

## Дослідження плазми електродугового розряду з домішками міді та хрому

А. М. Веклич, А. В. Лебідь, О. О. Сірик, О. В. Хоменко\*

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)

*Досліджено плазму електродугового розряду в потоці аргону між електродами з композита  $Cu-Cr-W$ , виготовленого за технологією порошкової металургії. Методами оптичної емісійної спектроскопії отримано радіальні розподіли температури та електронної концентрації для струмів 3,5 та 30 А. Дані експериментальні результати використано для розрахунку складу плазми у припущенні локальної термодинамічної рівноваги. Досліджено структурні зміни електродів під впливом дуги та встановлено їх подібність до змін робочого шару дугогасильних контактів промислової вакуумної камери після стендових випробувань на комутаційну зносостійкість.*

**Ключові слова:** плазма електродугового розряду, композити  $Cu-Cr$ , ерозія.

### Вступ

Композитні матеріали на основі міді та хрому розробляються з метою застосування для контактів електричних вакуумних вимикачів. При комутації електричних кіл у цих приладах виникають електричні дуги, які спричиняють ерозію поверхні контактів і, як наслідок, потрапляння їх матеріалу в розрядний проміжок.

Вплив домішок електродугового походження на параметри плазми електричних дуг найчастіше визначають за допомогою не збуджуючих методів оптичної спектроскопії. Наприклад, у роботі [1] засобами оптичної емісійної спектроскопії досліджували плазму електродугового розряду при низькому тиску з домішками цирконію та хрому. Для електродугового переплавлення використовували вакуумну піч, в якій одним із електродів був зливковий сплав на основі цирконію з домішками хрому та олова. Для діагностики залучали спектральні лінії атомів цирконію та хрому. Слід зауважити, що температури, визначені по лініям  $Zr I$ ,  $Zr II$  та  $Cr I$ , значно відрізняються між собою. Це може бути пояснено порушенням закону Больцмана для заселеностей енергетичних рівнів цих атомів і, відповідно, порушенням стану локальної термодинамічної рівноваги при низьких тисках [2].

У зв'язку зі складнощами дослідження вакуумних дуг (перш за все, технологічного характеру) у даній роботі пропонується дослідити плазму електричної дуги атмосферного тиску з домішками міді та хрому в потоці аргону з метою уникнення окиснення електродів.

### Експеримент

Композитні електроди  $Cu-Cr-W$  виготовляли з порошків металів з масовим співвідношенням компонентів 49 : 49 : 2. Технологія отримання

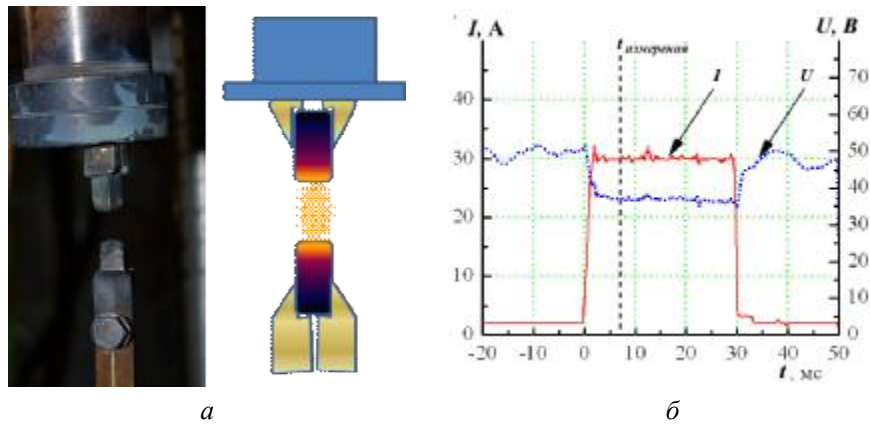


Рис. 1. Вид електродного вузла (а) та осцилограми імпульсів напруги та струму 30 А (б).

матеріалу включала змішування порошоків, пресування зразків та їх спікання при температурі 1200 °С у захисному середовищі впродовж 1 год. Ступеневі режими нагріву та охолодження сприяли запобіганню газонасиченості та ліквідації залишкової пористості матеріалу. З одержаних зразків вирізали штабики розмірами у перерізі 5x5 мм, які закріплювали у латунних гвинтових тримачах (рис. 1, а).

Електрична дуга запалювалась у проміжку довжиною 8 мм між неохолоджуваними електродами Cu—Cr—W у потоці аргону зі швидкістю 6,33 л/хв. Властивості плазми вивчали спектроскопічними методами у середньому перерізі стовпа дуги силою струму 3,5 або 30 А. З метою запобігання надмірного випаровування та електричної ерозії електродного матеріалу на постійний "черговий" струм 3,5 А накладали імпульси струму 30 А (рис. 1, б).

У роботі використано методику діагностики багатокомпонентної плазми з одночасною реєстрацією просторових розподілів інтенсивності в широкому спектральному діапазоні [3]. Для реєстрації спектральних ліній застосовували спектрометр з дифракційною ґраткою 600 штрихів/мм, який в комбінації з ПЗЗ-матрицею забезпечує зворотню дисперсію 0,06 нм/піксель та просторову роздільну здатність 0,07 мм/піксель у спектральному діапазоні 400—650 нм.

Температуру плазми визначали методом однократної томографічної реєстрації випромінювання спектральних ліній. Швидкісне сканування просторових розподілів інтенсивності випромінювання забезпечувала ПЗЗ-лінійка (В/В) Sony ILX526A з 3000 пікселів. Разом із спектральним приладом МДР-12 вона дозволяє виконувати записи радіального розподілу випромінювання у середньому перерізі розряду нестационарної дуги. Для керування процесом збирання та обробки експериментальних даних використовували спеціально розроблений програмний інтерфейс [4]. Оскільки досліджувана електрична дуга є нестабільною як у просторі, так і в часі, то проводили статистичну обробку експериментальних результатів.

Радіальні розподіли контурів спектральних ліній реєстрували на установці, оптична схема якої детально описана в роботі [5]. В цій

установці селекцію випромінювання плазми за певними кутами забезпечує інтерферометр Фабрі—Перо у режимі еталона, схрещений з приладом попередньої монохроматизації. Таким чином, вимірюючи ширину певного інтерференційного максимуму, можна визначити ширину спектральної лінії у відповідній просторовій точці плазмового об'єкта. Відповідний програмний інтерфейс дозволяє встановити розподіл електронної концентрації у розрядному каналі при умові, що ефект Доплера незначно впливає на розширення досліджуваної спектральної лінії у порівнянні з квадратичним ефектом Штарка.

## Результати та їх обговорення

### Аналіз спектра та визначення температури плазми

Зареєстрований спектр випромінювання плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—Cr—W показано на рис. 2. У спектрі спостерігались 35 ліній Cr I та 5 інтенсивних ліній Cu I. Спектральні лінії вольфраму практично відсутні, є лише слабка лінія W I 522,4 нм. Мала інтенсивність спектральних ліній вольфраму свідчить на користь невеликої кількості парів цього металу у плазмі.

Багатокомпонентна плазма з домішками металів потребує ретельного визначення спектральних ліній, які придатні для діагностики. Селекція спектральних ліній атома міді та їх спектроскопічних констант виконана у роботі [6]. Таким чином, для діагностики плазми залучено лінії Cu I: 510,5; 515,3; 521,8; 570,0; 578,2; 793,3 та 809,3 нм.

Особливістю спектрів Cr I є велика кількість близько розташованих спектральних ліній співвимірної інтенсивності. У випадку використання спектрального приладу з недостатньою роздільною здатністю такі лінії можуть бути зареєстровані як одна нерозділена лінія. Дослідження контурів спектрів хрому за допомогою комбінованого приладу високої роздільної здатності на основі інтерферометра Фабрі—Перо дозволило визначити спектральні лінії, що не зазнають перекриття. Додаткові дослідження контурів спектрів ліній показали, що у випадку композитного матеріалу мідь—хром лінії Cu I 427,5 та 465,1 нм перекриваються близько розташованими лініями хрому. Саме тому дані лінії міді не розглядалися для залучення в діагностиці.

В результаті селекції для діагностики плазми обрано лінії Cr I 435,18; 458,01; 464,62; 487,08; 532,83 та 540,98 нм, які добре ізольовані в спектрі та достатньо інтенсивні для реєстрації в умовах експерименту. Спектро-

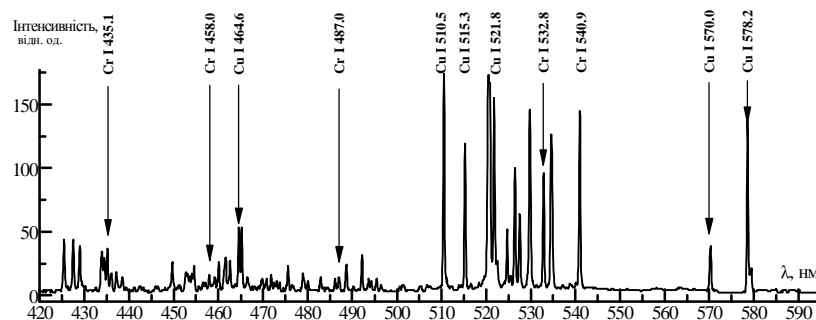


Рис. 2. Спектр випромінювання плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—Cr—W в потоці аргону.

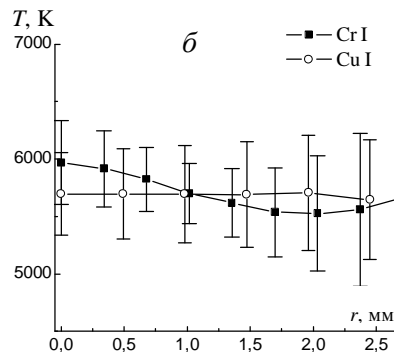
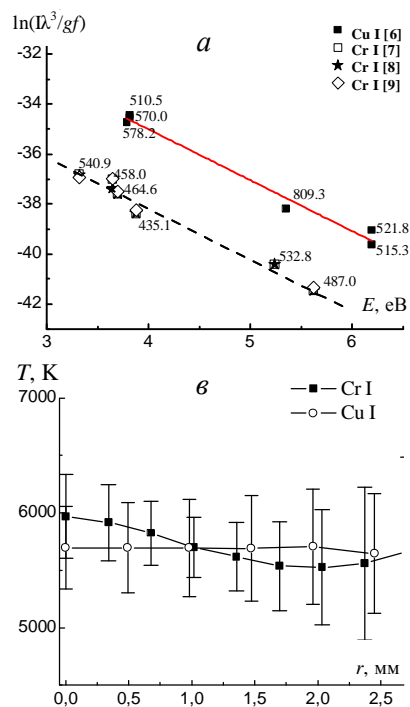


Рис. 3. Діаграма Больцмана для осьової точки (а) та радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між електродами Cu—Cr—W при силі струму 3,5 (б) та 30 А (в).

скопічні константи для даних ліній можуть бути отримані з бази даних [7] та оригінальних робіт [8, 9]. Як видно на рис. 3, а, константи з цих джерел відрізняються незначно. Єдина відмінність спостерігається для лінії 458,01 нм, для якої сила осцилятора з роботи [8] найкраще відповідає визначеному нахилу.

Слід зауважити, що нахили ліній на діаграмі Больцмана відповідають температурі плазми. Збіг цих нахилів, визначених за спектральними лініями різних елементів — міді та хрому, свідчить на користь припущення про локальну термодинамічну рівновагу. Радіальні розподіли температури для плазми електродугового розряду силою струму 3,5 та 30 А показано на рис. 3, б, в.

### Розрахунок компонентного складу плазми

Якщо плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, її можна описати системою рівнянь, яка в першу чергу залежить від сорту частинок, що перебувають в її об'ємі. Внаслідок термічної дії розряду на композитні електроди Cu—Cr—W в потоці аргону в плазмі будуть присутні атоми та іони аргону, міді та хрому. Як показали дослідження спектра (рис. 2), вміст домішки парів вольфраму у плазмі є досить незначним — через це даний компонент не враховувався при встановленні складу плазми.

Компонентний склад плазми електродугового розряду визначали, розв'язуючи систему рівнянь, яка складалась з трьох рівнянь Саха для елементів Ar, Cu і Cr, а також рівнянь електронейтральності та стану ідеального газу. Як додаткове рівняння використовували співвідношення між концентраціями атомів міді та хрому, визначене з інтенсивності спектральних ліній цих елементів. Вихідними параметрами для розв'язку системи рівнянь вибрано розподіли температури та електронної концентрації. Одержані радіальні профілі компонентного складу плазми пока-

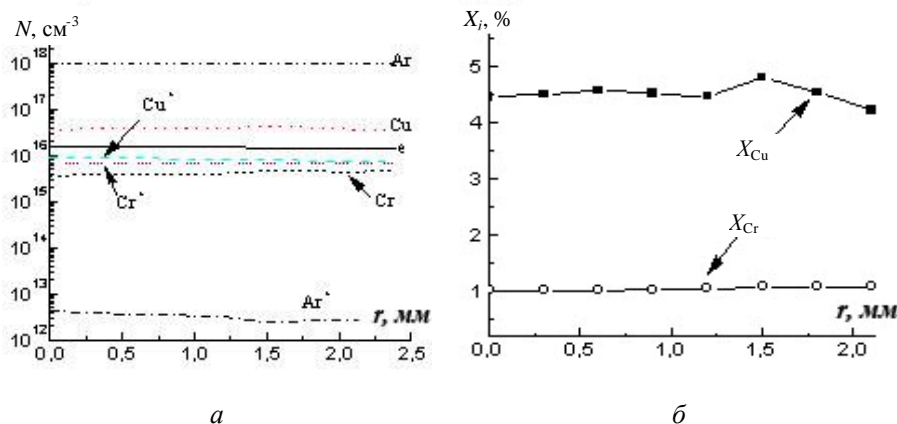


Рис. 4. Компонентний склад (а) та відносний вміст парів металів (б) у плазмі електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—Cr—W.

зано на рис. 4, а. Як бачимо, основним компонентом плазми є атомарний аргон. Для аналізу поведінки металевої домішки в плазмі доцільно побудувати радіальні розподіли вмісту міді та хрому (рис. 4, б):

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

Як видно на рис. 4, електропровідність каналу дуги забезпечується головним чином завдяки іонізації атомів міді та хрому. Внесок іонізації міді та хрому є порівняним із внеском міді, незважаючи на його меншу кількість.

#### Дослідження робочих поверхонь електродів

Поверхня електродів після випробувань мала чіткі ознаки ерозійного руйнування. Зокрема, на катоді виявлено значну кількість мікроратерів, які зливаються у макроратер в центральній частині, а на периферії формують трасуючі сліди (рис. 5, а). Це зумовлено інтенсивним викидом твердої та рідкої фаз та випаровуванням матеріалу і є наслідком утворення катодних плям та їх руху по поверхні матеріалу під впливом електричної дуги значної потужності. Поверхня анода має просторові області оплавлення, що є типовим результатом ерозійного переносу речовини з катода головним чином у рідкій фазі (рис. 5, б).

Робочий шар у перерізі електродів має структуру з чітко визначеною межею розділу, що суттєво відрізняється від вихідної структури матеріалу

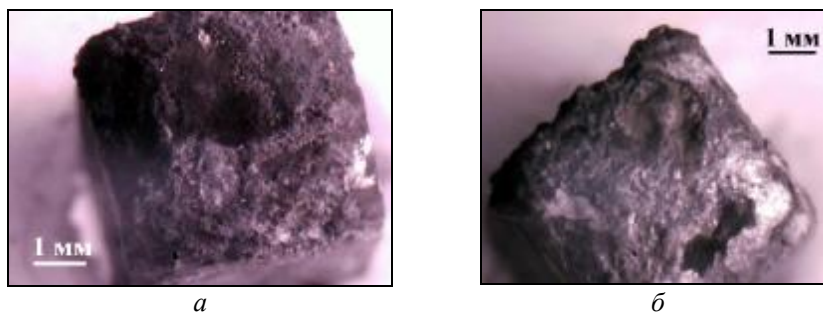


Рис. 5. Поверхні катода (а) та анода (б) після 30 імпульсів силою струму 30 А.

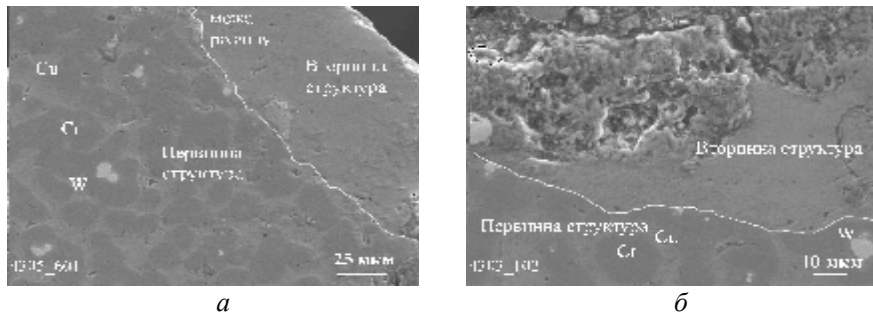


Рис. 6. Зрізи робочих поверхонь анода (*a*) та катода (*б*) з матеріалу Cu—Cr—W після 30 імпульсів силою струму 30 А (межа розділу між вторинною та первинною структурами позначена білою лінією).

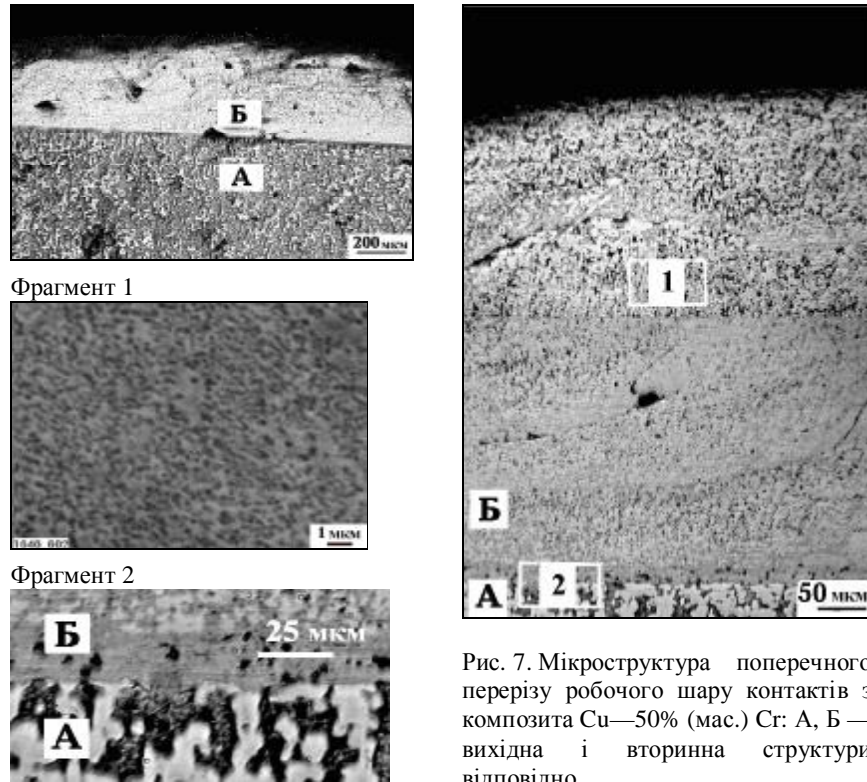


Рис. 7. Мікроструктура поперечного перерізу робочого шару контактів з композита Cu—50% (мас.) Cr: А, Б — вихідна і вторинна структури відповідно.

(рис. 6, *a*). Вторинна структура складається з дисперсних частинок хрому розміром  $\leq 1$  мкм, диспергованих у мідній матриці. Незначна кількість вольфрамових зерен у вторинній структурі свідчить про малий вплив цього металу на характер ерозійних змін поверхні електродів. Це підтверджується також практично його відсутністю у спектрі плазми (див. рис. 2). В цілому характер ерозії електродів є подібним до змін структури робочого шару дугогасильних вакуумних контактів із композитів Cr—Cu після стендових випробувань у промисловій вакуумній камері КДВХ-10-20/1600 при циклічному відключенні в режимі змінного струму 20 кА частотою 50 Гц при напрузі 10 кВ (згідно з ГОСТ 687-78, п. 7.6 — "испытания на коммутационную способность") [10]. Проведені

дослідження мікроструктурних змін поверхні контактів показали, що під впливом дуги в їх робочому шарі відбуваються незворотні структурні зміни і формування вторинної структури інших будови і дисперсності в порівнянні з вихідною структурою. Вторинна структура щільно прилягає до вихідної і складається в основному з дискретних гетерофазних шарів, у яких сферичні частинки розмірами 0,1—1 мкм займають до 50% об'єму (рис. 7). Це дає можливість використовувати умови експерименту для вивчення особливостей розвитку дуги та прогнозування ерозійних процесів контактів на попередньому етапі досліджень до проведення масштабних стендових випробувань.

### Висновки

Визначено та рекомендовано спектральні лінії атома хрому та їх спектроскопічні константи для діагностики плазми електродугового розряду з домішкою міді та хрому.

Розрахунок компонентного складу плазми вказує, що хром у порівнянні з міддю виконує роль тугоплавкого компонента і в меншій мірі потрапляє у плазму електродугового розряду. В той же час іонізація атомів хрому, незважаючи на його менший вміст, вносить значний внесок у провідність розрядного каналу. Вплив домішки вольфраму на властивості вторинної структури робочого шару та властивості плазми розряду незначний.

Мікроскопічні дослідження електродів вказують на формування в робочому шарі електродів вторинної структури з чітко визначеною межею розділу, що суттєво відрізняється від вихідної структури матеріалу. Подібність структурних змін в матеріалі під впливом дуги в умовах експерименту та стендових випробувань у промисловій вакуумній камері дає можливість використовувати дані умови для вивчення особливостей розвитку дуги та прогнозування ерозійних процесів контактів на попередньому етапі досліджень до проведення масштабних стендових випробувань.

1. *Chapelle P.* Plasma diagnostic by emission spectroscopy during vacuum arc remelting / [P. Chapelle, T. Czerwiec, J. P. Bellot et al.] // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2002. — **11**. — P. 301—308.
2. *Shumaker J. B.* A study of equilibrium in argon arcs / J. B. Shumaker, C. H. Poppenoe // *J. of Research of National Bureau of Standards.* — A. Phys. and Chem. — 1972. — **76A**, No. 2. — P. 71—76.
3. *Veklich A.* Technique of electric arc discharge plasma diagnostic: peculiarities of registration and treatment of spectra / A. Veklich, A. Lebid // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка.* — 2012. — Вип. 18. — С. 6—9.
4. *Веклич А. М.* Методика спектроскопічної діагностики плазми електричної дуги / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Там же. — 2003. — Вип. 5. — С. 12—14.
5. *Веклич А. М.* Визначення електронної концентрації в плазмі електродугового розряду / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фіз.-мат. науки.* — 2004. — Вип. 2. — С. 428—435.
6. *Бабіч І. Л.* Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO / [І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич та ін.] // *Электрические контакты и электроды.* — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. — С. 82—115.

7. *NIST Atomic Spectra Database* [Online]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. — accessed may 30, 2013. — [http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).
8. *Younger S. M.* Atomic transition for vanadium, chromium, and manganese / [S. M. Younger, J. R. Fuhr, G. A. Martin, W. L. Wiese] // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1978. — 7, No. 2. — P. 495—629.
9. *Sobeck J. S.* Improved laboratory transition probabilities for neutral chromium and redetermination of the chromium abundance for the sun and three stars / J. S. Sobeck, J. E. Lawler, C. Sneden // *The Astrophysical J.* — 2007. — 667. — P. 1267—1282.
10. *Хоменко Е. В.* Оптимизация структуры, свойств и условий изготовления Cr—Cu композиций для вакуумных дугогасительных контактов с повышенной электроэрозионной стойкостью: Дис. ... канд. техн. наук, Киев, 2007. — 165 с.

### **Исследования плазмы электродугового разряда с примесью меди и хрома**

А. Н. Веклич, А. В. Лебедь, А. А. Сирык, Е. В. Хоменко

*Исследована плазма электродугового разряда в потоке аргона между электродами из композита Cu—Cr—W, изготовленного по технологии порошковой металлургии. Методами оптической эмиссионной спектроскопии получены радиальные распределения температуры и электронной концентрации для токов 3,5 и 30 А. Данные экспериментальные результаты использованы для расчета состава плазмы в предположении локального термодинамического равновесия. Исследованы структурные изменения электродов под действием дуги и установлено их подобие структурным изменениям в рабочем слое контактов после стеновых испытаний промышленной дугогасительной вакуумной камеры.*

**Ключевые слова:** плазма электродугового разряда, композиты Cu—Cr, эрозия.

### **Studies of electric arc discharge plasma with addition of copper and chrome**

A. M. Veklich, A. V. Lebid, O. O. Siryk, O. V. Khomenko

*This paper investigates the plasma arc discharge in argon flow between the electrodes of the composite Cu—Cr—W, produced by powder metallurgy techniques. By optical emission spectroscopy obtained radial distributions of temperature and electron density for the current 3,5 and 30 A. These experimental results are used to calculate the composition of the plasma in the assumption of local thermodynamic equilibrium. Structural changes in electrodes' working layer were studied. Similarity of the changes in this study and in switching contacts of industrial vacuum chamber were found.*

**Keywords:** plasma arc discharge, composites Cu—Cr, erosion.