

Особливості електродугового розряду між композитними електродами $Cu-C$

А. М. Веклич, С. О. Фесенко, Л. О. Крячко*,
В. Ф. Борецький, М. М. Клешич, М. Є. Головкова

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
e-mail: van@univ.kiev.ua

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: 29min@ipms.kiev.ua

Досліджено параметри плазми електродугового розряду між композитними електродами $Cu-C$. Значну увагу приділено розробленій методиці визначення електронної концентрації плазми. На основі результатів металографічних досліджень поверхні запропоновано механізм руйнування електродів.

Ключові слова: дуговий розряд, електронна концентрація, напруженість електричного поля, електроерозія.

Вступ

Ковзний електричний контакт набув широкого застосування в колекторних двигунах, генераторах, електропотягах тощо. В таких пристроях зазвичай використовується контактна пара мідь—графіт або мідь—мідно-графітовий композит [1]. Особливістю цього типу контактів є значна ерозія внаслідок виникнення іскріння (в деяких випадках електричної дуги) між парою тертя. Природно, за вмістом матеріалу електродного походження у розрядній плазмі можна зробити висновки про ступінь руйнування електродів. Одним із важливих параметрів плазми для такої оцінки є електронна концентрація [2]. Крім того, інтенсивність електроерозійних процесів слід оцінювати із результатів металографічних досліджень. Отже, метою даної роботи є визначення електронної концентрації плазми електричної дуги між композитними електродами $Cu-C$ та дослідження зміни стану їх робочої поверхні внаслідок дії електродугового розряду.

Експериментальна установка

Досліджуваний дуговий розряд (“електродний вузол” на рис. 1) запалювався між вертикально розташованими електродами циліндричної форми діаметром 6 мм. Верхній електрод — катод, нижній, відповідно, — анод. Електродуговий розряд підтримувався стаціонарним струмом 3,5 А, на який за необхідності накладався імпульс 26,5 А. Така конфігурація дозволила проводити дослідження плазми електродугового розряду з амплітудою струму 30 А без суттєвого оплавлення електродів. Над верхнім електродом розміщено сопло на відстані 10 мм від краю електрода, яке за необхідності дозволяє обдувати електродуговий розряд потоком газу. Густина потужності випромінювання оцінювали оптичними

© А. М. Веклич, С. О. Фесенко, Л. О. Крячко, В. Ф. Борецький,
М. М. Клешич, М. Є. Головкова, 2016

методами із залученням результатів вимірювання концентрації атомів міді за допомогою лазерної абсорбційної спектроскопії [3]. На першому етапі для визначення напруженості електричного поля вимірювали напругу дуги при різних міжелектродних відстанях [4]. Проте в результаті плавлення електродів за час вимірювання подібним методом можуть суттєво змінитися параметри розряду та міжелектродна відстань. Оскільки для вимірювання одного значення напруженості електричного поля необхідно здійснити кілька вимірювань напруги дуги при різних міжелектродних відстанях, напруженість поля визначати в такий спосіб у режимі реального часу неможливо. Задля усунення згаданих недоліків авторами розроблено альтернативну методику, яка ґрунтується на модуляції міжелектродної відстані зі сталою частотою та амплітудою. З цією метою катод закріплювали нерухомо, а анод встановлювали на спеціально розроблений пристрій — електромеханічний модулятор.

Принцип роботи електромеханічного модулятора

Електромеханічний модулятор (рис. 1) використовується для періодичної зміни міжелектродної відстані за гармонічним законом. Обертальний рух валу двигуна 1 перетворюється в зворотно-поступальний рух штока 10 за допомогою кривошипно-шатунного механізму. Його основою є муфта 4, яка одним боком жорстко закріплена на валу двигуна, а з іншого боку має ексцентрично запресовану вальницю кочення, куди входить один кінець шатуна. Інший кінець шатуна шарнірно з'єднаний із штоком 10 за

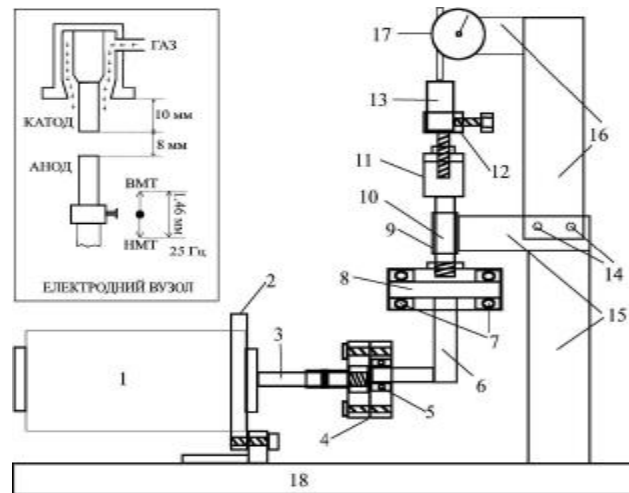


Рис. 1. Схема електродного вузла та електромеханічного модулятора зі встановленим індикатором годинникового типу для вимірювання амплітуди коливань: 1 — двигун; 2 — фланець; 3 — вал двигуна; 4 — муфта; 5 — вальниця кочення; 6 — шатун; 7 — вальниця кочення; 8 — вісь; 9 — напрямна втулка штока; 10 — шток; 11 — гайка для регулювання висоти електрода; 12 — тримач електрода; 13 — електрод; 14 — кріплення кронштейна; 15 — стійка; 16 — кронштейн; 17 — індикатор годинникового типу; 18 — основа.

допомогою вальниць 7 та вісі 8. Це дозволяє компенсувати коливальний рух шатуна у напрямку, перпендикулярному до вісей двигуна та шатуна. Шток підтримується у вертикальному положенні за допомогою напрямної втулки 9. Тримач електрода 12 з'єднаний зі штоком за допомогою гайки 11, яка дає можливість регулювати висоту нижнього електрода. Для вимірювання амплітуди зворотно-поступальних коливань на стійку 15 кріпиться індикатор годинникового типу 17 за допомогою кронштейна 16. Він дозволяє з високою точністю виміряти відстань від нижньої мертвої точки (НМТ) до верхньої мертвої точки (ВМТ), яка становить 1,46 мм. Отже, амплітуда коливань електрода складає $0,73 \pm 0,01$ мм. Використаний в установці двигун — синхронного типу марки ДС-10-1500-УХЛ4, має частоту обертів 1500 об/хв, яка залежить від частоти електромережі. Згідно зі стандартом ГОСТ 13109-97, вона впродовж 95% часу експлуатації не відхиляється від норми понад 0,4%, тому частота коливань електрода 13 перебуває в межах $25 \pm 0,1$ Гц впродовж 95% часу. Слід зауважити, що отримані механічні коливання мають ступінь ангармонізму порядку r/l , де r — ексцентричність кривошипного механізму; l — довжина шатуна. Для розробленої експериментальної установки ангармонізм механічних коливань не перевищує 1%.

Визначення напруженості електричного поля

Внаслідок періодичної зміни міжелектродної відстані у спектрі напруги дуги з'являється гармоніка з частотою вібрації та амплітудою, що дорівнює добутку напруженості поля на амплітуду механічних коливань електрода. Згадана напруженість характеризує, в першу чергу, область позитивного стовпа. Отже, виділивши амплітуду цієї гармоніки, можна визначити напруженість поля з часовою роздільною здатністю порядку періоду коливань ($\tau \sim 40$ мс).

Для часів спостереження порядку хвилин можна вважати, що напруженість вимірюється у режимі реального часу. Виділення гармоніки напруги дуги частотою 25 Гц здійснюється у два етапи. Спочатку сигнал пропускається крізь смуговий фільтр другого порядку, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) якого зображена на рис. 2. Напруга з виходу фільтра надходить на один з входів двоканального осцилографа USB. На інший вхід з необхідним коефіцієнтом ослаблення подається напруга дуги. Оцифрована з розрядністю 8 біт напруга передається до персонального комп'ютера (ПК).

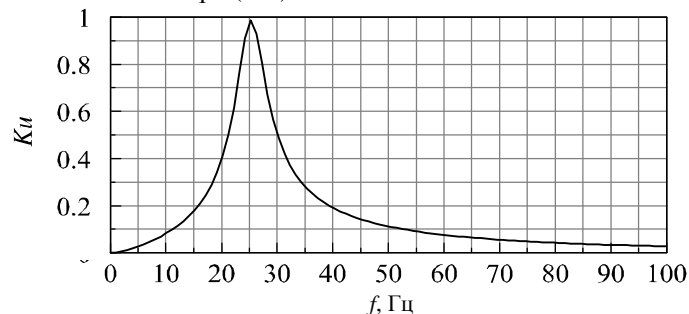


Рис. 2. АЧХ смугового фільтра, який використовується для попереднього виділення гармоніки 25 Гц з напруги дуги.

Особливості аналого-цифрового перетворення напруги дуги

Осцилограф USB оцифровує вхідні напруги та передає їх до ПК. Його блок-схема зображена на рис. 3. Сигнал надходить на входи підсилювачів каналів А та Б (1, 2), де його рівень узгоджується з вхідною напругою восьмирирядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) (3, 4). Вхідний підсилювач витримує десятикратне перевищення номінальної вхідної напруги, що забезпечує захист осцилографа USB. Оцифрована напруга обох каналів одночасно зчитується мікроконтролером 5 через інтерфейс SPI. Потім дані за допомогою USART надходять до перетворювача USART-USB (6), який передає їх до ПК. Частота дискретизації пристрою складає 24 723 вибірки/с (на один канал), що більш ніж достатньо для вимірювання напруженості поля з частотою коливань електро-механічного модулятора 25 Гц.

Особливості виділення основної гармоніки із напруги дуги

На другому кроці з оцифрованої напруги виходу смугового фільтра виділяється основна гармоніка частотою 25 Гц за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ); ця операція здійснюється на ПК. Комплексна амплітуда k -ї гармоніки прямого дискретного перетворення Фур'є описується виразом

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(-\frac{2\pi i}{N} kn\right), \quad (1)$$

де x_n — n -на вибірка сигналу; N — кількість вибірок на періоді сигналу T_f , який можна вибирати кратним до періоду коливань електрода $\tau = 40$ мс:

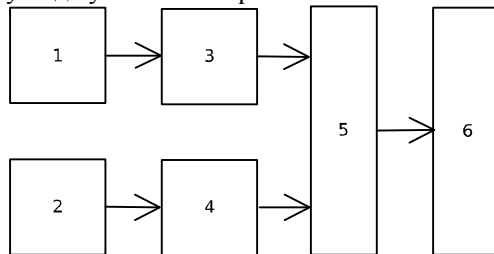
$$T_f = g\tau, \quad g \in N. \quad (2)$$

Для визначення напруженості електричного поля із врахуванням співвідношення (1) необхідно використати гармоніку з номером $k = g$ (в даній роботі $g = 1$, отже використовується перша гармоніка). Якщо покласти $g > 1$, то отримаємо усереднене значення напруженості поля по g періодах коливань електрода. Значення напруженості електричного поля розраховується із співвідношення

$$E = 2 \frac{X_1}{A}, \quad (3)$$

де A — амплітуда механічних коливань електрода. Подвоєння амплітуди першої гармоніки у виразі (3) узгоджується з теоремою Котельникова.

Рис. 3. Блок-схема осцилографа USB: 1 — підсилювач каналу А; 2 — підсилювач каналу Б; 3 — АЦП каналу А; 4 — АЦП каналу Б; 5 — мікроконтролер; 6 — перетворювач UART-USB.



Дійсно, якщо кількість вибірок сигналу за період складає N , то частота Найквіста дорівнює $N/(2T_f)$, де T_f — період сигналу. Тоді дискретний спектр сигналу виявляється розділеним на два набори спектральних складових з частотами, вищими та нижчими від $N/(2T_f)$. Причому один набір є віддзеркаленням іншого. Внаслідок рівномірного розподілу спектральної потужності між цими наборами і виникла необхідність подвоєння амплітуди.

Тестування програмно-апаратного комплексу вимірювання напруженості електричного поля

Експериментальний вимірювальний комплекс для визначення напруженості електричного поля, який використаний у даній роботі, можна умовно поділити на апаратну та програмну складові. На першому етапі здійснено перевірку програмної частини. З цією метою розроблено програмний алгоритм, який імітує роботу осцилографа USB. За його допомогою імітували незмінну в часі напруженість електричного поля $E = 3$ В/мм. На цьому етапі виявлено певну особливість, на якій варто заострити окрему увагу. На рис. 4 зображено реакцію програми обрахунку напруженості на сигнал, згенерований програмою-імітатором, на якому можна помітити певні коливання (1). При цьому частота першої гармоніки ДПФ (25 Гц) точно збігається з частотою сигналу, заданого програмою-імітатором; тобто биття між ними немає. У закладеній в програму математичній моделі фазу сигналу визначали одноразово, можливо, виявлені коливання є наслідком похибок обчислення, які спричинили биття між частотами ДПФ та сигналу. Для перевірки цього припущення штучно створили биття між частотами ДПФ (25,1 Гц) та сигналу (25,0 Гц) (2), результат якого можна побачити на рис. 4. Докорінна зміна характеру коливань при введенні штучного биття підтверджує правильність зробленого припущення. Отже, причиною виникнення коливань є нестійкість використаної математичної моделі до биття частот. Для усунення цього недоліку здійснили корекцію математичної моделі так, що на кожному періоді ДПФ знаходили фазу сигналу.

Обрахована напруженість поля за скорегованою по фазі математичною моделлю зображена на рис. 5, який для наочності побудований в одному масштабі з рис. 4. Після фазової корекції коливання зникли, а штучне введення биття лише слабо зміщує напруженість електричного поля.

Необхідно зазначити, що у спектрі напруги дуги завжди присутні гармоніки, кратні 50 Гц, які з'являються від недосконалості джерела живлення та наведеної ЕРС від інших споживачів електромережі. Моделювання їх впливу на напруженість поля здійснили шляхом подачі на вхід програми обрахунку сигналу, представленого виразом

$$U(t) = 3\sin(2\pi \cdot 25t) + 3\sin(2\pi \cdot 50t + \varphi_1) + 3\sin(2\pi \cdot 100t + \varphi_2). \quad (4)$$

Результат обрахунку напруженості для вхідного сигналу, що описується формулою (4), у випадку $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ зображений на рис. 6. Для фаз гармонік 50 та 100 Гц напруженість поля буде подібною. Отже, ці гармоніки дуже слабо впливають на результат обрахунку напруженості поля. Аналізувати внесок вищих гармонік немає сенсу, оскільки коефіцієнт їх проходження через смуговий фільтр (див. рис. 2) незначний.

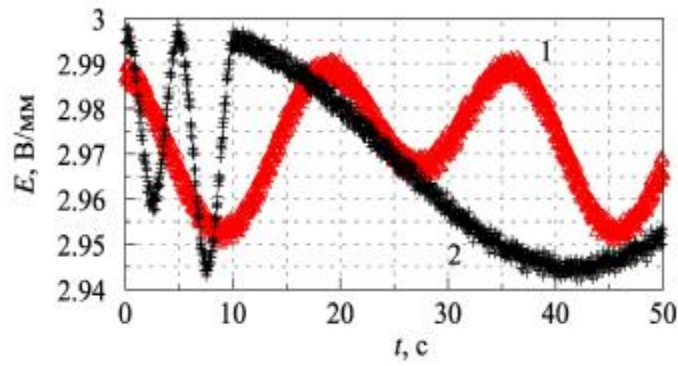


Рис. 4. Реакція програми обрахунку напруженості електричного поля на сигнал, створений програмою-імітатором з напруженістю поля 3 В/мм без штучного биття частот (1) та з биттям (2).

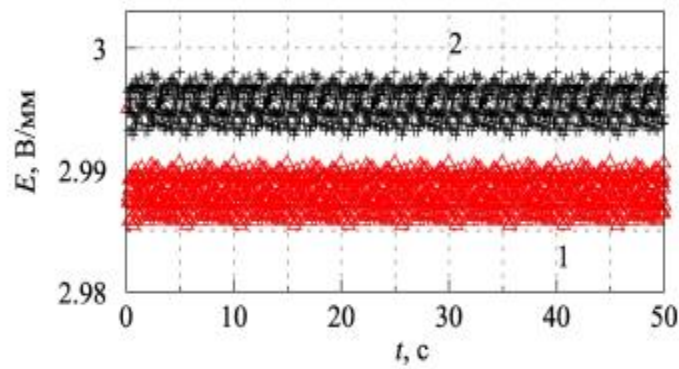


Рис. 5. Реакція скорегованої за фазою програми обрахунку напруженості електричного поля на сигнал, створений програмою-імітатором з напруженістю поля 3 В/мм без штучного биття частот (1) та з биттям (2).

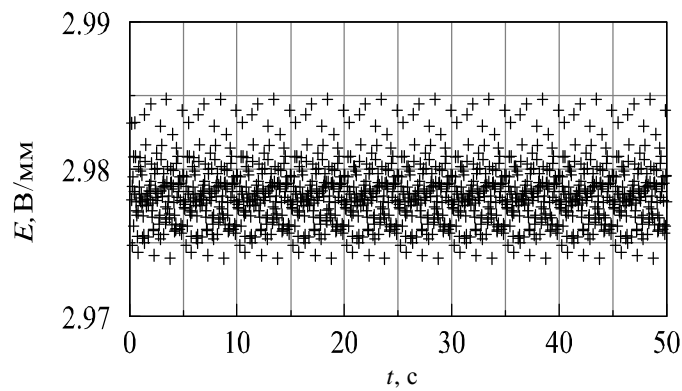


Рис. 6. Реакція програми обрахунку напруженості електричного поля на вхідний сигнал, який описується виразом (4), за умови відсутності зсуву фаз вищих гармонік ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$).

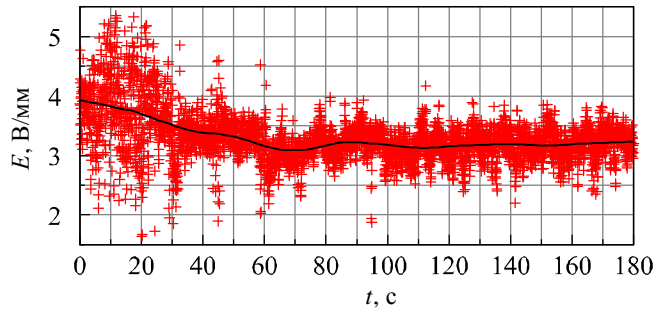


Рис. 7. Напруженість електричного поля плазми у позитивному стовпі дугового розряду між мідними електродами силою струму 3,5 А.

На наступному кроці здійснили вимірювання напруженості електричного поля позитивного стовпа плазми електродугового розряду між мідними електродами в атмосфері повітря силою струму 3,5 А. Дані обрахунку наведені на рис. 7, де маркерами зображено обраховані за допомогою ДПФ значення з часовою роздільною здатністю 40 мс, а неперервна крива є результатом усереднення та згладжування. На рис. 7 можна побачити суттєвий розкид визначених значень напруженості поля. Щоб визначити, чи це є наслідком особливості горіння дугового розряду (нерівномірна ерозія електродів, випадкові коливання стовпа дуги тощо) чи вади експериментальної установки (її конструкції або програмного забезпечення), здійснили вимірювання напруженості поля в електроліті, де, за нашими уявленнями, не має бути подібного розкиду.

З цією метою до стійки вібратора прикріпили кювету зі слабким розчином електроліту $C_6H_8O_7$ (рис. 8). Живлення електролітичної камери здійснювали незначним стабілізованим струмом, який лише слабо розігрівав електроліт. Як анод використали інертний матеріал (графіт), оскільки перебувала під негативним потенціалом. З урахуванням цього параметри процесу електролізу можна вважати незмінними у часі. Результат визначення напруженості поля в електроліті представлений на рис. 9, де відсутній розкид значень, спостережуваний у плазмі дугового розряду, що показано на рис. 7. Отже, розкид, відображений на рис. 7, викликаний зміною параметрів дугового розряду і не є вадю експериментальної установки.

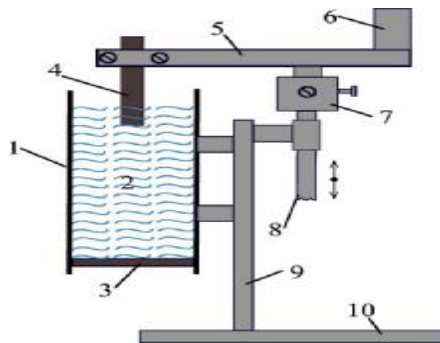


Рис. 8. Схема установки для вимірювання напруженості поля в електролітичній камері: 1 — кювета; 2 — електроліт; 3 — мідний катод; 4 — графітовий анод; 5 — штанга; 6 — противага; 7 — тримач електрода (12 на рис. 2); 8 — шток (10 на рис. 2); 9 — стійка (15 на рис. 2); 10 — основа (18 на рис. 2).

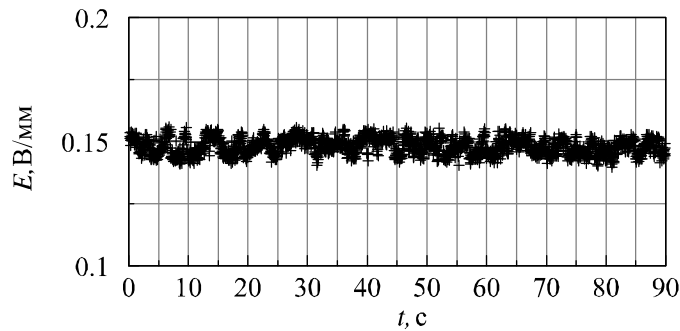


Рис. 9. Напруженість електричного поля в електроліті, виміряна шляхом модуляції міжелектродної відстані. Живлення електролітичної камери здійснено джерелом стабільного струму.

Розрахунок електропровідності та електронної концентрації плазми

У роботі [4] запропоновано методику визначення електропровідності та електронної концентрації плазми електродугового розряду із розв'язку рівняння енергетичного балансу дуги, яка потребує попереднього визначення температури плазми та напруженості поля позитивного стовпа. Окрім того, в рівнянні балансу можна врахувати винесення енергії не лише кондуктивним шляхом, а й через випромінювання. Тоді електропровідність плазми визначається за рівнянням

$$\sigma(r) = \frac{1}{E^2} \left[-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{dT}{dr} \right) + \rho(r) \right], \quad (5)$$

де r — радіус; E — напруженість електричного поля позитивного стовпа; $\lambda(r)$ — теплопровідність; $T(r)$ — температура плазми; $\rho(r)$ — густина потужності випромінювання плазми, яка визначається експериментально. Електронну концентрацію розраховують таким чином:

$$N_e(r) = \frac{m_e \sigma(r)}{e^2} \sum_p N_p \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{2E_{el}}{m_e}} Q_{e-p}(E_{el}) E_{el}(E_{el}) f(E_{el}) dE_{el}, \quad (6)$$

де m_e — маса електрона; e — заряд електрона; r — радіус; N_p — концентрація частинок сорту "p" у плазмі; E_{el} — енергія електронів; $Q_{e-p}(E_{el})$ — переріз розсіювання електронів з частинками сорту "p"; $f(E_{el})$ — функція розподілу електронів за енергіями. Відповідно до висновків роботи [5] в співвідношенні (5) можна використати теплопровідність повітря без врахування домішок електродного походження.

Електронна концентрація плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між мідними електродами у потоці повітря зі швидкістю 6,4 л/хв

Виміряна напруженість поля показана на рис. 10. Символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — результат усереднення та згладжування. Протягом 30 с після ввімкнення розряду спостерігається спадання напруженості поля. Можна припустити, що це

явище викликане напрацюванням оксиду на поверхні електродів. В подальшому напруженість незначно змінюється навколо свого середнього значення $E \approx 3,2$ В/мм. Температура плазми на відстані від осі розряду до $r = 2$ мм, визначена в роботі [6] методом діаграм Больцмана, показана на рис. 11: символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію радіального профілю гаусіаном. Електропровідність плазми (рис. 12) розраховували із співвідношення (5) як з врахуванням, так і без врахування випромінювання в рівнянні енергетичного балансу. Повний струм, розрахований з профілю електропровідності та значення напруженості електричного поля в каналі радіусом до $r = 2$ мм із врахуванням випромінювання, становить $I = 1,7$ А. Таким чином, врахуванням випромінювання у даному режимі дугового розряду можна знехтувати.

На рис. 13 показаний розрахований за формулою (6) розподіл електронної концентрації N_e . Як і електропровідність, рівень концентрації електронів практично не залежить від врахування в енергетичному балансі випромінювання для даного режиму розряду. Додатково на рис. 13 показано розподіл N_e , визначений в роботі [7]. Ці дані досить добре узгоджуються із значеннями, розрахованими за формулою (6) в центральній області дугового розряду. Проте на периферії розряду на відстані понад 1,7 мм відбувається їхнє розходження, що, як можна припустити, виникає через неврахування конвективного члену в рівнянні енергетичного балансу в моделі розрахунку електронної концентрації. Крім того, таке розходження можна пояснити ще й неізотермічністю плазми в цій області і для врахування цього ефекту необхідно застосувати двотемпературну модель плазми.

Електронна концентрація плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами у потоці повітря зі швидкістю 6,4 л/хв

Перехід до умов функціонування дугового розряду силою струму 30 А і тривалістю імпульсу 1 с дозволяє виміряти за допомогою розробленої методики 25 значень напруженості електричного поля. На рис. 14 зображено осцилограму напруги на розрядному проміжку та напруженість електричного поля у позитивному стовпі дуги. Коливання напруги на розрядному проміжку, які можна помітити на рис. 14, є наслідком модуляції міжелектродної відстані з частотою 25 Гц. Середнє значення напруженості поля плазми розряду силою струму 30 А становить $E \approx 1,7$ В/мм.

Температура плазми, визначена методом діаграм Больцмана [8], показана на рис. 15; символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію радіального профілю гаусіаном. Зазначимо, що одержана у такий спосіб температура є температурою заселення енергетичних рівнів атомів; її можна вважати близькою до електронної температури. Але в приосьовій області дугового розряду атмосферного тиску завдяки зіткненням відносно великої кількості електронів з важкими частинками відбувається ефективний енергообмін між ними. Тому газову та електронну температури у плазмі в цій області можна вважати однаковими, тобто плазма є ізотермічною. Проте на периферії розряду частота таких зіткнень суттєво зменшується через змен-

шення концентрації електронів, що призводить до розходження електронної та газової температур. Це явище, очевидно, і можна спостерігати на рис. 15 на відстанях від осі розряду понад 2,7 мм.

Електропровідність плазми (рис. 16) розраховували із співвідношення (5) як з врахуванням, так і без врахування випромінювання в рівнянні енергетичного балансу. Представлені результати свідчать, що врахуванням випромінювання у даному режимі дугового розряду вже не можна нехтувати. Повний струм, розрахований з профілю електропровідності та напруженості електричного поля в каналі радіусом до $r = 2,7$ мм із врахуванням випромінювання, становить $I = 35$ А.

На рис. 17 показаний розрахований за формулою (6) розподіл електронної концентрації N_e . Як і електропровідність, значення концентрації електронів помітно залежить від врахування випромінювання в енергетичному балансі для даного режиму розряду. Додатково на рис. 17 показано значення N_e , визначені в роботі [8] із ширини спектральних ліній Cu I 515,3 нм, домінуючим механізмом розширення яких є квадратичний ефект Штарка. Слід зауважити, що ця методика визначення електронної концентрації не чутлива до наявності локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) у плазмі. Одержані у такий спосіб за незалежною методикою результати досить добре узгоджуються із значеннями, розрахованими за формулою (6), в центральній області дугового розряду. Проте на периферії розряду на відстані понад 2,7 мм відбувається їхнє розходження, що, як і в попередньому випадку, вказує на необхідність або врахування конвективного члену в рівнянні енергетичного балансу у моделі розрахунку електронної концентрації, або застосування двотемпературної моделі плазми у випадку можливого порушення її ізотермічності.

Електронна концентрація плазми вільноіснуючого електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в атмосфері повітря

На рис. 18 зображено осцилограму напруги на розрядному проміжку та напруженість електричного поля у позитивному стовпі дуги. Середнє значення напруженості поля плазми розряду силою струму 30 А в межах імпульсу тривалістю 1 с становить $E \approx 1,3$ В/мм.

Температура плазми, визначена за методом діаграм Больцмана [8], показана на рис. 19; символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію радіального профілю гаусіаном. Для відстані від осі розряду понад 3,2 мм плазма, очевидно, є неізотермічною, як і в попередніх випадках (рис. 19), тому розрахунок електропровідності, повного струму та електронної концентрації обмежили саме цим радіусом.

Електропровідність плазми (рис. 20) також розраховували як з врахуванням, так і без врахування випромінювання в енергетичному балансі дуги. Очевидно, і в цьому режимі врахуванням випромінювання вже не можна нехтувати. Повний струм, розрахований з профілю електропровідності та напруженості електричного поля в каналі радіусом до $r = 3,2$ мм із врахуванням випромінювання, становить $I = 40$ А.

На рис. 21 показаний розрахований за формулою (6) розподіл електронної концентрації N_e . Як і електропровідність, концентрація електронів помітно залежить від врахування випромінювання в енергетичному

балансі для даного режиму розряду. Додатково на рис. 21 наведено значення N_e , одержані в роботі [8] із ширини спектральної лінії Cu I 515,3 нм. Отримані таким чином результати досить добре узгоджуються із значеннями, розрахованими за формулою (6), в центральній області дугового розряду. Однак в периферійній частині розряду на відстані понад 2 мм відбувається розходження даних, отриманих за різними методиками, що, як і в попередніх випадках, вимагає припущення щодо необхідності врахування конвективного члену в рівнянні енергетичного балансу у моделі розрахунку електронної концентрації та/або застосування двотемпературної моделі плазми.

Електронна концентрація плазми вільноіснуючого електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—С у атмосфері повітря

На наступному етапі досліджували дуговий розряд між композитними електродами Cu—С, вміст міді в яких складав 20% (мас.). Візуальний аналіз вихідної поверхні електродів (до обробки електричною дугою) виявив мікрочапляння мідних частинок у графітовій основі. Спостереженнями впродовж роботи дуги встановлено, що катодна пляма стрибками рухається по поверхні електрода, прив'язуючись до крапель міді на поверхні.

На рис. 22 показано виміряну напруженість поля у цьому режимі роботи дуги. Символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — результат усереднення та згладжування. Протягом перших 25 с після ввімкнення розряду напруженість поля дещо спадає. Це, ймовірно, викликано розігріванням електродів до температури плавлення міді та її просочуванням з об'єму вуглецевої матриці на поверхню. В результаті збільшується концентрація мідних парів у плазмі дугового розряду. Однак для проміжку часу понад 25 с спостерігається монотонне зростання напруженості поля, що, як можна припустити, спричинене збідненням міддю графітової матриці і, як наслідок, зменшенням її парів у плазмі. Для подальшого розрахунку електропровідності та електронної концентрації використано середнє значення напруженості поля $E \approx 3,4$ В/мм.

Радіальний профіль температури в середній області дугового стовпа, визначений за методом діаграм Больцмана із залученням спектральних ліній Cu I 510,5, 515,3, 521,8, 570,0, 578,2 нм, показаний на рис. 23. На графіку символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію радіального профілю гаусіаном.

Розподіл електропровідності (рис. 24) розраховували із врахуванням та без врахування втрат енергії плазми на випромінювання. Можна зробити висновок, що у цьому режимі розряду випромінювання не відіграє помітної ролі. Повний струм, розрахований з профілю електропровідності та напруженості електричного поля в каналі радіусом до $r = 3$ мм, становить $I = 2,3$ А. На рис. 25 зображено розрахований за формулою (6) радіальний розподіл електронної концентрації N_e . Одержані у такий спосіб результати порівнювали із даними, одержаними за альтернативною методикою. В роботі [3] за допомогою лазерної абсорбційної спектроскопії (ЛАС) визначено радіальний розподіл атомів міді в плазмі електродугового розряду між композитними електродами Cu—С у припущенні

наявності локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР). І, вважаючи, що концентрація електронів у плазмі визначається переважно термічною іонізацією атомів міді, можна розрахувати відповідний просторовий профіль N_e , опираючись на рівняння Саха

$$N_e = A \sqrt{\frac{U_{\text{CuII}}}{U_{\text{CuI}}}} N_{\text{Cu}} \exp\left(-\frac{E_{\text{Cu}}}{2kT}\right), \quad (7)$$

де A — константа; U_{CuII} — статистична сума іона міді; U_{CuI} — статистична сума атома міді; N_{Cu} — концентрація атомів міді; E_{Cu} — енергія іонізації атомів міді; k — стала Больцмана; T — температура.

Таке припущення справедливе, оскільки мідь має суттєво нижчий потенціал іонізації у порівнянні з іншими компонентами плазми газорозрядної суміші. Дійсно, при температурі $T = 6000$ К внесок іонізації атомів вуглецю майже на три порядки менший, ніж атомів міді; інші компоненти плазми (кисень, азот) дають ще менший внесок. Одержана в такий спосіб концентрація електронів практично збігається з розрахованою за виразом (6), що свідчить про наявність у плазмі локальної термодинамічної рівноваги.

Електронна концентрація плазми вільноіснуючого електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—С у атмосфері повітря

На рис. 26 зображено осцилограму напруги на розрядному проміжку та напруженість електричного поля у позитивному стовпі дуги. Середнє значення напруженості поля плазми розряду силою струму 30 А в межах імпульсу тривалістю 1 с становить $E \approx 1,5$ В/мм.

Радіальний профіль температури плазми, визначений за методом діаграм Больцмана із залученням спектральних ліній Cu I 510,5, 515,3, 521,8, 570,0, 578,2 нм, показаний на рис. 27. На графіку символами зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію радіального профілю гаусіаном.

Електропровідність плазми σ , розрахована із співвідношення (5), показана на рис. 28. Повний струм, розрахований з профілю електропровідності та напруженості електричного поля в каналі радіусом до $r = 4$ мм із врахуванням випромінювання, становить $I = 20$ А. Розбіжність між розрахованим та реальним струмом можна пояснити недооцінкою розмірів каналу, тобто реальний радіус каналу дещо перевищує 4 мм.

На рис. 29 показано розрахований за формулою (6) розподіл електронної концентрації N_e . Очевидно, концентрація електронів помітно залежить від способу розрахунку електропровідності — врахування чи неврахування випромінювання.

Перевірка методики визначення електронної концентрації

У роботі [9] запропоновано методику визначення просторового розподілу електронної концентрації переважно за термічною іонізацією атомів міді. Відносна електронна концентрація саме у цьому випадку розраховується із радіальних розподілів температури плазми та інтенсивності спектральної лінії Cu I 465,1 нм:

$$N_e \sim T^{0.75} I_{4651}^{0.5}, \quad (8)$$

де I_{4651} — інтенсивність спектральної лінії Cu I 465,1 нм; T — температура плазми. Порівняння експериментально отриманих значень інтенсивності випромінювання цієї спектральної лінії у плазмі дугового розряду силою струму 3,5 та 30 А дозволяє визначити електронну концентрацію в одному із цих режимів, якщо в іншому режимі цей параметр встановлено за незалежною методикою. Для виявлення абсолютного значення електронної концентрації використали результати лазерної абсорбційної спектроскопії плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А. Результати обрахунку електронної концентрації за рівнянням енергетичного балансу (6), рівнянням Саха (7) та за інтенсивністю спектральної лінії Cu I 465,1 нм показані на рис. 30. Можна помітити, що дані, отримані за різними методиками, добре узгоджуються в межах похибки експерименту. Звідси зроблено висновок про наявність ЛТР у плазмі в досліджуваному режимі існування дугового розряду.

Отже, виконаний комплекс досліджень плазми підтверджує доцільність використання методики визначення електронної концентрації із залученням рівняння енергетичного балансу. З наведених результатів можна встановити порогове значення струму, починаючи з якого необхідно враховувати втрати на випромінювання. Аналізуючи значення електропровідності із врахуванням випромінювання та без нього можна побачити, що його вплив стає помітним для струма дуги 30 А. Отже, для плазми дугового розряду з домішками парів міді виділення енергії шляхом випромінювання необхідно враховувати для струмів понад 30 А, що узгоджується з результатами роботи [10].

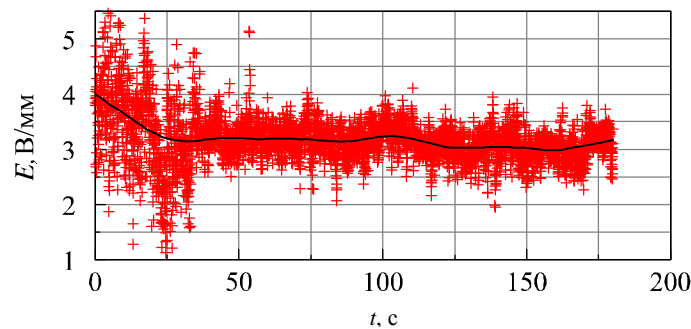


Рис. 10. Напруженість електричного поля позитивного стовпа плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв.

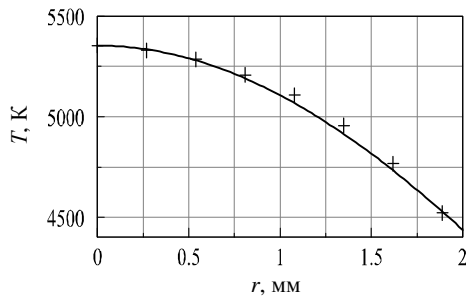


Рис. 11. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, визначений в роботі [6] за методом діаграм Больцмана.

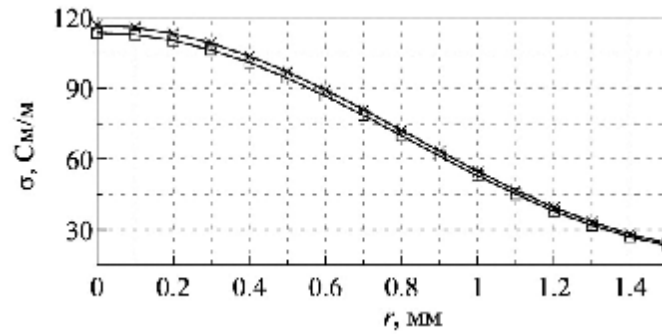


Рис. 12. Електропровідність плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, розрахована зі співвідношення (5) з врахуванням (\times) та без врахування (\square) випромінювання.

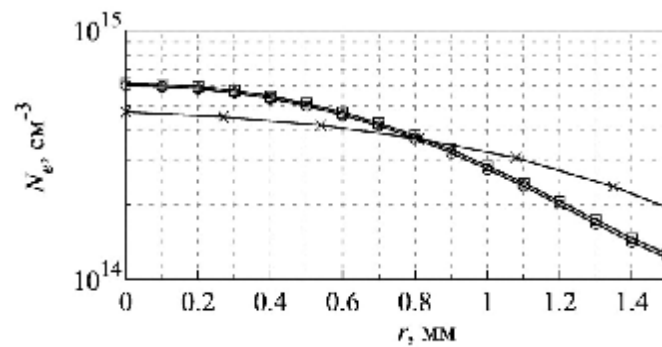


Рис. 13. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду силою струму 3,5 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, визначена в роботі [7] за незалежною методикою (\times) і розрахована з врахуванням (\square) та без врахування (\circ) випромінювання відповідно до співвідношення (6).

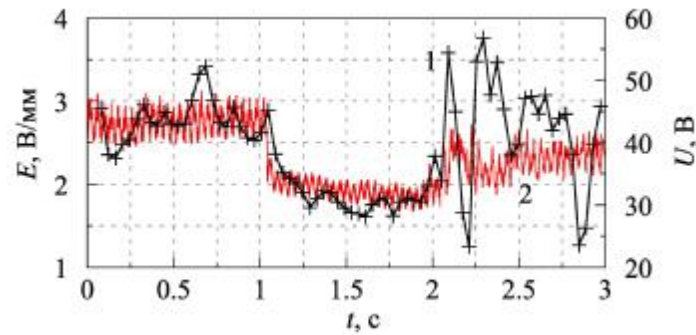


Рис. 14. Напруженість електричного поля позитивного стовпа (1) та осцилограма напруги дуги (2) плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв.

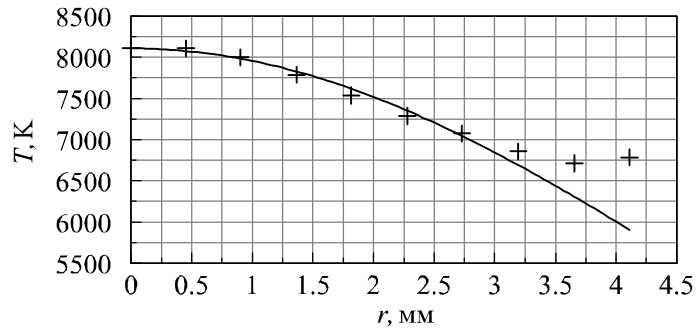


Рис. 15. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, визначений в роботі [8] за методом діаграм Больцмана.

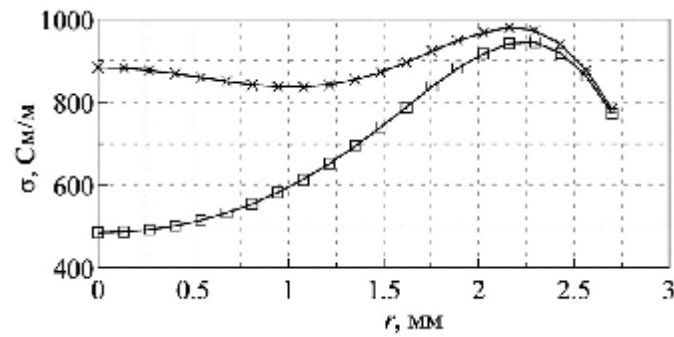


Рис. 16. Електропровідність плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, розрахована відповідно до співвідношення (5) з врахуванням (x) та без врахування (□) випромінювання.

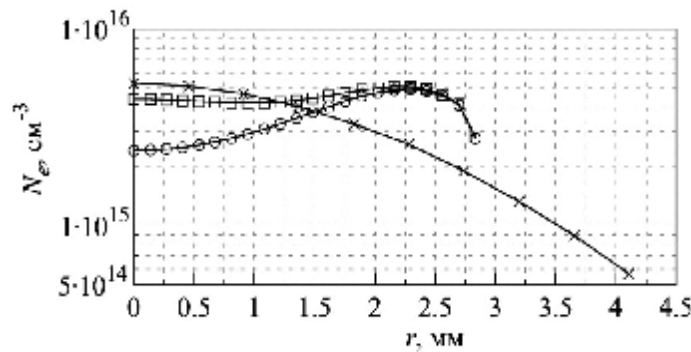


Рис. 17. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в потоці повітря зі швидкістю 6 л/хв, визначена в роботі [8] за незалежною методикою (x) і розрахована з виразу (6) із врахуванням (□) та без врахування (○) випромінювання.

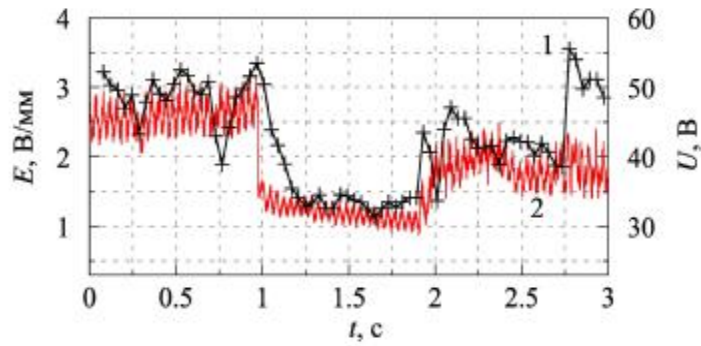


Рис. 18. Напруженість електричного поля позитивного стовпа (1) та осцилограма напруги дуги (2) плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в атмосфері повітря.

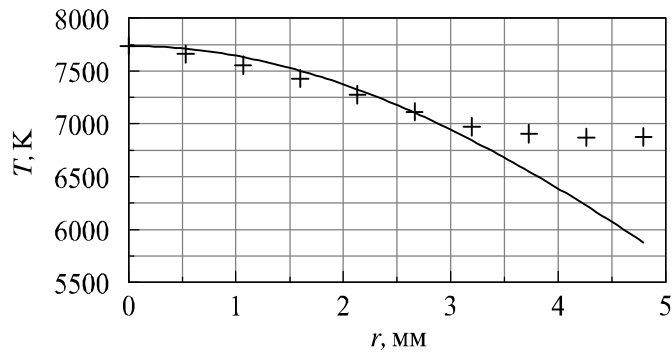


Рис. 19. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в атмосфері повітря. Точками зображено експериментальні дані, а суцільною кривою — апроксимацію гаусіаном.

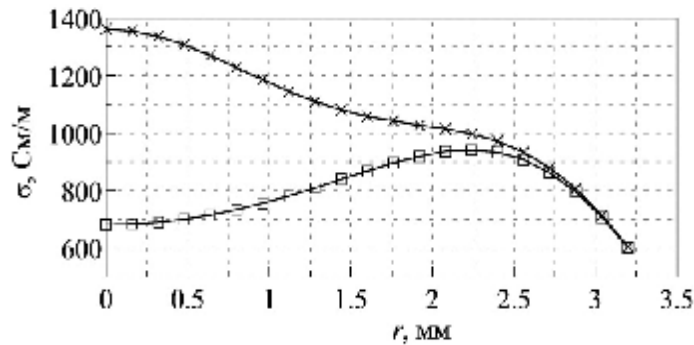


Рис. 20. Електропровідність плазми електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в атмосфері повітря, розрахована за співвідношенням (5) з врахуванням (x) та без врахування (□) випромінювання.

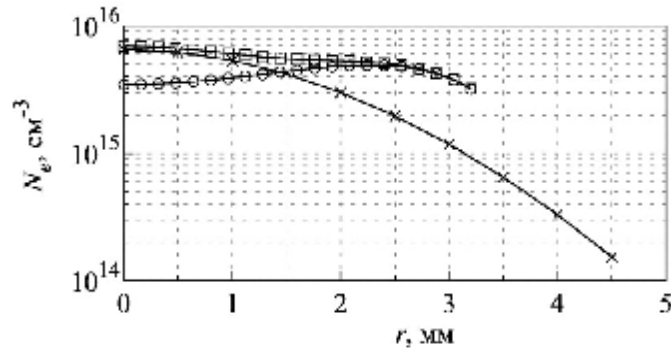


Рис. 21. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду силою струму 30 А між мідними електродами в атмосфері повітря, визначена в роботі [8] за незалежною методикою (x) і розрахована з врахуванням (□) та без врахування (o) випромінювання із співвідношення (6).

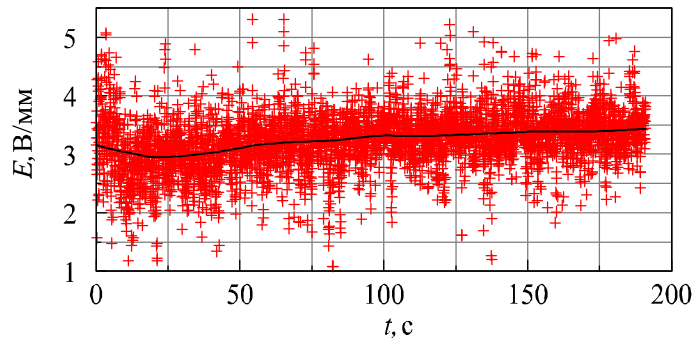


Рис. 22. Напруженість електричного поля позитивного стовпа плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря.

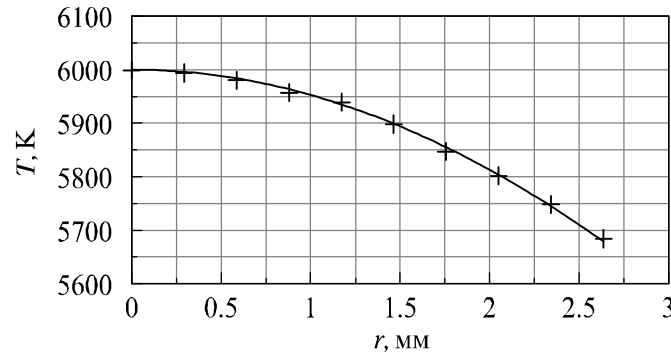


Рис. 23. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря.

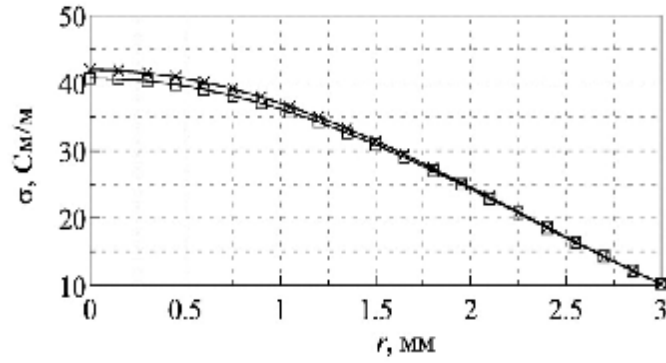


Рис. 24. Електропровідність плазми електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря, розрахована за співвідношенням (5) з врахуванням (x) та без врахування (\square) випромінювання.

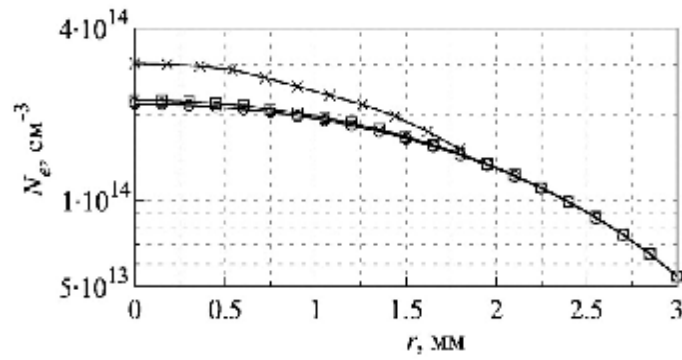


Рис. 25. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду силою струму 3,5 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря, визначена за незалежною методикою (x) і розрахована із співвідношення (6) з врахуванням (\square) та без врахування (\circ) випромінювання.

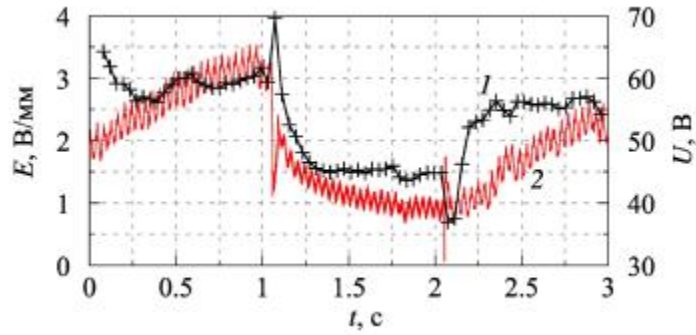


Рис. 26. Напруженість електричного поля позитивного стовпа (1) та осцилограма напруги дуги (2) плазми електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря.

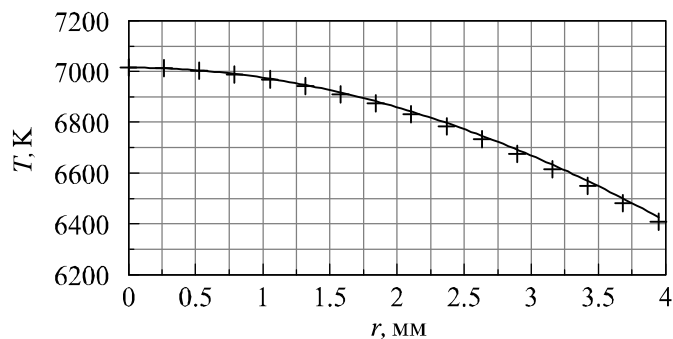


Рис. 27. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря, визначений за методом діаграм Больцмана із залученням спектральних ліній Cu I 510,5, 515,3, 521,8, 570,0, 578,2 нм.

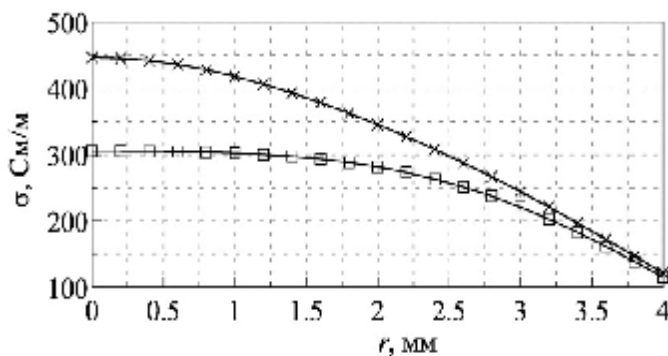


Рис. 28. Електропровідність плазми електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря, розрахована зі співвідношення (5) з врахуванням (x) та без врахування (□) випромінювання.

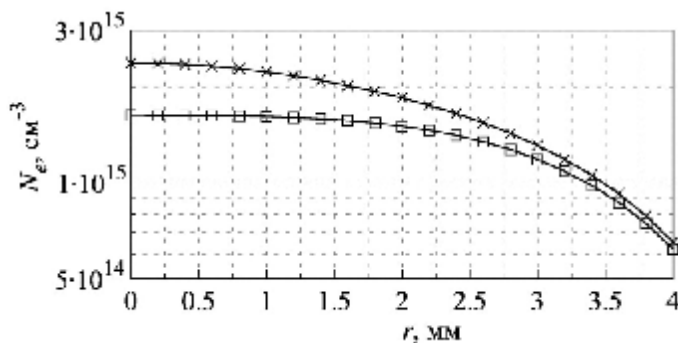


Рис. 29. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду силою струму 30 А між композитними електродами Cu—С в атмосфері повітря, розрахована зі співвідношення (6) з врахуванням (x) та без врахування (□) випромінювання.

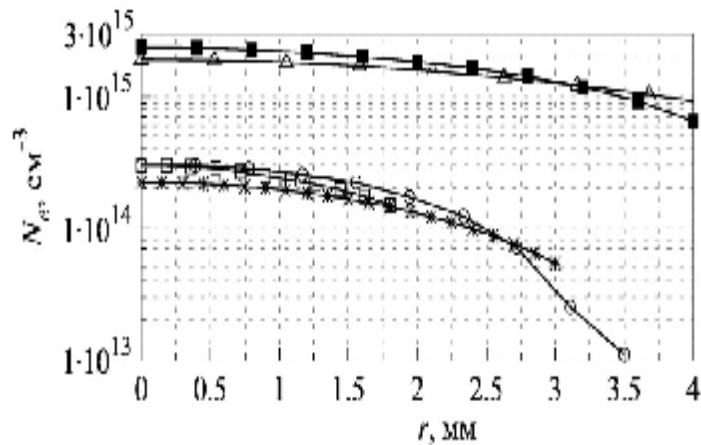


Рис. 30. Електронна концентрація в плазмі електродугового розряду між композитними електродами Cu—C в атмосфері повітря, розрахована з виразу (6) для струму дуги 3,5 А (x) та 30 А (■) за допомогою альтернативної методики (струм дуги 3,5 А) (□) та інтенсивності спектральної лінії Cu I 465,1 нм для струму дуги 3,5 А (○) і 30 А (Δ).

Металографічні дослідження робочої поверхні композитних електродів Cu—C

Дуговий розряд розігріває електроди в місцях катодної та анодної плям, що призводить до випаровування електродного матеріалу і, як наслідок, до суттєвих змін параметрів плазми у розрядному проміжку. Вміст парів електродного походження у плазмі є показником інтенсивності ерозії електродів. Для оцінки вмісту парів матеріалу електродів можна залучити результати розрахунку температури та електронної концентрації плазми, які наведені у роботі [5]. До того ж дослідження змін на робочій поверхні і в структурі приповерхневих шарів електродів під дією дугового розряду дає можливість з'ясувати механізм випаровування складових композитного матеріалу.

На рис. 31, а, б зображено поверхні електродної пари після впливу дуги силою струму 3,5 А впродовж 3 хв, а на рис. 31, в, г — поверхні іншої пари електродів після дії на них розряду з постійним струмом силою 3,5 А протягом 50 с. Впродовж цього часу на нього наклали 60 імпульсів струмом $I_{\text{імп}} = 26,5$ А тривалістю 30 мс, тобто амплітуда імпульсу струму становила 30 А. В обох випадках відбувалося значне розігрівання електродів, що підтверджується їх яскравим світінням (білого кольору) після вимикання розряду.

Незалежними спостереженнями за поведінкою дугового розряду між композитними електродами Cu—C встановлено стрибкоподібне переміщення катодних та анодних плям по поверхні електродів. Така поведінка дуги провокує випаровування міді і сублімацію тонких фракцій вуглецю, які формуються, в першу чергу, внаслідок розкладання зв'язуючого матеріалу, а також у вигляді графіту. Окрім того, прив'язка плям відбувається і до бічної поверхні електродів, посилюючи її випаровування. Поступово електроди набувають конусоподібної форми, хоча

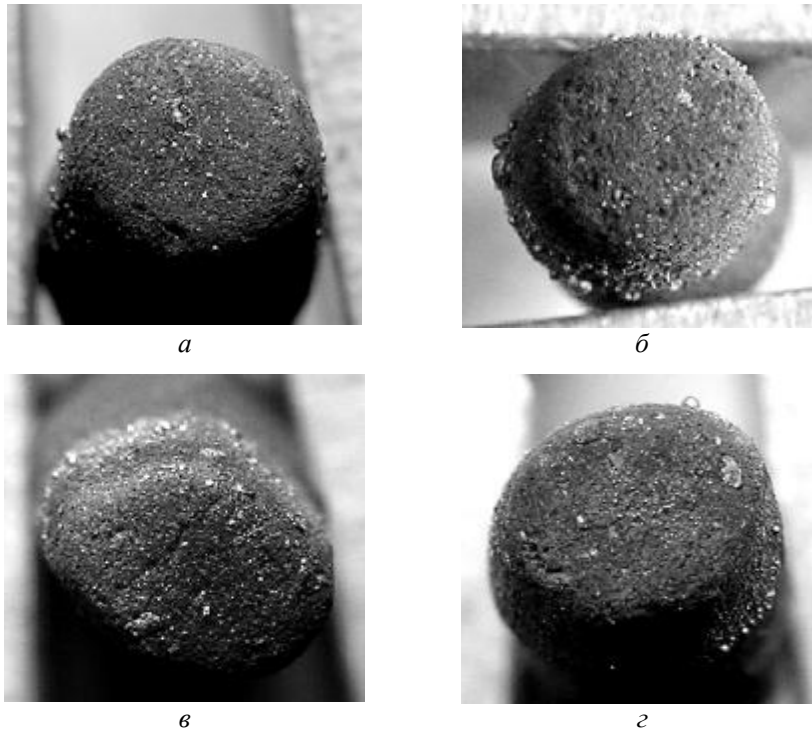


Рис. 31. Зовнішній вигляд електродів після випробувань в умовах: *a, б* — $I = 3,5 \text{ A}$, $t = 3 \text{ хв}$; *в, г* — $I = 3,5 \text{ A} + I_{\text{мп}} = 30 \text{ A}$, $t = 50 \text{ с}$; *a, в* — анод; *б, г* — катод.

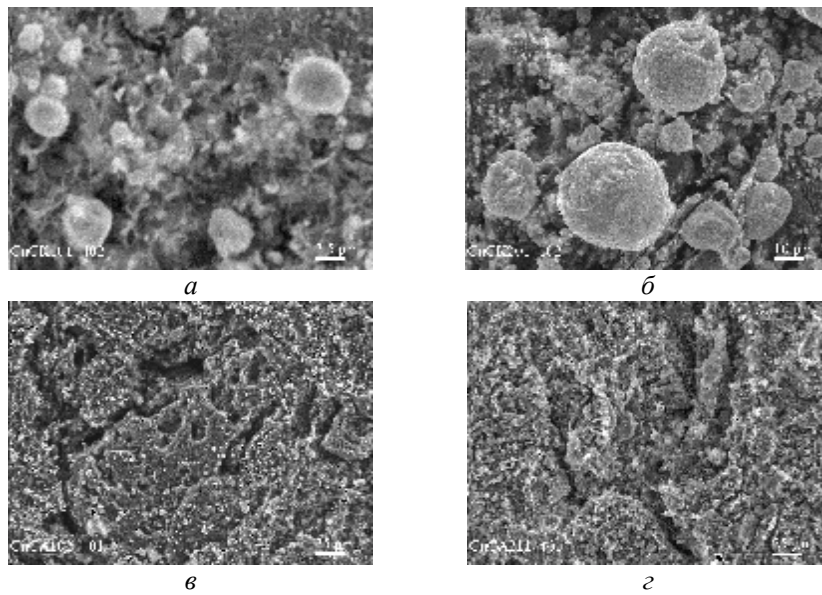


Рис. 32. Робочі поверхні електродів з композиції $\text{Cu}-\text{C}$: *a, б* — катод; *в, г* — анод; $I = 3,5$ (*a, в*) та 30 A (*б, г*).

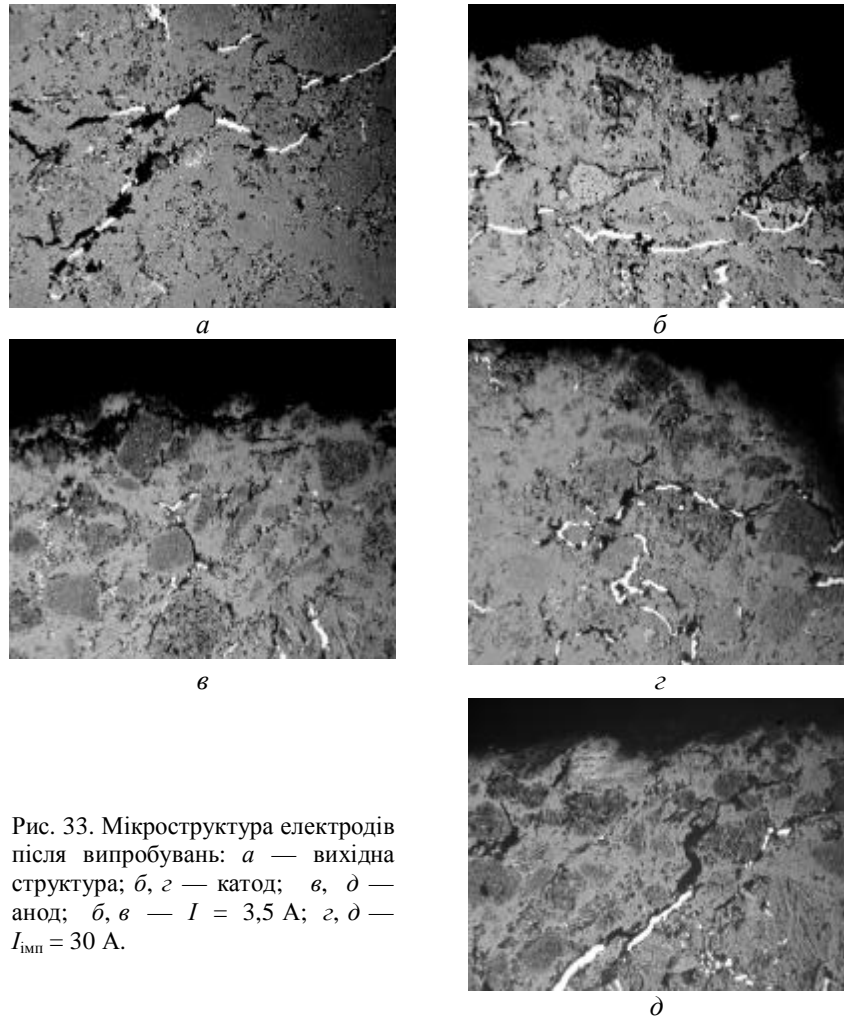


Рис. 33. Мікроструктура електродів після випробувань: *a* — вихідна структура; *б, г* — катод; *в, д* — анод; *б, в* — $I = 3,5$ А; *г, д* — $I_{\text{мп}} = 30$ А.

первісно вони були циліндричними. Врешті, після закінчення випробувань на їх фронтальній та бічній поверхнях в місцях прив'язки дугового розряду залишаються краплини міді (рис. 31).

Більш детальний аналіз робочих поверхонь вказує на те, що підвищення сили струму викликає посилення процесу випаровування міді, внаслідок чого кулясті частинки міді, які осідають на поверхні електродів, мають значно більший розмір (рис. 32, *a, б*). Глибокі треки, що утворюються навколо більш стійких до електроерозії фазових складових, підтверджують переважне випаровування (сублімацію) вуглецевого зв'язуючого (рис. 32, *в, г*).

В результаті дослідження мікроструктури випробовуваних електродів встановлено, що основа їх матеріалу складається з вуглецю різних видів та дисперсності, а мідь розташована у вигляді коротких волокон, які супроводжуються вкрапленнями графіту (рис. 33, темна фаза). Така будова композиції визначає характер ерозійного руйнування електродів.

На рис. 33 видно, що мідь не має явно вираженої самостійної тенденції до переміщення в напрямку дії дугового розряду, а спрямовується до виходу на поверхню внаслідок її утягнення рухом дисперсної графітової складової. Переважне видалення цього компонента сприяє більш чіткому виявленню структури композиції (рис. 33, б—д). Під впливом імпульсів струму в поверхневому шарі відбувається руйнування міжатомних зв'язків в структурі графіту з утворенням великих об'ємів вуглецевого пилу. Оскільки в дисперсному стані речовини мають значно нижчу теплоту сублимації, ніж в компактному [11], вуглецевий пил, заповнюючи міжелектродний проміжок, створює в ньому додатковий тиск. Це, ймовірно, і викликає розширення розрядного каналу, зниження концентрації електронів в його приосьовій зоні і температури плазми через те, що частина тепла, яка виділяється, буде витратитися на нагрівання частинок вуглецю.

Як вже зазначали, під час роботи дугового розряду графітова матриця електродів помітно розігрівається, що підтверджує випотівання міді крізь їх бічну поверхню (рис. 31). Ця обставина дозволяє уточнити механізм розширення розрядного каналу: випаровування міді відбувається не лише з місця прив'язки електродних плям, а й з усієї розігрітої поверхні електродів, що, у свою чергу, сприяє розширенню зони провідності розряду, не вимагаючи збільшення температури та електронної концентрації на вісі дуги.

Висновки

Досліджено плазму електродугового розряду силою струму 3,5 та 30 А між мідними та композитними електродами Cu—C вільноіснуючого розряду та в потоці повітря.

Виконано апробацію запропонованої раніше методики визначення електронної концентрації плазми електродугового розряду на основі розрахунку енергетичного балансу. Одержані у такий спосіб дані добре узгоджуються з результатами альтернативних методик, що дозволяє рекомендувати її для досліджень електродугової плазми.

Показано, що в енергетичному балансі дугового розряду силою струму 30 А необхідно враховувати внесок випромінювання і це не суперечить літературним даним.

Доведено існування локальної термодинамічної рівноваги у приосьовій області плазми дугового розряду силою струму 3,5 та 30 А між композитними електродами Cu—C.

Встановлено, що абсолютне значення електронної концентрації плазми на осі дуги між мідно-графітовими електродами менше у порівнянні з розрядом між мідними електродами. Проте канал дуги (профіль електронної концентрації) помітно розширюється, що можна пояснити різним механізмом ерозії матеріалу електродів різного складу. У випадку однокомпонентних мідних електродів емісія парів міді відбувається лише з електродних плям. Дуговий розряд між електродами Cu—C помітно розігріває вуглецеву матрицю електродного матеріалу, крізь пори якої з об'єму на поверхню просочується мідь внаслідок капілярного ефекту. З покритої острівцями розплавленого металу робочої

поверхні електродів інтенсивно випаровується мідь, яка потрапляє до плазми. Таким чином, канал дуги між мідно-графітовими електродними розширюється та більш рівномірно заповнюється парами міді, ніж у випадку дуги між мідними електродними.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити подяку професору Беренту В. Я. за надання електродних матеріалів Cu—C для виконання досліджень.

1. *Берент В. Я.* Улучшение свойств токоприемников на углеродной основе / В. Я. Берент, С. А. Гнездилов // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2009. — 2. — С. 18—23.
2. *Веклич А. М.* Визначення електронної концентрації в плазмі електродугового розряду / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Вісник Київського ун-ту. Фіз.-мат. науки. — 2004. — 2. — С. 428—435.
3. *Veklich A. N.* Investigations of electric arc plasma between composite Cu—C electrodes / [A. N. Veklich, V. F. Boretskij, A. I. Ivanisik et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. — 2013. — 86, No. 4. — P. 204—208.
4. *Веклич А. М.* Властивості плазми електродугового розряду в повітрі з домішками міді та вуглецю / [А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький та ін.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2014. — С. 9—16.
5. *Boretskij V. F.* Plasma of electric arc discharge in carbon dioxide with copper vapours / [V. F. Boretskij, Y. Cressault, Ph. Teulet, A. N. Veklich] // XIXth Symposium on Physics of Switching Arc (FSO 2011), 5—9 September, Brno, Czech Republic. — 2011. — P. 121—124.
6. *Babich I. L.* Plasma temperature of electric arc discharge in air flow between copper electrodes / [I. L. Babich, V. F. Boretskij, V. M. Goncharenko et al.] // Proc. IV Internat. conf. "Electronics and Applied Physics" Taras Shevchenko National University of Kyiv, Radiophysics Faculty. — Kyiv, Ukraine, 23—25 October, 2008. — P. 119—120.
7. *Борецький В. Ф.* Фізичні особливості багатоконпонентної плазми електродугового розряду у потоці газу: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — К., 2011.
8. *Babich I. L.* Peculiarity of thermal plasma in a gas flow / I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. N. Veklich // Вісник Київського ун-ту імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. — 2009. — 12. — С. 6—8.
9. *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.
10. *Lowke J. J.* Simple theory of free-burning arcs // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1979. — 12. — P. 1873—1886.

Особенности электродугового разряда между композитными электродами Cu—C

А. Н. Веклич, С. А. Фесенко, Л. А. Крячко, В. Ф. Борецкий,
М. М. Клещич, М. Е. Головкова

Исследованы параметры плазмы электродугового разряда между композитными электродами Cu—C. Большое внимание уделено разработанной методике определения электронной концентрации плазмы. На основе результатов металлографических исследований поверхности предложен механизм разрушения электродов.

Ключевые слова: дуговой разряд, электронная концентрация, напряженность электрического поля, электроэрозия.

Peculiarities of electric arc discharge between composite electrodes Cu—C

A. N. Veklich, A. A. Fesenko, L. A. Kryachko, V. F. Boretskij,
M. M. Kleshich, M. E. Golovkova

This work is dedicated to the investigation of electric arc discharge plasma between composite electrodes Cu—C. A great attention is paid to the determination of electron density in plasma by the designed method. Degradation mechanism of electrodes is proposed based on results of metallographic investigations.

Keywords: arc discharge, electron density, electric field strength, electrical erosion.