 515,3 нм).

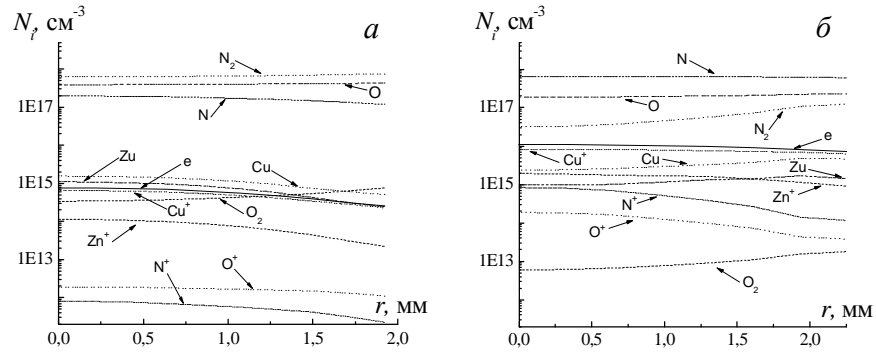


Рис. 6. Радіальні профілі рівноважного складу плазми електродугового розряду між латунними електродами при силі струму  $3,5$  (*a*) та  $30$  А (*б*), розраховані з експериментально отриманих  $T$  і  $N_e$ .

розрахунку складу дозволило визначити радіальні профілі вмісту Zn та Cu в плазмі (рис. 7) у такий спосіб:

$$X, \% = (N_{\text{елем}} + N_{\text{елем}+}) \cdot 100 / \sum_j N_j.$$

Додатково для розряду силою струму  $3,5$  А розраховано вміст Cu та Zn (рис. 7, *a*) із одержаного методом ЛАС складу плазми (рис. 4). Вміст кожного металу, отриманий різними методами, практично збігається.

Як видно на рис. 4 та 6, *a*, результати розрахунку рівноважного складу плазми (розряду при силі струму  $3,5$  А) двома незалежними методами є

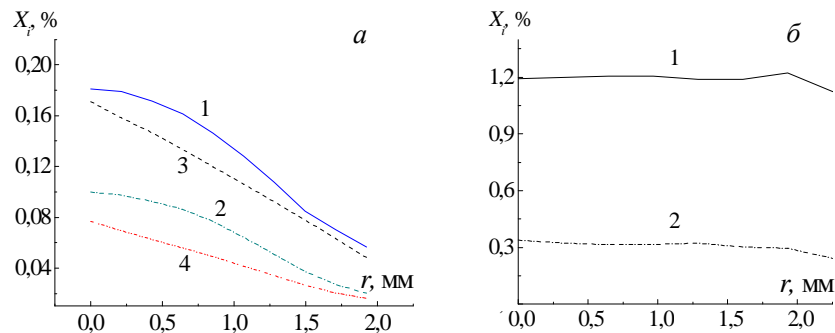


Рис. 7. Радіальні профілі вмісту міді (1, 3) та цинку (2, 4) в плазмі електродугового розряду між латунними електродами, отримані методами ОЕС (1, 2) та ЛАС (3, 4) при  $I = 3,5$  (*a*) та  $30$  А (*б*).

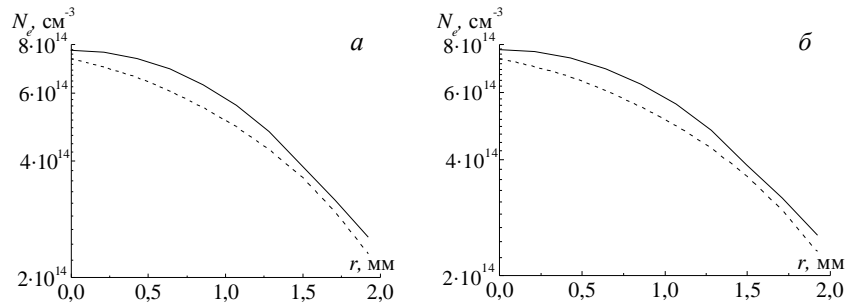


Рис. 8. Розподіли заселеності енергетичного рівня  ${}^2D_{5/2}$  атома міді (а) та концентрації електронів (б), розраховані з використанням експериментально отриманих  $T$  та  $N_e$  методами ОЕС (—) та ЛАС (---) при  $I = 3,5$  А.

досить подібними. Більш того, радіальні профілі заселеності  $N_k$  енергетичного рівня  ${}^2D_{5/2}$  атома міді та електронної концентрації збігаються в межах похибки (рис. 8). Зі збігу результатів ОЕС та ЛАС витікає, що при силі струму 3,5 А плазма електродугового розряду в повітрі між латунними електродами перебуває в стані ЛТР. Підвищення сили струму до 30 А природно приводить до збільшення електронної концентрації і підвищення температури плазми. Можна зробити припущення, що в цьому випадку плазма також перебуває в стані ЛТР.

#### Металографічні дослідження електродів

Латунь марки Л60 — сплав міді з цинком, що належить до області  $\alpha + \beta$ -латуней. Згідно з діаграмою стану [31], при кімнатній температурі в структурі цього сплаву мають переважати кристали  $\alpha$ -твердого розчину. Розмір і форма  $\alpha$ -кристалів залежать від швидкості охолодження розплаву.

Як видно на рис. 9, дуговий розряд викликає на поверхні катода більш суттєві зміни, що проявляється у формуванні на ньому бугристого рельєфу. При цьому бугри великого розміру, як правило, розташовані на периферії, де початкові цикли розряду викликали випаровування крайової зони матеріалу катода на значну глибину (рис. 9, б), що є типовим для електродів вибраної форми [32, 33]. Поверхні як бугрів, так і пласких ділянок робочого шару обох електродів, окрім, відповідно, катодних і анодних плям, густо вкриті порами, які іноді нагадують каверни (рис. 10). Така сама реакція матеріалу на теплову дію розряду спостерігалась і при випробуваннях електродів з композиції Ag—SnO<sub>2</sub>—ZnO [20], в той час як електроди з інших матеріалів (на основі міді і срібла) в аналогічних умовах цієї особливості не виявляли.

Мікроструктура шліфів вертикального перерізу електродів, виконаного по декількох площинах, свідчить про утворення в робочому шарі електродів різних за розміром округлих порожнин, схожих на усадкові раковини (рис. 11, 12). Зазвичай вони розташовуються під ділянками ураження поверхні електрода електричним розрядом (рис. 11, д, е; рис. 12, а, б) і не спостерігаються під невраженою ерозією поверхнею. Оскільки на аноді основна дія дугового розряду була зосереджена на ділянках поверхні, прилеглих до периферії, утворення округлих порожнин також мало місце переважно по краях приповерхневого шару (рис. 11, а, в, д), в той час як на катоді вони займають всю робочу зону (рис. 12, а, б).



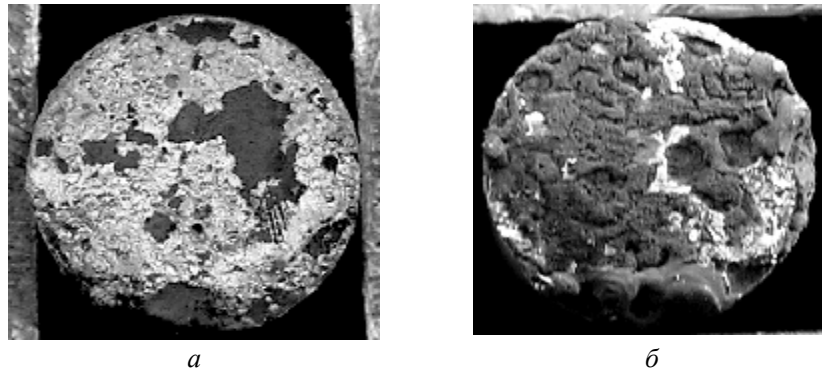


Рис. 9. Зовнішній вигляд робочих поверхонь електродів з латуні: *a* — анод; *б* — катод.

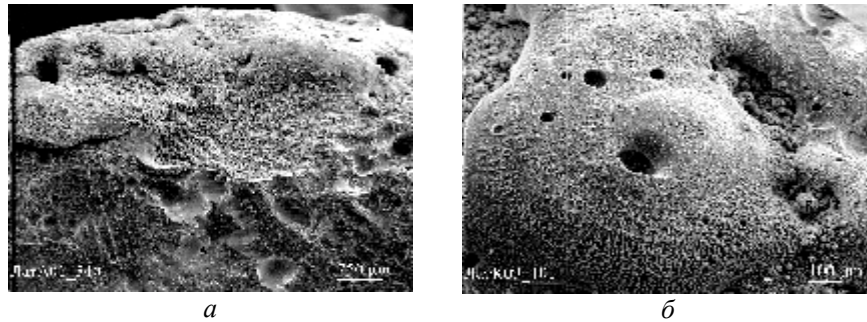


Рис. 10. Руйнування бугрів під дією електричного розряду: *a* — анод; *б* — катод.

Судячи з мікрофотографій на рис. 11 і 12, після перших циклів розряду дія дуги на електроди значно пом'якшується, оскільки в подальшому серйозних змін в структурі самого робочого шару не відбувається. Про це свідчить відсутність активного плавлення матеріалу із заповненням порожнин, а форма залишків кулеподібних порожнин при їх виході на поверхню залишається незмінною (рис. 11, 12). Це у непрямої спосіб підтверджує незаповненість об'єму утворених дефектів.

Відомо, що взагалі латунь має велику схильність до утворення пор і усадкових раковин при кристалізації з розплаву [34]. Проте, враховуючи відносну короткочасність дії електричного імпульсу, а отже, відповідно, нагріву і охолодження поверхні електрода, можна припустити, що відповідальним за утворення таких порожнин є властивий цинку високий тиск насиченої пари [4, 35]. Як свідчать дані, наведені на рис. 13, при температурі 1000 К тиск пари Zn дорівнює 11,413 кПа, а міді — всього  $1,37 \cdot 10^{-6}$  Па. Тому під дією імпульсу струму в місцях локальної концентраційної неоднорідності матеріалу, очевидно, відбувається вибухове випаровування цинку і його просочення углиб прилеглих об'ємів матеріалу з наступною дифузією до робочої поверхні електрода. Це підтверджує утворення кільцевої порожнини між шаром основи матеріалу і його залишками усередині кулястих осередків ураження, що іноді спостерігається на шліфах (рис. 11, *г*; 12, *в*). До того ж на рис. 12, *д* видно, що дрібні округлі осередки пов'язані між собою каналами, по яких, певно, відбувався транспорт цинку на поверхню електрода (рис. 12, *е*). Більші за

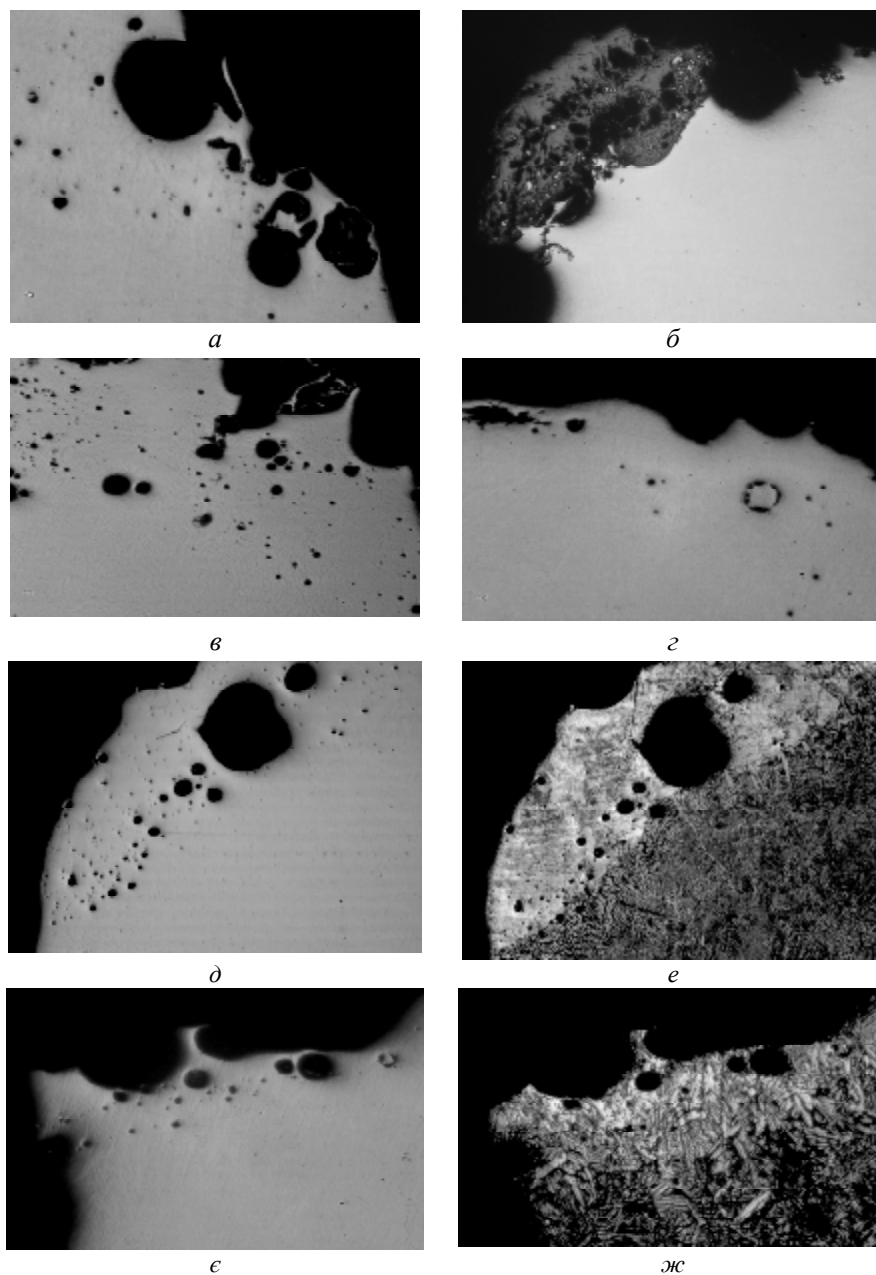


Рис. 11. Мікроструктура робочих шарів анодів з латуні: *a—д, є* — не протравлено, *е, ж* — протравлено.

розміром порожнини явно мають прямий вихід на поверхню (рис. 11, *a, в*; рис. 12, *г*), але оскільки електричний розряд уражає поверхню електрода не лише в нормальному напрямку, але і під кутом (рис. 9, 10), площини шліфів не завжди збігаються з напрямком імпульсу струму.

Разом з цинком в процес випаровування утягувалась і мідь (рис. 14, *a*). При конденсації з парів кристали міді формуються більш чіткої форми і більші за розмірами, ніж кристали цинку (рис. 14, *б*). Іноді сукупність

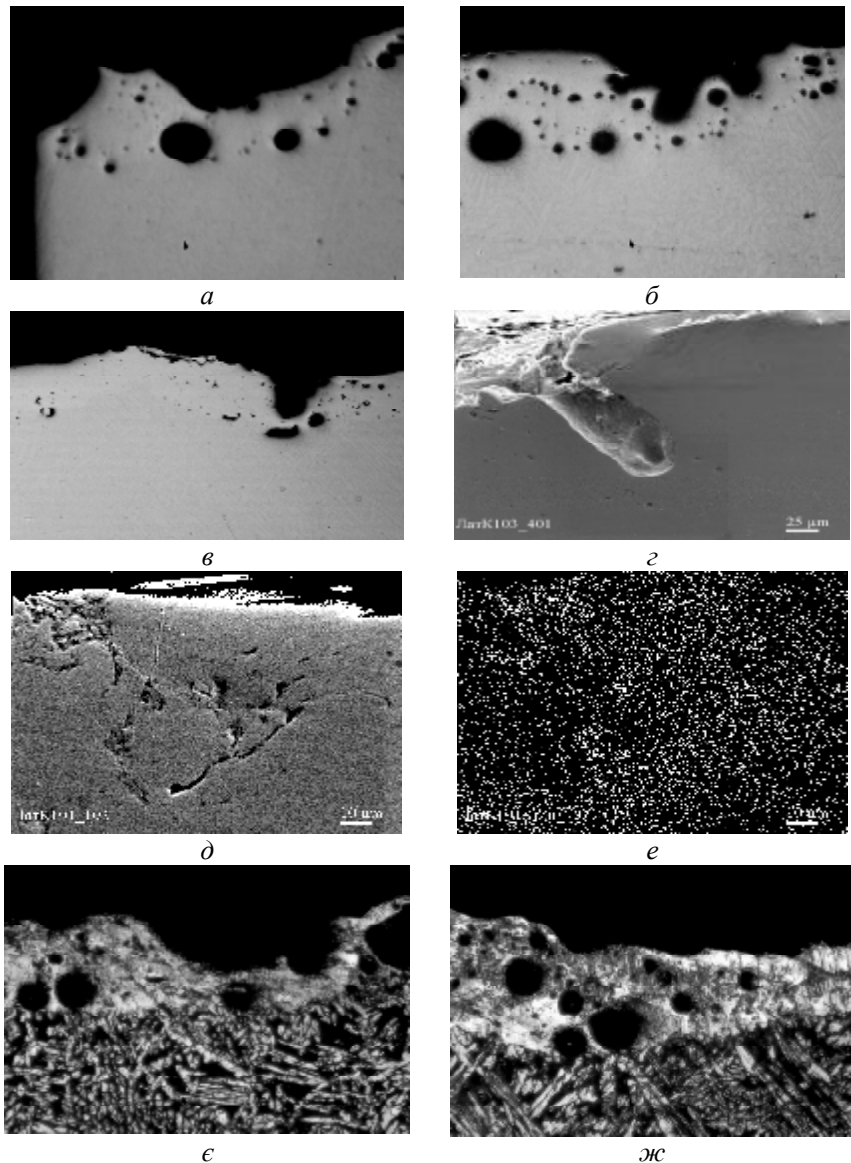


Рис. 12. Мікроструктура робочих шарів катодів з латуні: *a—e* — не протравлено; *е, ж* — протравлено.

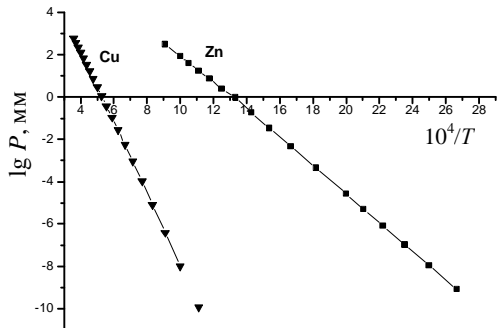


Рис. 13. Залежність тиску насиченої пари цинку та міді від температури [35].

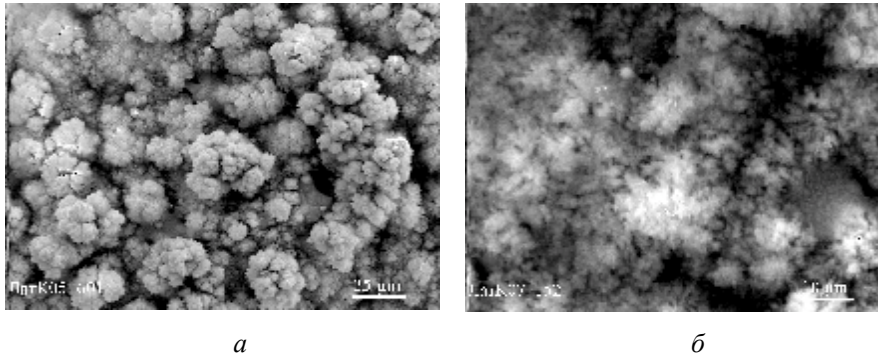


Рис. 14. Конденсати міді (а) і цинку (б) на поверхні електрода.

кристалів міді може перекривати ділянки поверхні з джерелами викиду пари (рис. 14, а) і тоді на них відбувається кристалізація металу, перенесеного з протилежного електрода (рис. 11, б). В той же час в робочих шарах електродів випадків накопичення цинку взагалі не спостерігалось, очевидно, внаслідок досить низької теплоти сублімації [14] в сукупності з високою дисперсністю його кристалів, досить слабо зв'язаних між собою.

Таким чином, на підставі аналізу мікроструктури електродів обох полярностей можна зробити висновок, що основна маса цинку випарилась з їх приповерхневих шарів ще на початковому етапі випробувань. Внаслідок витрат теплової енергії дуги на сублімацію Zn і нагрівання його парів в міжелектродному проміжку введена в електрод тепла потужність значно знизилась, що суттєво уповільнило процес ерозійного руйнування поверхонь електродів. Про це свідчить схожість їх структури і складу як на аноді, так і на катоді, однаково збагачених міддю (рис. 11, е, ж; рис. 12, є, ж — світла фаза).

Одержані результати також підтверджують, що, незважаючи на великий об'єм утворених парів, цинк суттєво меншою мірою, ніж мідь, бере участь у формуванні плазмового стовпа: скоріше за все, значна його доля переноситься крізь міжелектродний проміжок без іонізації. Дійсно, потенціал іонізації цинку  $\varphi_{Zn} = 9,391$  eВ, тоді як для міді  $\varphi_{Cu} = 7,724$  eВ [3]. Тому дуга між досліджуваними електродами повинна горіти переважно в парах міді. Отже, мікроструктурні дослідження свідчать про пріоритетну роль мідної складової у формуванні плазми розряду між електродами з латуні.

### Висновки

Досліджено термічну плазму електродугового розряду між електродами з латуні з метою селекції спектроскопічних констант спектральних ліній Zn I. Підтверджено, що вільно існуюча плазма електродугового розряду між латунними електродами знаходиться в стані локальної термодинамічної рівноваги. Це впливає зі збігу результатів, отриманих двома різними спектроскопічними методами (лазерної абсорбційної та оптичної емісійної спектроскопії) в межах експериментальної похибки, з урахуванням незалежності лазерної абсорбційної спектроскопії від припущення наявності локальної термодинамічної рівноваги.

Показано, що спектральні лінії Zn I 462,9, 466,8, 472,2 та 636,2 нм та їхні спектроскопічні константи можуть бути використані для визначення

температури термічної плазми з домішками парів цинку. Спектральні лінії Zn I 472,2 та 481,0 нм та їхні константи розширення рекомендовано для розрахунку електронної концентрації в такій плазмі.

Досліджено особливості ерозійного руйнування поверхні електродів з латуні. Встановлено, що за рахунок вибухового пароутворення під дією дугового розряду в їх робочому шарі утворюються кулясті порожнини, з яких шляхом дифузії пари цинку виходять на поверхню електрода.

Незважаючи на високу концентрацію цинку в латуні (40%), внаслідок його низької теплоти сублимації і досить високого потенціалу іонізації лише незначна його доля бере участь в перенесенні струму. Це підтверджує і відсутність накопичення цинку в робочих шарах електродів.

1. Денисова Л. Т. Применение серебра (обзор) / [Л. Т. Денисова, Н. В. Белоусова, В. М. Денисов, В. В. Иванов] // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. — 2009. — 2, No. 2. — P. 250—277.
2. Афонин М. П. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной коммутационной аппаратуры и области их применения в электротехнике / М. П. Афонин, М. Н. Овчинникова // Электрические контакты и электроды — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2006. — С. 153—159.
3. Физико-химические свойства окислов: (Справ.) / Под ред. Г. В. Самсонова. — М. : Металлургия, 1978. — 471 с.
4. Физико-химические свойства элементов: (Справ.) / Под ред. Г. В. Самсонова. — К. : Наук. думка, 1965. — 807 с.
5. Pat. 4131458 US. Electrical contact material of silver base alloy / [M. Satoh, M. Hijikata, H. Maeda, I. Morimoto]. — Publ. Dec. 26, 1978.
6. Заявка 59—67342 Японии. Контактный материал / К. К. Татэиси Дэнки. — Оубл. 17.04.84.
7. Sech V. Vyojove tendence materialu pro elektricke kontakty // Pokr. prask. met. VUPM. — 1995. — No. 3. — P. 20—23.
8. Pat. 6432157 US. Method for preparing Ag—ZnO electric contact material and electric contact material produced thereby / [Tanaka Kikinzoku Коо К. К., Nakamura Tetsuya, Sakaguchi Osamu et al.]. — Publ. 13.08.2002.
9. Заявка 56—22087 Японии. Материал электрического контакта для силового воздушного выключателя / Sumitomo Denki Кogyо К. К. — Оубл. 23.05.81.
10. Gavrilu S. Cercetari privind realizarea amestecurilor de pulberi de argint — oxid de cadmiu si argint — oxid de zinc pentru materiale de contact cu structura fin dispersata / [S. Gavrilu, E. Enescu, P. Lungu Dodu, P. Roman] // Rev. Chim. (RSR). — 1980. — 31, No. 10. — P. 987—991.
11. Заявка 56—48575 Японии. Материал для электроконтактов / Sumitomo Denki Кogyо К. К. — Оубл. 17.11.81.
12. Заявка 57—2261 Японии. Материал для электроконтактов системы серебро—окислы / Токурики Хонтэн К. К. — Оубл. 14.01.82.
13. Заявка 56—116845 Японии. Контактный материал / Мацусита Дэнко К. К. — Оубл. 12.09.81.
14. Заявка 56—133436 Японии. Композиционный материал для электрических контактов / Танака Кикиндзоку Коге К. К. — Оубл. 19.10.81.
15. Пат. 2434717 РФ. Способ получения высокодисперсной шихты серебро—оксид цинка для электроконтактов / В. В. Иванов, Н. С. Николаева, А. А. Шубин. — Оубл. 27.11.2011.
16. Ivanov V. V. Ag/ZnO and Ag/SnO<sub>2</sub> electrocontact materials obtained from fine-grained coprecipitated powder mixture / [V. V. Ivanov, N. S. Nikolaeva, I. A. Sidorak et al.] // J. of Siberian Federal University. Chemistry. — 2012. — 2, No. 5. — P. 131—137.

17. Усов В. В. Металловедение электрических контактов. — М.—Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 208 с.
18. Теремов С. Г. Спеченные электротехнические псевдосплавы, дисперсно-упрочненные ультрадисперсными частицами / [С. Г. Теремов, Ю. И. Гордеев, А. А. Букаемский и др.] // Ультрадисперсные порошки материалов и наноструктуры: получение, свойства, применение: Матер. межрегион. конф. с междунар. участием, Красноярск, 17—19 дек. 1996. — Красноярск, 1996. — С. 129—130.
19. Правовееров Н. Л. Контактные композиции на основе серебро-оксид металла / Н. Л. Правовееров, А. Г. Дуксина, В. Л. Калихман // Электрические контакты и электроды. — К., 1991. — (Препр.) / НАН Украины, Ин-т пробл. материаловедения, № 9. — С. 12—17.
20. Бабіч І. Л. Спектроскопія плазми електродугового розряду між композиційними електродами Ag—SnO<sub>2</sub>—ZnO / [І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич та ін.] // Там же. — С. 81—90.
21. Babich I. L. Plasma of electric arc between composition electrodes / [I. L. Babich, V. Ye. Osidach, V. I. Sobovoy, A. N. Veklich] // Czechoslovak J. of Phys. — 2002. — 52 (D). — D731—D735.
22. Bockasten K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // J. Opt. Soc. Amer. — 1961. — 51. — P. 943—947.
23. Babich I. L. Spectroscopic data and stark broadening of Cu I and Ag I spectral lines: Selection and analysis, in press / [I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. N. Veklich, R. V. Semenyshyn] // Advances in Space Research. — 2013. — 10. — 1016/j.asr.2013.10.034.
24. Veklich A. N. The determination of electron density in electric arc discharge plasma / A. N. Veklich, V. Ye. Osidach // Bulletin of the University of Kyiv, Series: Phys. & Mathematics. — 2004. — 2. — P. 428—435.
25. Thevenin F. Oscillator strength from the solar spectrum // Astron. Astrophys. Suppl. — 1989. — 77. — P. 137—154.
26. Komarovskiy V. A. Atomic database Spectr-W3 for plasma spectroscopy and other applications / V. A. Komarovskiy, L. N. Shabanova // <http://spectr-w3.snz.ru/new/index.phtml>. — Accessed June 2013.
27. Schuttevaer J. W. The relative probabilities of transitions in the zinc atom / J. W. Schuttevaer, J. A. Smit // Phys. — 1943. — 10. — P. 502—512.
28. Smith P. L. Atomic spectral line database from CD-ROM 23 of R. L. Kurucz / [P. L. Smith, P. L. Smith, C. Heize et al.] // [www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html](http://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html). — Accessed June 2013.
29. Meenakshi Raja Rao. Line broadening studies in low energy plasma focus / [Raja Rao Meenakshi, P. Saraswathy, G. Krishnamurty et al.] // J. Phys. — 1989. — 32. — P. 627—639.
30. Konjevic R. Stark broadening and shift of neutral copper spectral lines / R. Konjevic, N. Konjevic // Fizika. — 1986. — 18. — P. 327—335.
31. Мальцев М. В. Металлография цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев, Т. А. Барсукова, Ф. А. Борин. — М. : Металлургиздат, 1960. — 372 с.
32. Бабич І. Л. Плазма електричної дуги между електродами из композиционных материалов на основе серебра / [І. Л. Бабич, А. Н. Веклич, М. Ю. Дресвянкін и др.] // Электрические контакты и электроды— К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2006. — С. 27—35.
33. Бабіч І. Л. Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO / [І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич та ін.] // Там же, 2010. — С. 82—115.
34. Дальский А. М. Технология конструкционных материалов. — М. : Машиностроение, 2004. — 512 с.
35. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. — М. : Изд-во АН СССР, 1961. — 396 с.

## **Электродуговой разряд между латунными электродами: особенности спектроскопии плазмы и микроструктурных изменений рабочего слоя электродов**

И. Л. Бабич, В. Ф. Борецкий, А. Н. Веклич, Л. А. Крячко,  
А. В. Лебедь, Р. В. Семенишин, С. А. Фесенко, М. Е. Головкова

*Методами лазерной абсорбционной и оптической эмиссионной спектроскопии проведена диагностика плазмы свободно горящего дугового разряда между электродами из латуни при силе тока  $I = 3,5$  и  $30$  А. Совпадение результатов, полученных этими методами, подтвердило наличие локального термодинамического равновесия в указанных условиях. Проведена селекция спектроскопических констант спектральных линий Zn I и выданы рекомендации относительно возможности их использования для определения температуры плазмы с добавками цинка, а также электронной концентрации в такой плазме. Исследованы особенности поведения цинка в электродах из латуни под действием дуги. Выявлены закономерности поступления цинка на рабочую поверхность электродов и его роль в функционировании разряда.*

**Ключевые слова:** низкотемпературная плазма, оптическая спектроскопия, пары цинка, микроструктура рабочего слоя.

## **Electric arc discharge between brass electrodes: peculiarities of plasma spectroscopy and change in the microstructure of working electrode layers**

I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. M. Veklich, L. O. Kryachko,  
A. V. Lebed, R. V. Semenyshyn, S. O. Fesenko, M. Ye. Golovkova

*Plasma diagnostics of free-burning arc discharge between brass electrodes was performed by methods of laser absorption spectroscopy and optical emission spectroscopy at a current strength of 3,5 and 30 A. The coincidence of the results obtained by these methods confirms the local thermodynamic equilibrium in plasma under these conditions. Zn I spectral lines and their spectroscopic data of were selected and recommendations were made concerning possibilities of their use for determination of temperature and electron density in zinc-added plasma. Also, peculiarities of the behavior of zinc in brass electrodes under the action of electric arc were studied. The regularities of zinc flow onto the working electrode surface and the role of the zinc in the arc performance were defined.*

**Keywords:** low temperature plasma, optical spectroscopy, zinc vapor, microstructure of the working layer.