

## Дослідження плазми електродугового розряду з домішками парів міді та нікелю

А. М. Веклич, М. М. Клешич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна,  
e-mail: [techno\\_01@ukr.net](mailto:techno_01@ukr.net)

*Досліджено плазму електричної дуги з домішками парів Ni та Cu. Методом оптичної емісійної спектроскопії одержано радіальні профілі температури плазми розряду між електродами Cu та Ni або Ni та Ni. Із залученням вимірних напруженості електричного поля позитивного стовпа та температури розраховано радіальні розподіли електронної концентрації плазми.*

**Ключові слова:** плазма електродугового розряду, радіальний розподіл температури, метод відносних інтенсивностей, напруженість електричного поля, радіальний розподіл електронної концентрації, рівняння енергетичного балансу.

### Вступ

В електротехнічній промисловості широко застосовуються пристрої для комутації струму різного ступеня навантаження, зокрема реле, комутатори тощо [1, 2]. Основним призначенням такого типу обладнання є замикання або гальванічна розв'язка електричного кола, по якому протікає струм необхідної форми та амплітуди. Крім того, застосування таких комутаційних систем повинно забезпечити захист елементів електричних кіл від перенапруги [3].

Важливим конструкційним елементом будь-якого комутаційного апарату є його контакти [1, 2]. Відомо, що тривалість експлуатації електричних контактів є обмеженою і визначається електроерозійною стійкістю матеріалу, з якого вони виготовлені. Під дією електричного розряду відбуваються незворотні зміни поверхні робочого шару контактної пари таких пристроїв, що зумовлює ефективність їх роботи [4]. Для покращення експлуатаційних характеристик електричних контактів запропоновано застосовувати композитні матеріали [2, 5, 6]. Перевагою таких матеріалів є поєднання компонентів з високими електропровідністю та теплопровідністю і компонентів з високою ерозійною стійкістю. Зокрема, ерозійні властивості композитів визначаються їх тугоплавкою складовою (наприклад, вольфрамом або молібденом), а необхідні електропровідність та теплопровідність — легкоплавкою (наприклад, міддю або сріблом). Зазвичай електротехнічні композитні матеріали виготовляються методами порошкової металургії [2].

З метою зменшення часу розробки, оптимізації складу та технології виготовлення композитних матеріалів необхідно застосувати комплекс діагностичних засобів для визначення параметрів електричних контактів [7]. Крім того, в роботах [8, 9] пропонуються методи дослідження ерозійної стійкості композитних електродних матеріалів під дією термічної плазми електродугового розряду. Визначені методами оптичної спектроскопії радіальні розподіли температури та електронної концентрації

плазми використано для розрахунку компонентного складу плазми і, зокрема, присутніх в розрядному проміжку домішок електродного походження. В такий непрямий спосіб автори оцінили інтенсивність ерозійних процесів на поверхні композитних електродів [10, 11].

Як уже зазначалося, композити на основі срібла та міді широко застосовуються для виготовлення матеріалів контактів електротехнічних пристроїв [2]. Вже розроблено методики дослідження плазми електродугового розряду між такими композитними електродами [12, 13]. Наявність в спектрі випромінювання плазми спектральних ліній саме цих елементів дозволила шляхом залучення цілого комплексу методів реалізувати селекцію спектральних ліній атомів Ag I та Cu I і їх спектроскопічних констант. Таким чином, проведено діагностику плазми електродугового розряду між електродами із композитних матеріалів (наприклад, Ag—CuO, Ag—SnO<sub>2</sub>—ZnO) чи латуні методами оптичної спектроскопії. Також у сучасних застосуваннях широко використовують і композитний матеріал Ag—Ni [14]. Дослідження ерозійної стійкості цього матеріалу методами оптичної спектроскопії раніше проводилося тільки із залученням спектральних ліній Ag I. Тому з метою розширення експериментальних можливостей методики оптичної діагностики плазми електричної дуги з домішками парів срібла і нікелю необхідно долучити і спектральні лінії Ni I. Як модельне джерело на першому етапі розробки методики діагностики із залученням спектральних ліній Ni I доцільно використати плазму електродугового розряду між однокомпонентними електродами. У такій конфігурації електричної дуги один електрод обов'язково повинен бути виготовлений з нікелю, а інший — з металу, атомні константи і спектральні лінії якого добре вивчені (срібло або мідь) [12].

Отже, метою даної роботи є комплексне дослідження параметрів плазми електродугового розряду між однокомпонентними електродами, а саме визначення радіального розподілу температури, вимірювання напруженості електричного поля, розрахунок електронної концентрації. Використання пари однокомпонентних електродів Cu та Ni або Ni та Ni дозволить виконати апробацію раніше розробленої процедури селекції спектральних ліній та спектроскопічних констант атома нікелю.

### Методики експерименту

**Електродуговий розряд між однокомпонентними електродами.** Вільноіснуючу електричну дугу запалювали в атмосфері повітря між торцевими поверхнями неохолоджуваних електродів. Розрядний проміжок складав 8 мм, діаметр електродів — 6 мм, струм дуги — 3,5 А. Електроди розташовані вертикально: верхній електрод — Ni (катод), нижній — Cu або Ni (анод). Такого типу розряд можна розглядати як спрощену модель електричної дуги між композитними електродами, плазма якої містить пари нікелю.

Дослідження впливу потоків газів на плазму електричної дуги виконано у такому ж режимі роботи розряду. Потік газу (повітря або аргону) у цьому джерелі спрямовували з боку верхнього електрода співвісно до розряду зі швидкістю 6,44 л/хв.

**Визначення радіального розподілу електронної концентрації.** В роботі [15] запропоновано комплексну методику визначення електронної

концентрації в плазмі електродугового розряду. Відомо, що теплопровідність плазми мало залежить від наявності домішок металу в розрядному проміжку [15]. Проте електропровідність позитивного стовпа дугового розряду визначається саме наявністю парів металів у плазмі. Тому із розв'язку рівняння енергетичного балансу Еленбааса—Геллера можна одержати радіальні розподіли електропровідності:

$$\sigma(r) = -\frac{1}{rE^2} \left[ \frac{d}{dr} \left( r\lambda \frac{dT}{dr} \right) \right], \quad (1)$$

де  $r$  — радіус;  $E$  — напруженість електричного поля;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності;  $T(r)$  — радіальний розподіл температури електричного поля.

В той же час, враховуючи, що рухливість електронів в плазмі значно перевищує рухливість іонів, електропровідність визначають таким чином [15]:

$$\sigma(r) = eN_e(r)\mu_e(r). \quad (2)$$

Отже, з радіального розподілу електропровідності (1) (за умови попередньо експериментально визначених профілю температури і напруженості електричного поля в плазмі розряду) відповідно до (2) можна розрахувати радіальний розподіл концентрації електронів [15]:

$$N_e(r) = \frac{\sigma(r)}{e\mu_e(r)}. \quad (3)$$

**Визначення радіального розподілу температури плазми електродугового розряду з домішками парів Ni.** Для одночасної реєстрації спектральних та просторових розподілів інтенсивності випромінювання електричної дуги застосовано розроблену раніше методику діагностики [13]. У цьому випадку використано дифракційний спектрометр та цифрову камеру на основі приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (рис. 1). Просторові розподіли інтенсивності випромінювання плазми електродугового розряду зареєстровані у спектральному діапазоні 400—660 нм. Отримані зображення спектрів випромінювання плазми оброблено за допомогою графічного інтерфейсу користувача [13].

Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду визначено методом відносних інтенсивностей у припущенні осьової симетрії [16] джерела оптичного випромінювання дуги силою струму 3,5 А, плазма якої перебуває в стані локальної термодинамічної рівноваги.

Радіальні розподіли температури плазми з домішками парів металів побудовані із залученням спектральних ліній Ni I 508,1 нм, 508,4 нм, 547,6 нм та Cu I 521,8 нм, 578,2 нм. Селекцію спектральних ліній та спектроскопічних констант Ni I і Cu I наведено в попередніх роботах [17, 18].

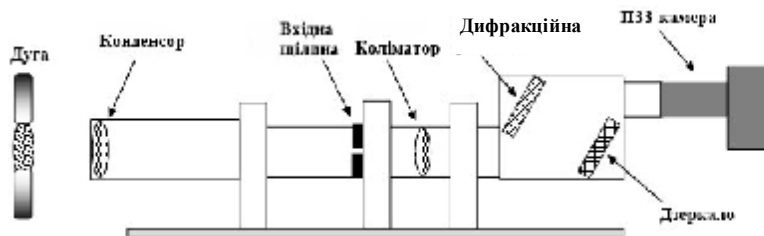


Рис. 1. Оптична схема експериментальної установки [13].

**Визначення напруженості електричного поля позитивного стовпа електродугового розряду між однокомпонентними електродами.** Часові залежності напруженості електричного поля в різних газових середовищах визначені за допомогою раніше розробленої методики на основі модуляції міжелектродної відстані [19] із застосуванням спеціального електромеханічного пристрою. Від електродвигуна, вал якого обертається з постійною кутовою швидкістю, обертальний момент подається на кривошипно-шатунний механізм, що розміщений вертикально. До верхньої частини цього пристрою кріпиться один з електродів (анод). Інший електрод (катод) є нерухомим.

Напруженість електричного поля вимірювали автоматично із залученням спеціально розробленого алгоритму в програмному інтерфейсі користувача [19] з фіксованими проміжками часу через інтерфейс USB. Отримані за допомогою цифрового осцилографа дані передавали на персональний комп'ютер в режимі реального часу. Повний час кожного вимірювання напруженості електричного поля становив 3 хв.

### Результати та їх обговорення

На рис. 2 наведено радіальні розподіли температури плазми в середньому поперечному перерізі електродугового розряду між Cu та Ni

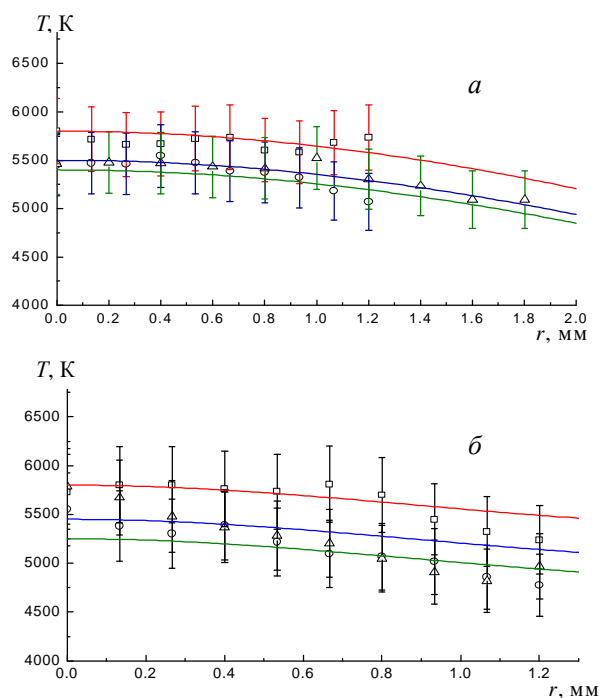


Рис. 2. Радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між електродами Cu та Ni силою струму 3,5 А за різними режимами роботи із залученням спектральних ліній Cu I 521,8 нм, 578,2 нм (а) та Ni I 508,1 нм, 508,4 нм, 547,6 нм (б): □, Δ — розряди в потоках аргону та повітря; ○ — вільноіснуючий розряд.

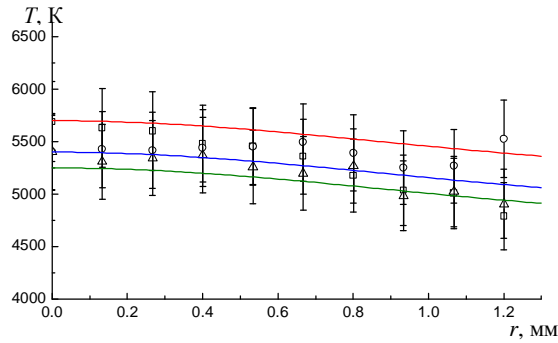


Рис. 3. Радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між електродами Ni та Ni силою струму 3,5 А в різних газових атмосферах із залученням спектральних ліній Ni I 508,1; 508,4 та 547,6 нм: □, △ — розряди в потоках аргону та повітря; ○ — вільноіснуючий розряд.

електродами силою струму 3,5 А вільноіснуючого дугового розряду та розряду в потоках повітря або аргону. В розрахунках температури використано спектроскопічні константи атомів нікелю та міді із робіт [20] та [12] відповідно. Радіальні профілі температури, визначені із залученням спектральних ліній Cu I та Ni I, збігаються в межах похибки вимірювань. Крім того, додатково визначено радіальні розподіли температури (рис. 3) плазми між електродами Ni та Ni для тих же режимів роботи електродугового розряду. Для усіх одержаних експериментально радіальних профілів температури виконано апроксимацію функцією Гаусса.

При визначенні радіальних профілів температури плазми з домішками парів нікелю методом відносних інтенсивностей використано сумарну інтенсивність спектральних ліній Ni I 508,1 нм та 508,4 нм. У цьому випадку взято їх середнє значення енергії збудження, а добуток  $gf_{ji}$  — як суму двох доданків — відповідних добуток кожної із спектральних ліній [17]. Варто зауважити, що спектральну лінію Ni I 508,0 нм не вдалося зареєструвати в спектрі випромінювання плазми електричної дуги розрядного струму 3,5 А. Тому цю лінію не залучали при визначенні температури плазми. Абсолютне значення температури, що одержане в даній роботі, збігається із результатом попередніх досліджень [17], в яких використано електроди з нікелевої фольги. Збіг результатів незалежних досліджень, ймовірно, зумовлений однаковою інтенсивністю ерозійних процесів на поверхні мідного та нікелевого електродів. Однак кількісна зміна ліній нікелю в спектрі випромінювання плазми, скоріш за все, спричинена різними внесками електричної енергії в розрядний проміжок.

Збіг радіальних профілів температури плазми електродугового розряду як між електродами Cu та Ni, так і Ni та Ni спричинений, очевидно, наявністю домішок парів металів у розрядному проміжку. Зазначимо, що значення потенціалів іонізації атомів Cu та Ni майже однакові і становлять 7,72 та 7,63 eV відповідно. Отже, температура плазми за наявності домішок як парів міді, так і нікелю в плазмі за даних експериментальних умов є співвимірною.

Як видно на рис. 2 та 3, температура плазми з домішками парів металів також не змінюється при роботі електродугового розряду в потоках газів (повітря або аргону). Можна припустити, що потік газів заданої інтенсивності (6,44 л/хв стандартних) не впливає на величину внеску електричної енергії в розрядний проміжок і не приводить до додаткового охолодження об'єму електродугової плазми.

На наступному етапі досліджено поведінку напруженості електричного поля. Аналізуючи одержані залежності напруженості електричного поля  $E$  (рис. 4), можна виділити три групи даних, які мають близькі значення: 1) електроди Ni та Ni в потоці аргону (1 В/мм); 2) електроди Cu та Ni в потоці аргону (2 В/мм); 3) електроди Ni та Ni і Cu та Ni вільноіснуючого розряду та розряду в потоці повітря (3 В/мм).

Особливий інтерес представляють перші два випадки. За даних умов електродуговий розряд запалювали в потоці аргону. Відомо, що в інертних газах ефективний переріз розсіювання електрона залежить від його кінетичної енергії (ефект Рамзауера [21]). Саме цим можна пояснити зменшення перерізу розсіювання електрона в атмосфері аргону в діапазоні енергій, які характерні для дугового розряду. Як видно на рис. 4, у випадку використання лише електродів Ni та Ni середнє значення напруженості електричного поля найменше. Концентрація домішок парів металів в цьому випадку є найнижчою і розсіюючими центрами для електронів є здебільшого частинки буферного газу — аргону.

Інша ситуація спостерігається при використанні електродів Cu та Ni (для цього режиму роботи електричної дуги виконано два вимірювання) — напруженість електричного поля збільшилася від 1 до 2 В/мм. Таку залежність напруженості електричного поля можна пояснити більшою інтенсивністю ерозійних процесів на поверхні мідного електрода. Тобто напруженість електричного поля в стовпі плазми визначатиметься переважно внесенням парів міді в розрядний проміжок.

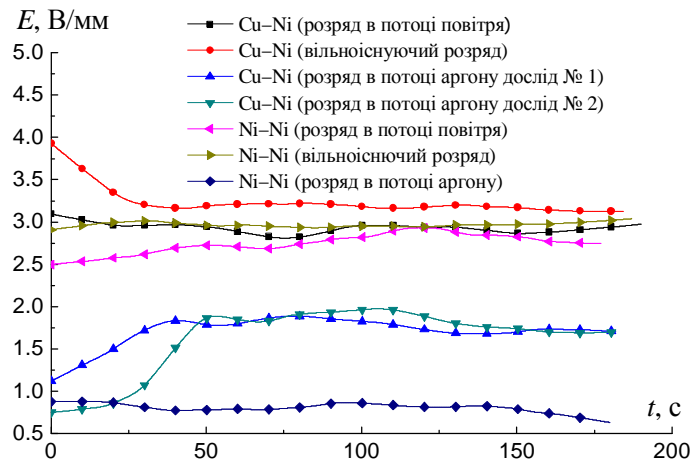


Рис. 4. Часова залежність напруженості електричного поля між електродами Cu та Ni і Ni та Ni вільноіснуючого розряду та розряду в потоках газів (повітря або аргон).

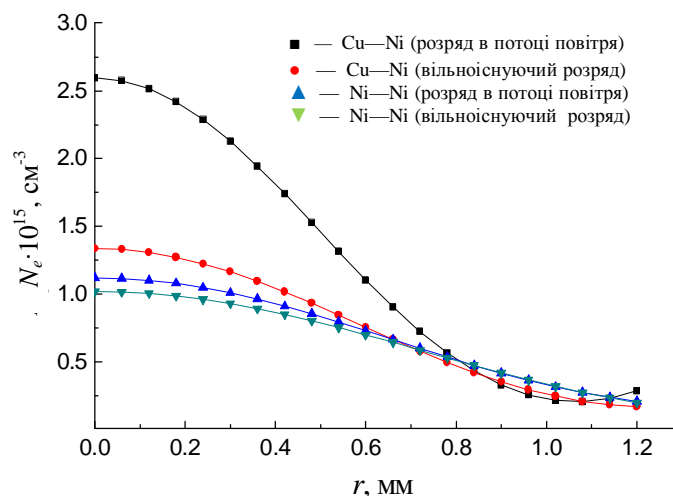


Рис. 5. Радіальні розподіли електронної концентрації між електродами Cu та Ni і Ni та Ni вільноіснуючого розряду та розряду в потоці повітря для струму дуги 3,5 А.

Напруженість електричного поля вільноіснуючого розряду та розряду в потоці повітря набуває, як і очікувалось, максимальне в цих дослідженнях значення (3 В/мм), оскільки для такого складу атмосфери відсутній ефект Рамзауера.

На останньому етапі досліджень із одержаних радіальних розподілів температури та значення напруженості електричного поля в плазмі відповідно до співвідношення (3) розраховано радіальні розподіли електронної концентрації (рис. 5) як вільноіснуючого розряду, так і розряду в потоці повітря (сила струму 3,5 А) для всіх комбінацій електродів. Отримані значення електронної концентрації корелюють за порядком величини ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) з раніше одержаними результатами досліджень плазми електродугового розряду (струм 3,5 А) в повітрі між однокомпонентними мідними електродами [22, 23]. Одержані результати вимірювань для режимів роботи електродугового розряду в потоці аргону можуть бути використані для розрахунку радіальних профілів електронної концентрації в плазмі між електродами Ni та Ni і Cu та Ni.

### Висновки

Досліджено плазму електродугового розряду силою струму 3,5 А з домішками парів нікелю та/або міді вільноіснуючого розряду та розряду в потоках повітря або аргону. Використано однокомпонентні електроди різних комбінацій: катод виготовлено з нікелю, а анод — з нікелю або міді.

Методом оптичної емісійної спектроскопії визначено радіальні профілі температури із залученням спектральних ліній як Cu I, так і Ni I. Апробовано раніше розроблену методику селекції спектральних ліній та спектроскопічних констант атома нікелю. Виміряно залежності напруженості електричного поля в стовпі дугового розряду, що дозволило розрахувати радіальні розподіли електронної концентрації плазми.

Встановлено, що напруженість електричного поля в стовпі плазми визначається як сортом робочого газу, так і наявністю парів металів в розрядному проміжку. Показано, що потік газу (повітря або аргону) заданої інтенсивності (6,44 л/хв стандартних) не впливає на абсолютне значення температури плазми електродугового розряду з домішками парів металів.

Спектральний склад випромінювання плазми електричної дуги між електродами залежить, як показали дослідження, від концентрації парів нікелю в розрядному проміжку. Крім того, встановлено, що в плазмі дуги між нікелевими електродами в атмосфері аргону кількість парів металу є найменшою. Подальші додаткові дослідження вмісту домішок нікелю та/або міді в розряді дозволять оцінити їх вплив як на спектральний склад випромінювання, так і на напруженість поля позитивного стовпа дуги в різних газових атмосферах.

Автори вважають своїм обов'язком висловити подяку кандидату технічних наук Крячко Л. О. та доктору технічних наук Гречанюку М. І. за надання матеріалів для виготовлення електродів.

1. *Буткевич Г. В.* Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин. — М. : Энергия, 1978. — 253 с.
2. *Braunovic M.* Fundamentals of electrical contacts / M. Braunovic, V. Konchits, N. Myshkin. — NY : Taylor & Francis group, 2006. — Part I. — 597 p.
3. *Буль Б. К.* Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. А. Годжелло. — М. : Высшая школа, 1970. — 600 с.
4. *Кесаев И. Г.* Катодные процессы электрической дуги. — М. : Наука, 1968. — 244 с.
5. *Минакова Р. В.* Тенденции развития технологий изготовления композиционных материалов и контактов из них / [Р. В. Минакова, А. П. Кресанова, М. М. Чураков, Е. В. Хоменко] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1998. — С. 5—19.
6. *Minakova R. V.* Contact interaction, W (Mo, Cr)—Cu structure and properties of composites with additives / [R. V. Minakova, N. D. Lesnik, A. P. Kresanova et al. ] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — К. : Frantsevich Institute for Problems of Materials. — 1996. — 35. — P. 363—371.
7. *Павленко Т. А.* Розвиток теорії електричних контактів підвищеної дугостійкості для комутаційних електричних апаратів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Харків, 2012.
8. *Semenyshyn R. V.* Spectroscopy peculiarities of thermal plasma of electric arc discharge between electrodes with Zn admixtures / [R. V. Semenyshyn, A. N. Veklich, I. L. Babich, V. F. Boretskij] // Advances in Space Research. — 2014. — 54. — P. 1235—1241.
9. *Fesenko S.* Properties of thermal air plasma with admixing of copper and carbon / [S. Fesenko, A. Veklich, V. Boretskij et al.] // J. of Phys.: Conference Series. — 2014. — 550. — 012008 (8pp.)
10. *Бабіч І. Л.* Взаємозв'язок процесів на поверхні електродів та в плазмі електричної дуги, що вільно горить у повітрі / І. Л. Бабіч, А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. — 2001. — № 3. — С. 9—16.



11. *Веклич А. М.* Методика спектроскопічної діагностики плазми електричної дуги / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. — 2003. — № 5. — С. 12—14.
12. *Babich I. L.* Spectroscopic data and Stark broadening of Cu I and Ag I spectral lines: Selection and analysis / [I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. N. Veklich, R. V. Semenushyn] // Advances in Space Research. — 2014. — **54**. — P. 1254—1263.
13. *Veklich A. N.* Investigations of thermal plasma with metal impurities. Part II: Peculiarities of spectroscopy by W I, Mo I, Cu I spectral lines / [A. N. Veklich, A. V. Lebid, P. V. Soroka et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. — 2013. — **19**, No. 1. — P. 213—215.
14. *Mohamed Akbi.* Effects of arcing in air on the microstructure, morphology and photoelectric work function of Ag—Ni (60/40) contact materials // International J. of Chem., Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering. — 2015. — **9**, No. 2. — P. 296—303.
15. *Веклич А. М.* Властивості плазми електродугового розряду в повітрі з домішками міді та вуглецю / [А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький, Я. Крессо] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. — 2014. — С. 9—16.
16. *Bockasten. K.* Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // J. of Opt. Soc. of Amer. — 1961. — **51**, No. 9. — P. 943—947.
17. *Веклич А. М.* Спектроскопія плазми електричної дуги між Cu—Ni електродами в потоці аргону / [А. М. Веклич, М. М. Клешич, В. Ф. Борецький та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки. — 2015. — № 2. — С. 215—220.
18. *Veklich A. N.* Spectroscopy peculiarities of thermal plasma with copper and nickel vapours / [A. N. Veklich, M. M. Kleshich, V. V. Vashchenko, I. O. Kuzminska ] // Problems of Atomic Sci. and Technology. — 2015. — **98**, No. 4. — P. 215—219.
19. *Veklich A. N.* Measuring of the electric field of a positive column in arc discharges / [A. N. Veklich, S. O. Fesenko, V. F. Boretskij, M. M. Kleshich] // XI Internat. sci. conf. “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, Oct. 21—24, 2015). — P. 149—150.
20. *Корлисс Ч.* Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов / Ч. Корлисс, У. Бозман. — М. : Мир, 1968. — 552 с.
21. *Королёв Ю. Д.* Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме. — Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. — 128 с.
22. *Веклич А. М.* Спектроскопічні дослідження електродугової плазми складної суміші газу та парів металу / А. М. Веклич, І. Л. Бабіч, А. І. Чередарчук // Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. — 2000. — № 2. — С. 25—29.
23. *Veklich A. N.* Multicomponent thermal plasma of arc discharges / A. N. Veklich, I. L. Babich, A. I. Cheredarchuk // Czechoslovak J. of Phys. — 2001. — **51**, No. 1. — P. 27—34.

## **Исследование плазмы электродугового разряда с примесями паров никеля и меди**

А. Н. Веклич, М. М. Клешич, С. А. Фесенко, В. Ф. Борецкий

*Исследована плазма электродугового разряда с примесями паров Ni и Cu. Методом оптической эмиссионной спектроскопии получены радиальные профили температуры между электродами Cu и Ni или Ni и Ni. Вычислены радиальные распределения электронной концентрации плазмы на основании измеренных напряженности электрического поля положительного столба и температуры.*

**Ключевые слова:** *плазма электродугового разряда, радиальное распределение температуры, метод относительных интенсивностей, напряженность электрического поля, радиальное распределение электронной концентрации, уравнение энергетического баланса.*

## **Investigation plasma of electric arc discharge with impurities of vapours nickel and copper**

A. N. Veklich, M. M. Kleshich, S. O. Fesenko, V. F. Boretskij

*Plasma of electrical arc with Ni and Cu vapor impurities was investigated. Radial profiles of plasma temperature in discharge between of Cu and Ni or Ni and Ni electrodes were obtained by method of optical emission spectroscopy. Radial distributions of plasma electron density were calculated with taking into account of measured electric field of positive column and temperature radial profiles.*

**Keywords:** *plasma of electric arc discharge, radial temperature distribution, the method of relative intensities, electric field, the radial distribution of electron density, the energy balance equation.*