Лебідь Антон Валерійович. Назва дисертаційної роботи: "СПЕКТРОСКОПІЯ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ МІЖ КОМПОЗИТНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВІ МІДІ"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

Лебідь Антон Валерійович

УДК 533.9

СПЕКТРОСКОПІЯ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ МІЖ

КОМПОЗИТНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВІ МІДІ

01.04.08 – фізика плазми

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук.

Науковий керівник

Веклич Анатолій Миколайович

доктор фізико-математичних наук, доцент

Київ – 2015

2

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів ................ 6

Вступ............................................................................................................................. 7

Розділ 1. Плазма електродугового розряду з домішками парів металів.............. 15

1.1. Вплив домішки парів металів на властивості плазми .................................... 15

1.1.1. Вплив парів металу на електропровідність та радіаційні втрати енергії

плазми електродугового розряду............................................................................. 15

1.1.2. Вплив парів металу на теплопровідність та в’язкість плазми

електродугового розряду.......................................................................................... 19

1.2. Термодинамічний стан плазми електродугового розряду з домішкою парів

металів ........................................................................................................................ 21

1.2.1. Умова існування стану локальної термодинамічної рівноваги.................. 22

1.2.2. Неізотермічність плазми ................................................................................ 24

1.2.3. Експериментальна перевірка існування стану ЛТР у плазмі електродугових розрядів........................................................................................................ 26

1.3. Дослідження плазми електродугового розряду між композитними

електродами ............................................................................................................... 30

1.3.1. Композитні матеріали на основі срібла ........................................................ 30

1.3.2. Композитні матеріали на основі міді ............................................................ 31

Висновки до розділу 1 .............................................................................................. 36

Розділ 2. Визначення параметрів плазми електродугового розряду з домішками

парів металів .............................................................................................................. 38

2.1. Конструкція плазмового джерела..................................................................... 38

2.2. Методика ОЕС з послідовною реєстрацією просторових розподілів

інтенсивності спектральних ліній ........................................................................... 40

3

2.2.1. Реєстрація просторових розподілів інтенсивності спектральних ліній .... 40

2.2.2. Узгодження інтенсивності випромінювання і вихідного сигналу ПЗЗ ..... 41

2.2.3. Обробка просторових розподілів інтенсивності спектральних ліній........ 43

2.3. Методика ОЕС з одночасною реєстрацією просторових розподілів

інтенсивності випромінювання в широкому спектральному діапазоні .............. 43

2.3.1. Реєстрація просторових розподілів інтенсивності випромінювання в

широкому спектральному діапазоні........................................................................ 44

2.3.2. Аналіз цифрових зображень спектра та визначення спектральної

чутливості установки................................................................................................ 46

2.3.3. Визначення локальних значень випромінювальної здатності плазми ...... 51

2.3.4. Оцінка похибки, спричиненої перетворенням даних.................................. 55

2.3.5. Порівняння результатів, отриманих за різними методиками діагностики

плазми......................................................................................................................... 56

2.4. Методика визначення електронної концентрації у плазмі ............................ 60

2.4.1. Реєстрація контурів спектральних ліній....................................................... 61

2.4.2. Програмний інтерфейс для визначення просторових розподілів

концентрації електронів ........................................................................................... 64

2.4.3. Оцінка похибки визначення концентрації електронів в плазмі ................. 65

2.5. Методика лазерної абсорбційної спектроскопії плазми електродугового

розряду........................................................................................................................ 66

2.5.1. Схема експерименту для лазерної абсорбційної спектроскопії................. 67

2.5.2. Визначення концентрації домішки міді у плазмі за її поглинальними

характеристиками...................................................................................................... 68

2.5.3. Графічний інтерфейс користувача для визначення поглинальних

характеристик плазми............................................................................................... 71

2.5.4. Оцінка похибки визначення концентрації парів міді у плазмі................... 72

4

Висновки до розділу 2 .............................................................................................. 74

Розділ 3. Особливості діагностики плазми електродугового розряду з

домішками парів металів.......................................................................................... 75

3.1. Вимоги до застосування спектральних ліній для діагностики плазми......... 75

3.2. Діагностика плазми електродугового розряду з домішкою парів

молібдену ................................................................................................................... 76

3.2.1. Селекція спектральних ліній атомів молібдену........................................... 76

3.2.2. Селекція спектроскопічних констант для ліній атомів молібдену ............ 78

3.2.3. Формування кристалів MoO3 в електродуговому джерелі плазми............ 83

3.3 Діагностика плазми електродугового розряду з домішкою парів

вольфраму .................................................................................................................. 89

3.3.1. Селекція спектральних ліній атомів вольфраму.......................................... 90

3.3.2. Визначення температури плазми електродугового розряду між

композитними електродами мідь-вольфрам .......................................................... 93

3.4. Діагностика плазми електродугового розряду з домішкою парів хрому..... 95

3.4.1. Селекція спектральних ліній атому хрому................................................... 96

3.4.2. Селекція спектроскопічних констант для ліній атомів хрому ................... 96

Висновки до розділу 3 ............................................................................................ 100

Розділ 4. Аналіз властивостей плазми електродугового розряду між

композитними Cu-Mo електродами ...................................................................... 101

4.1. Математична модель електродугової плазми, яка перебуває в стані ЛТР. 100

4.1.1. Розрахунок компонентного складу плазми електродугового розряду з

домішками парів металів........................................................................................ 101

4.1.2. Розрахунок електронної концентрації в плазмі при силі струму 3,5А.... 101

5

4.2. Дослідження плазми електродугового розряду між композитними мідьмолібденовими електродами, виготовленими методами порошкової

металургії ................................................................................................................ 104

4.2.1. Параметри та компонентний склад плазми електродугового розряду між

композитними Cu-Mo та Cu-Mo-LaB6 електродами............................................ 104

4.2.2. Дослідження робочого шару композитних Cu-Mo та Cu-Mo-LaB6

електродів................................................................................................................. 109

4.3. Дослідження плазми електродугового розряду між композитними Cu-Mo

електродами, виготовленими за методикою електронно-променевого

випаровування з подальшою конденсацією у вакуумі........................................ 110

4.3.1. Параметри та компонентний склад плазми електродугового розряду.... 110

4.3.2. Дослідження робочого шару композитних Cu-Mo електродів,

виготовлених за технологією електронно-променевого випаровування з

подальшою конденсацією у вакуумі ..................................................................... 114

Висновки до розділу 4 ............................................................................................ 116

Висновки .................................................................................................................. 117

Список використаних джерел ................................................................................ 119

6

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,

СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЛАС – лазерна абсорбційна спектроскопія;

ЛТР – локальна термодинамічна рівновага;

ОЕС – оптична емісійна спектроскопія;

ПЗЗ – прилад з зарядовим зв’язком;

ЧЛТР – часткова локальна термодинамічна рівновага.

7

ВСТУП

Актуальність теми. Дослідження властивостей плазми електродугового

розряду з домішками металів привертають увагу дослідників, як з точки зору

вирішення фундаментальних проблем фізики плазми, так і з точки зору великої

кількості прикладних задач. Як відомо, процеси електродугового зварювання та

різання, плазмової обробки поверхні, робота дугових джерел світла, а також

комутація струму в електричних апаратах [1,2] супроводжуються інтенсивним

випаровуванням матеріалів деталей та електродів. Окремим новим напрямом

використання плазми електричної дуги є генерація наночастинок [3]. Усі ці

застосування потребують розробки методик діагностики плазми розрядів з

домішками парів металів.

Відомо, що при комутації електричних кіл виникає дуговий розряд, який

спричиняє ерозію матеріалу контактів, що призводить до зменшення терміну

експлуатації перемикачів, контакторів, тощо. Саме через цю обставину, значний

інтерес представляє вивчення фізичних процесів, які мають місце у плазмових

середовищах та на робочих поверхнях контактів таких пристроїв під час

комутації.

Поєднання у композитних матеріалах компоненти з високою температурою

плавлення (вольфрам, молібден, хром) та компоненти з високою

електропровідністю (мідь) дозволяє отримувати високі експлуатаційні

характеристики таких матеріалів в умовах дії електричної дуги. Результати

досліджень плазми електричної дуги з домішками парів металів електродного

походження дають можливість покращити ерозійну стійкість електродів за

рахунок оптимізації складу матеріалу та розробки нових технологій їх

виготовлення.

Саме цим пояснюється актуальність вирішення наукової задачі розробки

методів діагностики плазми з домішками парів металів та дослідження ролі

8

металічних домішок у плазмі електродугового розряду між композитними

електродами на основі міді.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до тематики досліджень, що

проводились на радіофізичному факультеті Київського національного

університету імені Тараса Шевченка, в рамках виконання планових бюджетних

науково-дослідних робіт: "Фундаментальні основи новітніх та

ресурсозберігаючих технологій на основі радіофізики та електроніки", №

державної реєстрації 0106U006625, 2006–2010 рр.; "Фундаментальні процеси в

лабораторній та космічній плазмі", № державної реєстрації 0111U006169,

2011–2015 рр.; комплексної програми НАН України "Перспективні

дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових

технологій" (Постанова Президії НАН України №115 від 18.09.2013),

2014-2016 рр.; договір про творчу співдружність між Інститутом проблем

матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України та Київським

національним університетом імені Тараса Шевченка, 2011–2014 рр.

Мета і задачі досліджень. Метою даної роботи є розробка методик

спектроскопії плазми з домішками парів металів та дослідження ролі металічної

домішки у плазмі електродугового розряду між композитними електродами на

основі міді. Для досягнення цієї мети сформульовано такі задачі:

- розробити методику діагностики плазми з одночасною реєстрацією

просторових розподілів інтенсивності випромінювання спектральних ліній у

широкому діапазоні довжин хвиль;

- виконати селекцію спектральних ліній вольфраму, молібдену і хрому та

відповідних спектроскопічних констант, які можуть бути використані для

діагностики плазми електродугового розряду між композитними електродами;

- визначити радіальні розподіли параметрів плазми (температури та

електронної концентрації) електродугового розряду між композитними

електродами у потоці аргону та розрахувати її компонентний склад;

9

- дослідити властивості плазми електродугового розряду між

молібденовими електродами;

- дослідити вплив домішки гексабориду лантану і технології виготовлення

композитних матеріалів на властивості плазми електродугового розряду та

ерозійну стійкість електродів.

Об’єкт досліджень – фізичні процеси, що обумовлюють стан плазми

електродугового розряду з домішками парів металів у потоці аргону.

Предмет досліджень – плазма електродугового розряду між

композитними електродами у потоці газу.

Методи досліджень: для діагностики плазми електродугового розряду між

композитними електродами на основі міді використовували комплексну

методику, що включає в себе методи оптичної емісійної спектроскопії (ОЕС), у

тому числі з одночасною реєстрацією просторових розподілів інтенсивності

спектральних ліній в широкому діапазоні довжин хвиль. Температуру плазми

визначали за допомогою методу діаграм Больцмана із залученням інтенсивності

спектральних ліній атомів компонент плазми. Електронну концентрацію при

силі струму 3,5 А визначали зі співвідношення інтенсивностей спектральних

ліній, а при силі струму 30 А – із півширини спектральних ліній, для яких

домінуючим механізмом розширення є квадратичний ефект Штарка. Результати

розрахунку компонентного складу плазми перевірялись за допомогою

незалежної методики лінійної лазерної абсорбційної спектроскопії (ЛАС).

Поверхні робочих шарів електродів та отримані кристали триоксиду молібдену

досліджувались методами оптичної мікроскопії.

Обґрунтованість та достовірність результатів і висновків.

Достовірність наукових висновків та результатів дисертаційної роботи

забезпечується використанням сучасних надійних оптичних методів

діагностики, теоретичним та експериментальним обґрунтуванням умов їх

застосування, оцінками похибок вимірювань параметрів плазми, а також

взаємоузгодженням результатів, отриманих із застосуванням різних незалежних

експериментальних методик.

10

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні

закономірностей, які визначають властивості плазми електродугового розряду

між композитними електродами на основі міді та у розробці оригінальних

методик діагностики такої плазми.

- Розроблено оригінальну методику оптичної емісійної спектроскопії

плазми електродугового розряду з одночасною реєстрацією просторових

розподілів інтенсивності спектральних ліній у широкому діапазоні довжин

хвиль та відповідний програмний інтерфейс.

- Отримала подальший розвиток методика діагностики плазми

електродугового розряду між композитними електродами на основі міді. На

основі аналізу спектрів випромінювання та заселеності енергетичних рівнів

атомів металів на діаграмах Больцмана визначені та рекомендовані для

діагностики плазми спектральні лінії і відповідні значення спектроскопічних

констант атомів W, Mo та Cr.

- Вперше досліджено формування кристалів триоксиду молібдену у

джерелі електродугової плазми атмосферного тиску. Встановлено основні стадії

формування, хімічний склад та властивості кристалів, утворених в даному

джерелі.

- Виявлено ефект підвищення температури плазми електродугового

розряду між композитними Cu-Mo електродами з додаванням гексабориду

лантану LaB6. Це зумовлюється обмеженням кількості металів у плазмі

внаслідок зміцнення робочої поверхні композитного матеріалу під дією

розряду.

- Вперше встановлено параметри та компонентний склад плазми

електродугового розряду між композитними Cu-Mo електродами,

виготовленими методом електронно-променевого випаровування з подальшою

конденсацією у вакуумі. Показано, що композитні матеріали, виготовлені в

такий спосіб, забезпечують кращі ерозійні властивості в умовах дії електричної

дуги, ніж композити, отримані за традиційною порошковою технологією.

11

- Удосконалено методику лазерної абсорбційної спектроскопії плазми

електродугового розряду. Зокрема, реалізований комплекс апаратнопрограмних засобів цієї методики дозволив перевірити результати оптичної

емісійної спектроскопії та підтвердити припущення про стан локальної

термодинамічної рівноваги плазми електродугового розряду між композитними

Cu-Mo електродами в потоці аргону у середньому перерізі розрядного

проміжку 8 мм.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика

спектроскопії плазми електродугового розряду з одночасною реєстрацією

просторових розподілів інтенсивності спектральних ліній у широкому діапазоні

довжин хвиль та програмний інтерфейс до неї, можуть бути використані для

діагностики плазми електродугових та іскрових розрядів.

Рекомендовані спектральні ліній MoI, WI, CrI та їх спектроскопічні

константи можуть використовуватись для діагностики плазми з домішками

парів цих металів.

Кристали триоксиду молібдену, виготовлені у запропонованому

плазмовому джерелі, являють інтерес як перспективний матеріал для катодів

літій-іонних батарей, як каталізатор реакцій перетворення вуглеводнів та

матеріал для газових сенсорів.

Розроблений підхід дозволяє оцінити ефективність методів підвищення

стійкості композитних матеріалів на основі міді в умовах дії електродугового

розряду, зокрема у комутуючій апаратурі. Врахування результатів розроблених

методик дозволяє оптимізувати склад, структуру та технологію виготовлення

таких матеріалів.

Результати селекції спектральних ліній вольфраму та відповідних

спектроскопічних констант можуть бути використані для діагностики важких

домішок, які можуть надходити до об’єму утримання плазми в пристроях

керованого термоядерного синтезу (магнітні пастки різної конфігурації), а

також для оцінки ерозійної стійкості елементів конструкції, які

12

контактуватимуть з плазмою в термоядерному реакторі (зокрема, дивертора

ІТЕR, першої стінки та дивертора DEMO).

Особистий внесок здобувача. Автор брав безпосередню участь у

підготовці і проведенні всіх експериментальних досліджень, результати яких

покладено в основу дисертації, брав участь у постановці задачі, здійснював

обробку, порівняльний аналіз та інтерпретацію одержаних експериментальних

даних. Робота містить теоретичні та методичні положення і висновки,

сформульовані дисертантом особисто.

Дисертанту належить основний внесок у підготовці та написанні наукових

статей [4-9] і доповідей, опублікованих за темою дисертації.

У роботі [4] автор особисто розробив методику діагностики плазми

електродугового розряду з одночасною реєстрацією просторових розподілів

інтенсивності спектральних ліній в широкому діапазоні довжин хвиль.

У роботі [5] автор використав розроблену методику для дослідження

плазми електродугового розряду між композитними Cu-Mo та Cu-W

електродами в потоці аргону. На основі виконаного автором аналізу спектру та

діаграм Больцмана рекомендовано перелік спектральних лінії атомів молібдену

та вольфраму, придатних для діагностики плазми з домішками цих елементів.

У роботі [6] автор виконував дослідження плазми електродугового розряду

між композитними Cu-Mo та Cu-Mo-LaB6 електродами в потоці аргону.

Експериментально отримані просторові розподіли температури, електронної

концентрації та співвідношення між компонентами плазми використано як

вхідні параметри для математичної моделі плазми в стані ЛТР. Розраховано

компонентний склад плазми та вміст парів металів. Показано, що наявність

домішки гексабориду лантану в матеріалі електрода призводить до покращення

ерозійної стійкості композитного матеріалу.

У роботі [7] автор дослідив плазму розряду між композитними Cu-Mo

електродами, виготовленими за технологією електронно-променевого

випаровування з подальшою конденсацією у вакуумі. В ході роботи визначено

радіальні розподіли температури та електронної концентрації в плазмі, на

13

основі цих розподілів розраховано компонентний склад плазми. Показано, що

використання таких матеріалів для електродів забезпечує зменшення вмісту

парів металів у плазмі.

У роботі [8] автором реалізовано методику лінійної лазерної абсорбційної

спектроскопії для дослідження плазми електродугового розряду з домішкою

парів атомів міді. Для реєстрації та обробки експериментальних даних

розроблено оригінальний програмний інтерфейс. В ході цієї роботи

встановлено просторовий розподіл заселеності енергетичного рівня міді, що

дозволило перевірити результати розрахунку складу плазми, виконані на основі

даних оптичної емісійної спектроскопії. Таким чином доведено існування стану

ЛТР у плазмі електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними

Cu-Mo електродами в потоці аргону у середньому перерізі розрядного

проміжку 8 мм

У роботі [9] автором запропоновано спосіб отримання кристалів триоксиду

молібдену в джерелі електродугової плазми. Автор розглянув основні стадії

процесу формування кристалів та пропонує пояснення цих стадій. Виконані

автором дослідження плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між

молібденовими електродами вказують, що температура плазми на осі

середнього перерізу розрядного проміжку складає 8000 К.

Апробація результатів дисертації. Усі методики і результати досліджень

плазми електродугового розряду з домішками парів металів опубліковані в

друкованих матеріалах наукових конференцій. Результати дисертаційної

роботи, доповідались на конференціях:

International Interdisciplinary Yong Scientists’ Conference “Shevchenkivska

vesna” (Kiyv, 2011);

Міжнародна конференція "Електричні контакти і електроди (Кацівелі,

Україна, 2011);

Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного

синтезу (Київ, 2011);

14

International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion

(Alushta, Ukraine, 2012);

VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (Minsk,

Belarus, 2012);

31st International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Granada, Spain,

2013);

XXth Symposium on Physics of Switching Arc (Nové Město na Moravě, Czech

Republic, 2013);

Міжнародна конференція "Електричні контакти і електроди (Кацівелі,

Україна, 2013).

High-Tech Plasma Processes Conference (Toulouse, France, 2014)

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 роботах: 6

статтях у фахових наукових журналах, а також, 11 тезах та працях за

матеріалами доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з

вступу, чотирьох розділів основного тексту з 77 рисунками, висновків й списку

використаних джерел з 97 найменувань. Повний обсяг дисертації складає 130

сторінок, у тому числі список використаних літературних джерел займає 12

сторінок

ВИСНОВКИ

Вдисертаційнійроботізапропонованоновевирішеннязадачідіагностики

плазмиелектродуговогорозрядуміжкомпозитнимиелектродаминаосновіміді

методамиоптичноїспектроскопії

Основнінауковірезультатиполягаютьунаступному

Розробленокомплексапаратнопрограмнихзасобівдіагностикиплазми

якийдозволяєреалізуватиодночаснуреєстраціюрадіальнихрозподілів

інтенсивностівипромінюваннявширокомуспектральномудіапазоні

нмтавиконатиїхподальшуобробку

Експериментальновстановленощоплазмаелектродуговогорозряду

силоюАміжкомпозитнимиелектродамивпотоціаргонуу

середньомуперерізірозрядногопроміжкуммперебуваєулокальній

термодинамічнійрівновазіПорівняннявмістудомішокметалівуплазмі

розрядівміжкомпозитнимиелектродамивиготовленимизарізними

технологіямивказуєнасуттєвурольструктуриматеріалуШаруватаструктура

електродіввиготовленихзаелектроннопроменевоютехнологієюзабезпечує

кращуерозійнустійкістьупорівняннізелектродамивиготовленимиметодами

порошковоїметалургії

Встановленощонаявністьдомішкигексаборидулантанув

композитномуматеріаліелектродапризводитьдозбільшення

температуриплазмиЦейефектпояснюєтьсязменшеннямвмістудомішкипарів

металівуплазмівнаслідокспіканнятазміцненняробочоїповерхні

композитногоматеріалупіддієютепловогополядуговогорозряду

Металографічнідослідженнявказуютьщонаявністьдомішкигексабориду

лантанувматеріаліелектродапризводитьдозначногозменшеннякількості

рідкоїфазинаробочійповерхнікомпозитногоелектродапідчасгоріння

розряду

Реалізованаметодикаспектроскопічноїдіагностикиплазми

електродуговогорозрядуздомішкамипаріввольфрамумолібденутахромуНа



основіаналізуспектріввипромінюванняішляхомпорівняннязаселеності

енергетичнихрівніватоміврізнихметалівнадіаграмахБольцманавизначеніта

рекомендованідлядіагностикиплазмиспектральнілініїівідповіднізначення

спектроскопічнихконстантатомівта

Запропонованооригінальнийспосіботриманнякристалівтриоксиду

молібденувджереліелектродуговоїплазмиприатмосферномутиску

Формуваннякристалівαвідбуваєтьсяпереважнонабічнійповерхні

молібденовогоелектродапідвпливомтермічноїдіїрозрядутаконвективних

потоківоточуючогогазуТемператураплазминаосісередньогоперерізудуги

силоюструмуАскладаєК