

Н.А. Шидловська, С.М. Захарченко, М.Ф. Захарченко, М.А. Куліда, С.А. Закусило

Спектральний та оптикометричний методи контролю параметрів плазмових каналів, спричинених розрядними струмами між гранулами металів у робочих рідинах

Обґрунтовано актуальність та доцільність розроблення та застосування оптичних методів контролю параметрів плазмових каналів у шарах металевих гранул під час їх іскро- та плазмоерозійного оброблення з метою підвищення точності керування процесами і якості продукції, яка отримується. Розроблено оптикометричний метод визначення відношення об'ємів кольорових ореолів, імовірно спричинених стримерами, та іскрових ядер плазмових каналів між гранулами металів у робочій рідині, який не потребує спеціалізованого спектрометричного обладнання, а базується на використанні апаратних засобів загального призначення та спеціалізованого програмного забезпечення, яке є у вільному доступі. Даним методом проведено аналіз відношення об'ємів кольорових ореолів та іскрових ядер плазмових каналів між гранулами Al та Ag у дистильованій воді, що дало додаткову інформацію для прогнозів співвідношення нано- та мікророзмірних фракцій ерозійних частинок металів на етапі їх формування. Проведено аналіз спектрів випромінювання кольорових ореолів плазмових каналів у дистильованій воді між гранулами Al, Ag, Fe та Cu, а також Ni-Mn-Ga та Ti-Zr-Ni у рідкому азоті і Ti-Zr-Ni у рідкому аргоні. Обґрунтовано і узагальнено відмінки результуючого випромінювання у цих випадках та наведено їх опис за RGB-кодами. Обґрунтовано можливість спрощення спектрометричного методу аналізу плазми та оточуючої її парогазової фази у шарах металевих гранул за аналізом відмінки результуючого випромінювання, який базується на отриманих раніше спектрометричних даних. Бібл. 56, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: розрядний струм, плазмові канали, металеві гранули, оптичний спектр випромінювання.

Сучасний стан досліджень, постановка та актуальність задачі. Іскро- та плазмоерозійне оброблення шарів металевих гранул (ШМГ) в робочих рідинах з відносно низькою питомою електропровідністю є основою чотирьох груп технологічних процесів. Перша – виробництво мікродисперсних порошків металів і сплавів із спеціальними властивостями: тугоплавких і жароміцних, з магнітною [1] і температурною [2] пам'яттю форми, з аморфною [3] та аморфно-кристалічною структурою [4], з гігантським магніторезистивним ефектом [5], магнітом'яких [6], сорбуючих водень [7], твердих [8], корозійно стійких [9] та ін. [10, 11]. Друга – іскрове плазмове або електророзрядне спікання під тиском мікророзмірних порошків металів і сплавів в композитах, кераміках та інших гетерогенних середовищах [12]. Третя – виробництво гідроксидів утворюючих коагулянт металів (Al та Fe) для очищення, в тому числі для потреб теплової енергетики, [13] і знезараження [14] природних вод та промислових скидів. Четверта – виробництво стійких до седиментації нанодисперсних гідрозолей біологічно активних металів (Ag, Cu, Zn, Fe, Mg, Mn, Mo, Co) [15, 16] для застосування у рослинництві [17] і тваринництві [18].

Процес відбувається наступним чином. Внаслідок підведення від генератора розрядних імпульсів електричної енергії до зануреного в робочу рідину ШМГ в ньому починає протікати струм. Умови в контактах між гранулами швидко та певною мірою стохастично змінюються навіть протягом одного розрядного імпульсу, що призводить до розгалуження і міграції каналів протікання струму у ШМГ, напрямком яких визначається найменшим електричним опором кола, а не найкоротшою відстанню між електродами. У ШМГ, як правило, одночасно існують декілька паралельних шляхів протікання струму від одного електрода до іншого.

За умов низьких значень амплітуди імпульсів розрядної напруги (до ≈ 40 В) плазмові канали між поверхнями гранул не виникають. У цьому випадку струм між гранулами протікає через робочу рідину, яка характеризується низькою іонною провідністю, або через омичні контакти з низьким опором між гранулами, що відбувається рідше. При подальшому підвищенні амплітуди імпульсів напруги між деякими парами гранул починають утворюватись спочатку стримерні, а згодом і іскрові канали.

Подальше підвищення напруги розрядних імпульсів призводить до збільшення кількості як послідовно, так і паралельно включених плазмових каналів у ШМГ. При усередненій амплітуді імпульсів напруги більше ≈ 36 В на кожний послідовно включений контакт між гранулами, плазмові канали виникають в напрямку від електрода до електрода у всьому ШМГ. У робочих режимах зазвичай амплітуда імпульсів напруги в середньому не перевищує 20 В на кожний послідовно включений контакт. Тривалість імпульсів складає від одиниць до десятків мікросекунд, а середня за цей час потужність – від десятків до сотень кіловат.

В залежності від низки умов [19], частина стримерних каналів еволюціонує у іскрові, а решта зупиняється на передіскрових стадіях стримера або лідера [20]. Однією з суттєвих відмінностей стримерно-лідерних каналів від іскрових є на порядки менші значення енергії, яка в них виділяється [20, 21]. Як наслідок, ерозійні частинки металів, що утворюються в результаті дії стримерів або лідерів найчастіше мають розміри від десятків до сотень нанометрів [16], а ті, що утворюються в результаті дії іскор – від одиниць до десятків мікрометрів [10]. Примусове обмеження еволюції більшості плазмових каналів передіскровими стадіями за допомогою спеціальних заходів [15, 16, 22] дозволило на базі більш ранніх іскроерозійних технологій створити нові – плазмоерозійні, зокрема, третьої та четвертої груп. Їхні енерго- та матеріалоефективність багато в чому залежать від співвідношення стримерно-лідерних та іскрових каналів у ШМГ.

Дотепер у більшості випадків це співвідношення контролювалось опосередковано вимірюванням амплітуди і тривалості імпульсів розрядного струму в усьому ШМГ [22], який є сумою всіх розгалужень розрядних струмів у проміжку між електродами. Але даний метод не враховує зміни протягом розрядного імпульсу кількості плазмових каналів у ШМГ і площини їхніх поперечних перерізів, внаслідок чого не дає вичерпної інформації щодо густини струму в них. Тому він недостатній для контролю зазначеного вище співвідношення. Додатково використовується візуальне спостереження плазмових каналів оператором процесу без використання спеціальних приладів, але воно носить

суб'єктивний характер і не є достатньо точним. Отже, нагальною і важливою задачею є пошук об'єктивних і достатньо точних методів контролю співвідношення стримерно-лідерних та іскрових каналів у ШМГ.

Метою статті є розроблення методу об'єктивного оптичного визначення об'ємів стримерно-лідерних та іскрових складових плазмових каналів у ШМГ під час їх іско- та плазмоерозійного оброблення, відношення цих об'ємів, а також спрощення методу спектрометричного дослідження елементного складу оточуючої плазмовий канал парогазової фази та робочої рідини та домішок в ній для деяких металів і робочих рідин шляхом аналізу результуючого відтінку випромінювання. Ці методи є новими при оперативному контролі електротехнологічних процесів іско- та плазмоерозійного оброблення ШМГ і дозволяють більш точно прогнозувати гранулометричний і хімічний склади ерозійних частинок ще на етапі їх отримання. Розроблення законів регулювання розподілів ерозійних частинок за розмірами з використанням результатів аналізу зазначених об'ємів елементів плазмових каналів та їх відношення у якості інформаційних параметрів, а параметрів розрядних імпульсів у якості керуючих, та створення систем автоматичного регулювання з їх залученням дозволить у майбутньому підвищити точність керування властивостями ерозійних частинок.

Методика експериментів, обладнання, режими і матеріали. Об'єктами досліджень були плазмові канали у занурених у дистильовану воду шарах гранул алюмінію та срібла. Експерименти проводились на лабораторній установці іско- та плазмоерозійного оброблення ШМГ, функціональну схему якої представлено на рис. 1. До складу установки входили: тиристорний генератор розрядних імпульсів (Discharge pulse generator, позначено DPG), блок керування генератором (Control unit, CU), розрядна камера (РК) із зануреним у робочу рідину ШМГ (Discharge chamber, DCham), вібраційний стіл (Vibration bench, VB), на якому вона знаходилась, запам'ятовуючий осцилограф С8-17 (Oscilloscope, Osc), подільник напруги 1:10 (Voltage probe, VProbe), височастотний вимірювальний трансформатор струму (Current probe, CProbe), веб-камера (Webcam, WCam), підключена до персонального комп'ютеру (Personal computer, PC).

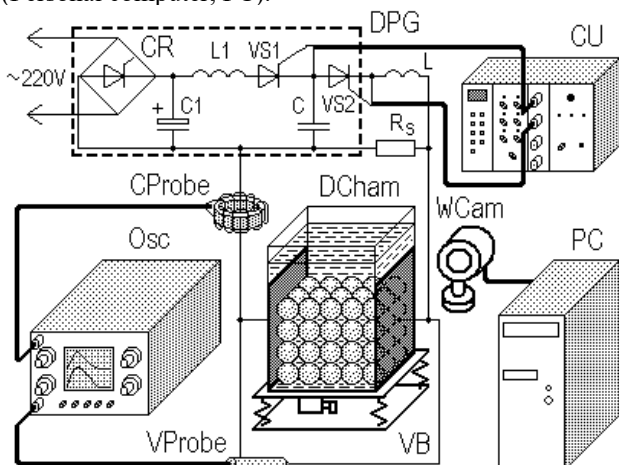


Рис. 1. Функціональна схема лабораторної установки

Генератор живиться від однофазної мережі напругою 220 В частотою 50 Гц (220V). Напруга мережі

випрямлялась, регулювалась та стабілізувалась керованим тиристорно-діодним випрямлячем (Controlled rectifier, CR) та фільтрувалась від змінної складової конденсатором С1.

Робочий конденсатор С заряджався до майже подвійної напруги конденсатора фільтру С1 по команді блока керування генератором через зарядний контур з добротністю більше 20, до якого входили тиристор VS1 та дросель L1. Напруга заряду робочого конденсатора С, ємність якого в наших дослідах була 100 мкФ, регулювалась за рахунок регулювання напруги на конденсаторі фільтру С1. Після закінчення процесу заряду та закриття тиристора VS1 природнім шляхом, за наступною командою блока керування відкривався розрядний тиристор VS2. Напруга робочого конденсатора через VS2 та з'єднувальний кабель індуктивністю L, яка в наших дослідах була ≈ 2 мкГн, прикладалась до розрядної камери, де спричиняла виникнення плазмових каналів у ШМГ. Після закінчення розряду, за командами блока керування починався заряд наступного циклу слідування імпульсів.

Розрядний струм майже завжди був аперіодичним. Через стохастичне зменшення еквівалентного електричного опору ШМГ могли виникати коливальні розряди, але у наших дослідах вони майже не спостерігались. Більш небезпечним для таких тиристорних генераторів (рис. 1) є стохастичне збільшення опору ШМГ, в результаті якого в ньому протікає струм, що незначно перевищує струм утримання розрядного тиристора VS2. Якщо тривалість процесу розряду в таких умовах перевищуватиме тривалість паузи між розрядним та зарядним імпульсами, то може виникнути ситуація, коли розрядний тиристор VS2 ще не закрився, а зарядний VS1 вже відкрився. Тобто може виникнути ситуація, коли всі тиристори будуть відкриті тривалий час і у навантаження потрапить не тільки енергія конденсатора С, а і майже вся енергія конденсатора С1, а у найгіршому випадку ще і енергія мережі живлення, струм якої буде обмежений лише параметрами дроселя L1 та навантаження.

Такі режими можуть викликати не тільки перевантаження за струмом тиристорів генератора, а і сплавлення металевих гранул в РК між собою, що унеможливить подальший процес їхнього оброблення. Для запобігання цим режимам паралельно навантаженню підключено резистивний шунт R_S на рис. 1. У наших дослідах його опір становив 3 Ом, що забезпечувало майже повний розряд робочого конденсатора С і закриття тиристора VS2 природнім шляхом до приходу наступного зарядного імпульсу, незважаючи на стохастичні збільшення опору ШМГ. Частота слідування імпульсів у цих експериментах становила 50 Гц.

Більш детально роботу лабораторного обладнання іско- та плазмоерозійного оброблення ШМГ, на якому проводились експерименти з гранулами алюмінію описано у [23], а з гранулами срібла – у [16]. Гранули алюмінію марки А7Е були квазікульової форми діаметром ≈ 4 мм, а їхня поверхня попередньо пройшла іскрову електроерозійну обробку. Відстань між вертикальними алюмінієвими електродами марки АД0 у розрядній камері №1 складала 52 мм. Висота ШМГ – 30 мм, ширина – 22 мм. Проток води у цьому випадку був направлений знизу догори і складав ≈ 12 мл/с, що забезпечувало стабільність процесу і виніс ерозійних частинок з активної зони РК. До ШМГ

застосовувалась примусова вібраційна активація [15] із частотою ≈ 90 Гц. Оскільки еквівалентний електричний опір ШМГ швидко змінюється навіть протягом одного розрядного імпульсу, а тим більше від імпульсу до імпульсу [24], то амплітудні значення напруги на ШМГ та струму в ньому, а також сумарна тривалість мод розрядних імпульсів помітно змінювались, і говорити можна лише про приблизні усереднені значення цих параметрів. Для ШМГ алюмінію вони становили 220 В, 180 А та 100 мкс відповідно.

Шматочки срібла проби 999 були неправильної форми. Вони відкушувались гострозубцями з листа товщиною 3 мм так, щоб розмір сторін був від 3 до 7 мм. Їхня поверхня була попередньо оброблена іскровою ерозією. Висота їх шару у РК №2 з вертикальними срібними електродами складала 6 мм, ширина 120 мм, а відстань між електродами – 60 мм. Проток води у цій серії експериментів був відсутній. Частота примусової вібраційної активації ШМГ у цьому випадку складала ≈ 40 Гц. Усереднені значення тривалості імпульсів становили 30 мкс, амплітуди їхньої напруги 130 В, а струму 120 А.

За відсутності складного коштовного спеціалізованого і не дуже поширеного оптичного обладнання, такого як монохроматор (наприклад МДР-2), фотоелектронний помножувач (наприклад ФЭУ-106), швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач та ін. [25], оптичні дослідження проводились з використанням звичайної побутової веб-камери (WebCam на рис. 1) з посередніми характеристиками (матриця 640 на 480 пікселів). Отримані за її допомогою зображення проєкцій стримерно-лідерних та іскрових каналів запам'ятовувались на ПК (PC на рис. 1), а потім аналізувались за допомогою спеціалізованої програми TopView фірми TopTek [26], яка є у вільному доступі і призначена для роботи з цифровими оптичними камерами мікроскопів і телескопів. Програма має широкий функціонал і, що важливо для наших досліджень, дозволяє збільшувати зображення до 1600 %, апроксимувати зображення об'єктів низкою геометричних фігур, параметри яких можна налаштовувати, а також вимірювати і розраховувати такі їхні показники як площа, периметр, довжина осей та ін. [27]. В останній на момент написання статті версії програми TopView 4.11.19728 від 22.10.2021 р. присутня опція побудови еліпсів за трьома точками, яка є дуже зручною і дозволяє швидко і достатньо точно апроксимувати елементи зображення. Програма автоматично вимірює довжину їхніх осей, за якими потім розраховувались значення об'ємів відповідних еліпсоїдів обертання, якими апроксимувались області з кольоровим випромінюванням та іскрові канали білого кольору.

Спектральний аналіз стримерно-лідерних та іскрових каналів між гранулами алюмінію у воді. Фотографію плазмових каналів між поверхнями занурених у дистильовану воду гранул алюмінію в РК №1 у темряві (для збільшення контрасту зображення) представлено на рис. 2.

Як бачимо, переважна більшість каналів має ядро білого кольору і кольоровий ореол, у даному випадку, синьо-фіолетовий. Одним із якісних критеріїв відмінності іскрових каналів від стримерних та лідерних є суцільний спектр їхнього випромінювання білого кольору. Саме такий спектр випромінювання зумовлений високими температурою (порядку 10000 К) і тиском (порядку 100 МПа) в іскрових каналах в таких процесах, про що пишуть дослідники [6].

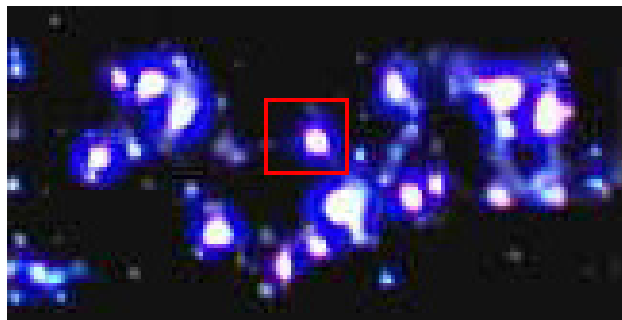


Рис. 2. Плазмові канали у шарі гранул алюмінію

Температура стримерно-лідерних каналів і тиск у них на порядки менші. Основна частина їх випромінювання спричинена переходами електронів у збуджених атомах на нижчі орбіталі, що зумовлює лінійчатий кольоровий спектр. Це дозволяє проводити спектральний аналіз хімічного складу збуджених атомів у таких каналах та поблизу них і робити припущення щодо хімічних реакцій, які можуть протікати в таких умовах.

Виникнення ореолу з кольоровим випромінюванням може відбуватися за трьома основними механізмами. Згідно з першим, джерелом збудження електронів атомів парогазової або рідкої фази речовин, які оточують іскрові ядра, може бути ультрафіолетове випромінювання іскрового ядра. Тобто, випромінювання ореолу є вторинним, індукованим внаслідок більш високоенергетичного випромінювання ядра [28]. На користь цього механізму свідчать наступні факти: 1) майже всі ореоли мають іскрове ядро і майже всі іскрові ядра оточені кольоровими ореолами; 2) у переважній більшості випадків ореоли розташовані навколо іскрових ядер квазірівномірно з усіх боків.

Згідно з другим механізмом, причиною збудження атомів навколо іскрового ядра є їхні зіткнення з швидкими електронами та іонами у стримерно-лідерних лавинах [29]. Навіть у гомогенному газовому діелектрику стримери і лідери розповсюджуються зигзагоподібним шляхом, який забезпечує найменше падіння електричної напруги на ньому [30]. Такий шлях розповсюдження електронних та іонних лавин стримерів і лідерів тим більше характерний для гетерогенних діелектриків. Допоки один з лідерів не еволюціонує у іскровий канал, вони можуть багаторазово виникати, змінювати положення у просторі та навіть зникати за відносно великий проміжок часу (порядку 30 мс), протягом якого повільна цифрова камера побутового призначення фіксує кадр. Завдяки міграції та розгалуженості стримерів і лідерів, об'єм, який вони пронизують за цей час, як правило, більший об'єму іскрового каналу. На користь цього механізму свідчить той факт, що не спостерігається строгої просторової симетрії ореолу відносно ядра.

Згідно з третім механізмом, іонізація атомів відбувається у електричному полі високої напруженості, особливо поблизу ерозійних частинок металів у робочій рідині, яка має порівняно низьку питому електропровідність, та мікровиступів на поверхні металевих гранул, як це відбувається у діелектриках поблизу включень з більшою електропровідністю [31, 32]. Очевидно, цей механізм іонізації є первинним та може приводити до виникнення двох розглянутих вище. На нашу думку, в тій або іншій мірі у розглянутих умовах присутні всі три механізми іонізації або збудження атомів. Тобто,

другий механізм має місце бути у статистично значущій кількості випадків. Тоді логічно припустити, що об'єм та інтенсивність випромінювання кольорових ореолів пов'язані з енергією, яка виділяється саме у стримерних та лідерних каналах і розподіл їхніх об'ємів може корелювати з розподілом за розмірами нанорозмірної фракції ерозійних частинок металів.

Якщо ж переважає перший механізм збудження або іонізації атомів, то об'єм та інтенсивність випромінювання кожного кольорового ореолу будуть пропорційні енергії, яка виділяється у відповідному іскровому ядрі. У цьому разі відношення об'ємів ореолів до об'ємів ядер не буде суттєво змінюватись і для прогнозу розподілу ерозійних частинок металів за розмірами буде достатньо лише аналізу розподілу об'ємів іскрових ядер.

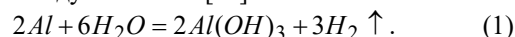
Для спектрометричного аналізу випромінювання ореолів потрібно відповідне обладнання, здатне точно визначати довжину всіх хвиль випромінювання, що дозволяє ідентифікувати атоми за їх спектральними лініями, зіставляючи їх із довідковими даними [33]. Але наближений спектральний аналіз за результатом відтінком найбільш яскравих ліній випромінювання також може надати певну інформацію щодо переважаючих атомів у збудженому стані та дозволяє передбачити можливі хімічні реакції за їх участю.

У загальному випадку збуджені електрони нейтральних атомів алюмінію (Al) і його іонів (Al^+ та Al^{2+}), а також молекул його сполук, наприклад, оксиду (Al_2O_3), повертаються на свої орбіталі, випромінюють фотони в ультрафіолетовому та видимому діапазонах спектра електромагнітних хвиль [33–38]. Як свідчить аналіз наукових публікацій, найбільша інтенсивність випромінювання (у порядку її зменшення в різних експериментах) спостерігається для хвиль наступної довжини: 396,15, 394,4, 308,21, 309,27 і 309,28 нм для Al (у літературі зі спектрометрії прийнято позначати $Al I$) [34–37], 466,4 499,8, 484,5, 487, 489, 467, 470, 472, 456 і 474 нм для Al^+ (прийнято позначати $Al II$) [34], 510,5, 508, 512,5, 514,5, 516, 519 та 520,5 нм для Al_2O_3 (прийнято позначати $AlO I$) [35] та 451,3 нм для Al^{2+} (прийнято позначати $Al III$) і 358,7 нм для Al^+ [38].

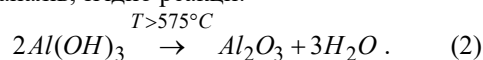
Описані в літературі об'єкти дослідження емісійних спектрів та умови проведення експериментів були наступними. У [34] – плазмові утворення, що виникали в атмосфері водню з тиском 13,3 кПа внаслідок опромінювання алюмінієвої пластинки неодимовим лазером із густиною потужності 300 ГВт/см². У [35] – полум'я горіння у потоці повітря частинок алюмінію із середнім діаметром 4,2 мкм. Плазмові канали у сильних водних електролітах H_3BO_3 і $Na_2B_4O_7$ [36] та KOH і Na_2SiO_3 [37] в процесах плазмоелектролізного анодування алюмінію. У [38] – плазмові утворення, що виникали внаслідок бомбардування алюмінієвої мішені іонами He^+ з енергіями порядку 10 кеВ у вакуумі 10⁻⁶ Па.

Нанопористий Al_2O_3 внаслідок дії випромінювання ближнього ультрафіолетового діапазону [39] або електричних струмів плазмових каналів у ньому здатний до люмінесцентного випромінювання у відносно широкому діапазоні довжини хвиль, приблизно від 380 до 500 нм (за рівнем половини максимального значення) [40, 41]. Це випромінювання може тривати на декілька сотень мікросекунд довше, ніж дія збуджуючого його фактору [42].

Електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі приблизно від 390 до 440 нм око людини інтерпретує як фіолетовий колір, від 440 до 480 – як синій, а від 480 до 510 – як блакитний [43]. Тобто, переважна більшість релаксаційного випромінювання Al , Al^+ , Al^{2+} та Al_2O_3 утворює світло синього і фіолетового кольорів і лише незначна його частинка утворює блакитне світло, або належить до ультрафіолетового діапазону. Тому ореоли на рис. 2 мають синьо-фіолетове забарвлення, що непрямо свідчить про наявність у плазмових каналах та у безпосередній близькості до них іонів алюмінію, його атомів та їх сполук, насамперед, оксиду і гідроксиду. Зважаючи на те, що процеси відбуваються у воді, найімовірніше протікають хімічні реакції утворення гідроксиду алюмінію [13]:



Це можливо лише за умов руйнування поверхневої оксидної плівки, наприклад, під дією електричної енергії. Після утворення гідроксиду алюмінію за реакцією (1), можливі процеси подальшого зневоднення його невеликої частини під дією високої температури плазмових каналів, згідно реакції:



Оскільки, у описаних процесах відбувається утворення гідроксиду і оксиду алюмінію відповідно до реакцій (1) і (2), також присутнє ультрафіолетове випромінювання іскрових ядер, то люмінесцентне випромінювання, описане в [39–41] також має місце.

Розроблення методу оптикометричного аналізу співвідношення об'ємів кольорових ореолів та іскрових каналів у ШМГ. Форма більшості плазмових каналів між двома сферичними металевими електродами у відсутності інших неоднорідностей з усіх відомих стереометричних тіл, геометричне місце точок поверхні яких легко описується аналітично, найбільше нагадує еліпсоїд [20, 44]. В силу однаковості умов у однорідних середовищах, цей еліпсоїд може бути еліпсоїдом обертання навколо осі, яка співпадає з результирующим напрямком протікання струму від одного електрода до іншого. Хоча в ШМГ плазмові канали між їхніми поверхнями не завжди мають правильну і симетричну форму, з певним наближенням їх також можна представити еліпсоїдами обертання еквівалентного об'єму.

Оскільки розміри РК достатньо малі для суттєвого затухання випромінювання плазмових каналів у робочій рідині, а стінки РК №1 із органічного скла і РК №2 з поліетилену достатньо тонкі і прозорі у видимій частині спектру електромагнітного випромінювання, то можна вважати, що на фотознімках відображаються повні проекції як яскравого іскрового ядра, так і тьмяного кольорового ореолу навколо нього, імовірно спричиненого стримерно-лідерними каналами. Для визначення об'єму еліпсоїда обертання V_r достатньо знати лише довжину його півосі обертання o_r та довжину однієї з двох інших рівних між собою півосей o_p : $V_r = 4\pi o_r o_p^2 / 3$. Це дуже доречно, оскільки для визначення довжини усіх трьох півосей еліпсоїда у загальному випадку необхідно мати синхронізовані у часі мінімум два його знімки у різних (бажано ортогональних) проекціях, що однією камерою без додаткових дзеркал або призм зробити неможливо.

Проекцією еліпсоїда на будь-яку площину є еліпс. Камера розташована так, щоб напрямки результируючих

струмів в усіх вертикальних шарах гранул знаходились у площинах, паралельних площині її зображення. Це створює умови для того щоб на переважній більшості зображень плазових каналів осі еліпсоїдів еквівалентного об'єму відображались у натуральну величину без спотворень. Оскільки напрямок протікання струмів у локальних елементах ШМГ визначається не найкоротшою геометричною відстанню між електродами РК, а найменшим електричним опором цих елементів, то існує імовірність, що він може бути розташований під кутом до площини знімку.

Позначимо кути між площиною знімку та піввіссю обертання такого еліпсоїда α , а між цією площиною і однією з двох інших його півосей β . Тоді довжина проєкцій цих півосей на площину зображення становитиме $o'_r = o_r \cdot \cos \alpha$ та $o'_p = o_p \cdot \cos \beta$ відповідно. Розрахований за проєкціями півосей об'єм іскрового ядра, апроксимованого таким еліпсоїдом, становитиме $V_S = 4\pi \cdot o'_{rs} \cdot o'_{ps}{}^2 / (3 \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \beta)$. Якщо напрямки відповідних осей еквівалентних еліпсоїдів іскрового ядра o_{rs} і o_{ps} та кольорового ореолу o_{rl} і o_{pl} співпадають, то його об'єм буде $V_L = 4\pi(o'_{rl} \cdot o'_{pl}{}^2 - o'_{rs} \cdot o'_{ps}{}^2) / (3 \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \beta)$. Відношення об'ємів еквівалентних еліпсоїдів ореолу і ядра у цьому випадку становитиме $V_L/V_S = (o'_{rl} \cdot o'_{pl}{}^2) / (o'_{rs} \cdot o'_{ps}{}^2) - 1$. Отже, якщо аналізувати відношення об'ємів, а не їх абсолютні значення, то за описаних вище припущень кути нахилу осей еліпсоїдів обертання еквівалентного об'єму до площини зображення не мають значення. Також у цьому випадку не мають значення одиниці вимірювання довжини (пікселі або міліметри), а замість довжини півосей можливо використовувати довжину осей, оскільки їх коефіцієнти 0,5 взаємно скорочуються, що зручно для роботи з програмою *TopView*, яка вимірює довжину осей, а не півосей еліпсів.

Відкритим залишається питання яка з двох осей еліптичної проєкції є проєкцією вісі обертання еліпсоїда. Якщо відстань між електродами значно перевищує розмір нерівностей на їх поверхні, то з більшою імовірністю саме більша вісь є віссю обертання еліпсоїда і він є видовженим. Якщо ж відстань між електродами співмірна з розміром нерівностей на їх поверхні, то з більшою імовірністю менша вісь є віссю обертання еліпсоїда і він є сплюснутим. Оскільки у верхній частині ШМГ тиск на гранули менший, там підвищується імовірність появи плазових каналів, форма яких нагадує видовжений еліпсоїд обертання, а у нижній частині ШМГ, навпаки – сплюснутий. Отже, в описаних умовах можливі обидва варіанти, тому слід знайти відповідні відношення як для видовжених (індекс 1), так і для сплюснутих (індекс 2) еліпсоїдів обертання.

Одним з чинників, який істотно впливає на масу та розміри ерозійних частинок металів є енергія окремих плазових каналів, яка витрачається на нагрівання, розплавлення, випаровування та евакуацію металу із зон гранул, які безпосередньо контактують із плазовими каналами [13]. У стримерно-лідерних каналах ця енергія на порядки менша, ніж у іскрових [20]. Тому маса і розміри ерозійних частинок, отриманих внаслідок дії стримерно-лідерних каналів на порядки менші, ніж частинок, отриманих внаслідок дії іскрових каналів. Об'єм каналів, їхня яскравість та час існування пов'язані з енергією, що в них виділяється. Збільшення об'ємів і яскравості каналів призводить

до збільшення кількості, а в деяких випадках і розмірів ерозійних частинок. Тому збільшення кількості і розмірів стримерно-лідерних каналів призводить до збільшення кількості субмікронних ерозійних частинок, а відповідне збільшення іскрових каналів – до збільшення кількості частинок з розмірами одиниці – десятки мікрометрів. Відповідно відношення об'ємів стримерно-лідерних та іскрових каналів впливає на відношення кількості субмікронних ерозійних частинок до ерозійних частинок більших розмірів.

Зменшуючи розміри іскрових каналів, які мають білий колір випромінювання, можна зменшити кількість, а в деяких випадках і розміри більш крупних ерозійних частинок. Однак, слід пам'ятати, що продуктивність процесу їх отримання також зменшиться. Збільшуючи розміри кольорових стримерно-лідерних каналів, можна збільшити кількість дрібних субмікронних ерозійних частинок. Збільшення відношення об'ємів стримерно-лідерних каналів до іскрових сприяє збільшенню частки субмікронних ерозійних частинок.

Енергія окремих плазових каналів залежить від прикладеної до них напруги $u_1(t)$, їх електричного опору $r_1(u_1(t))$, який також залежить від неї, та часу їх існування τ_1 і може бути обчислена за формулою:

$$E_1 = \int_0^{\tau_1} [u_1^2(t) / r_1(u_1(t))] dt \quad (3)$$

Як показала практика, при іскроерозійній обробці ШМГ параметром, який найбільше впливає на розміри, яскравість і кількість іскрових каналів є напруга розрядних імпульсів. Тому керування енергією (3), яскравістю і об'ємами стримерно-лідерних та іскрових каналів, а також відношенням їхніх об'ємів в цих режимах відбувається, перш за все, за допомогою напруги розрядних імпульсів. Керування цими параметрами за допомогою тривалості розрядних імпульсів (змінюючи ємності робочого конденсатора в тиристорних генераторах або часу відкритого стану ключа у транзисторних генераторах) при іскроерозійній обробці менш ефективно. У випадку плазмоерозійної обробки ШМГ напруга розрядних імпульсів підтримується мінімально можливою для усталеного процесу і регулюванню майже не підлягає. Тому у даному випадку більш дієвим параметром регулювання об'ємів стримерно-лідерних та іскрових каналів, а також їх відношення є тривалість розрядних імпульсів.

Один із плазових каналів розміру близького до середньостатистичного на рис. 2 виділено червоним прямокутником. Цю ділянку знімку у збільшеному масштабі (800 % у *TopView*) представлено на рис. 3. Апроксимацію проєкції іскрового ядра на рис. 3 представлено червоним еліпсом і позначено E1. Довжина його осей 6 та 5 пікселів (px) автоматично розрахована у програмі *TopView* і представлена на рис. 3. Апроксимацію проєкції кольорового ореолу на рис. 3 представлено еліпсом кольору фуксії і позначено E2. Довжина його осей складає 14 та 12 пікселів. Хрестиками відповідних кольорів на рис. 3 позначено характерні точки, за якими програма *TopView* будувала ці еліпси.

У гіпотезі видовжених еліпсоїдів відношення об'ємів ореолу і ядра становить $V_{L1}/V_{S1} = (14 \cdot 12^2) / (6 \cdot 5^2) - 1 \approx 12,44$, а у гіпотезі сплюснутих: $V_{L2}/V_{S2} = (12 \cdot 14^2) / (5 \cdot 6^2) - 1 \approx 12,07$. Оскільки, у даному конкретному випадку довжина великої і малої осей

кожного еліпсоїда відрізняються незначно, отримані у різних гіпотезах результати майже співпадають. Для точного визначення енергії, яка виділяється в ядрі і ореолі необхідно знати розподіли густини потужності в їхніх об'ємах, залежність їх від часу та тривалість існування каналів. Для таких досліджень необхідна більш складна апаратура. Тут ми можемо лише якісно оцінити співвідношення енергій кольорового ореолу, імовірно спричиненого стримерами, та іскрового ядра, виходячи з відношення їх об'ємів та яскравості.

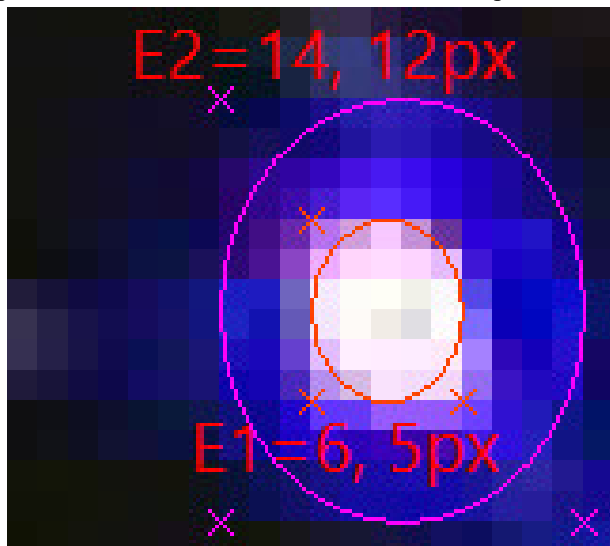


Рис. 3. Плазмовий канал між гранулами алюмінію

Можлива ситуація, коли деякі плазмові канали не мають іскрового ядра, а цілком складаються з стримерно-лідерних ореолів, або дуже яскраві іскрові ядра майже не мають стримерно-лідерних ореолів. Тоді є сенс визначити окремо суми об'ємів всіх представлених на знімку стримерно-лідерних ореолів та іскрових ядер, а потім знайти їх відношення.

Розроблений метод полягає у вимірюванні об'ємів кольорових ореолів та іскрових ядер плазмових каналів у ШМГ за зображеннями їхніх проєкцій та залученням спеціалізованого програмного забезпечення і знаходження їх відношень. Отримана інформація використовується для прогнозів розподілів за розмірами ерозійних частинок металів, в тому числі співвідношення їхніх нано- та мікророзмірних фракцій та корекції їхніх властивостей під час процесу отримання шляхом регулювання напруги і тривалості розрядних імпульсів.

Аналіз параметрів кольорових ореолів та іскрових каналів між гранулами срібла у воді. Один з характерних плазмових каналів у ШМГ срібла у масштабі 250 % представлено на рис. 4. На відміну від попереднього знімку, цей знімок був зроблений в освітленій лабораторії, оскільки не тільки іскрове ядро, а і кольоровий ореол у цьому випадку були достатньо яскравими і не потребували темряви для їх фотографування. Як і у дослідях з ШМГ алюмінію, проєкція яскравого іскрового ядра на рис. 4 апроксимована червоним еліпсом з довжиною осей 22 і 17 пікселів, який позначено E1. Апроксимація проєкції кольорового ореолу на рис. 4 представлена еліпсом кольору фуксії з довжиною осей 50 і 45 пікселів та позначена E2. Хрестиками відповідних кольорів позначено характерні точки, за якими програма TopView будувала ці еліпси.

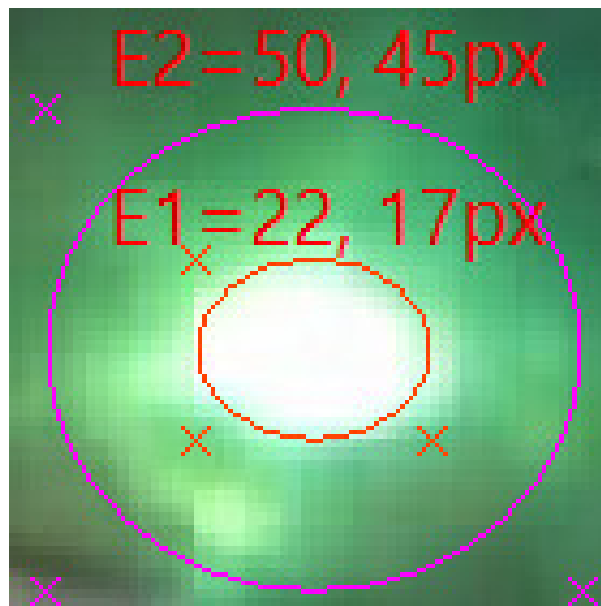
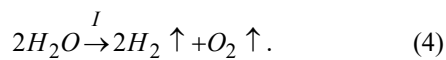


Рис. 4. Плазмовий канал між гранулами срібла

У гіпотезі видовжених еліпсоїдів відношення об'ємів ореолу і ядра у цьому випадку становить $V_{L1}/V_{S1}=(50 \cdot 45^2)/(22 \cdot 17^2)-1 \approx 14,92$, а у гіпотезі сплюснутих: $V_{L2}/V_{S2}=(45 \cdot 50^2)/(17 \cdot 22^2)-1 \approx 12,67$. У даному випадку отримані за різними гіпотезами результати відрізняються один від одного трошки більше, ніж у попередньому, оскільки різниці між довжиною осей еліпсоїдів також більші. Чим більше відношення об'єму кольорового ореолу до об'єму іскрового ядра, тим більше імовірність отримати ерозійні частинки металу менших розмірів, що у випадку срібла підвищує біоцидну активність гідрозолів на їх основі [15, 16].

Ореол плазмового каналу між гранулами срібла має зелений колір. Поблизу білого іскрового ядра – відтінку зеленої м'яти, а далі від нього – смарагдового відтінку, що може бути пов'язано із зменшенням інтенсивності білого випромінювання ядра з віддаленням від нього. В умовах підводного іскрового розряду між гранулами Ag найбільша інтенсивність випромінювання його нейтральних атомів (прийнято позначати Ag I) спостерігається на двох довжинах хвиль: 546,5 і 520,9 нм (переходи електронів з рівнів $5d^2D$ на рівні $5p^2P^0$) [45, 46]. В рази менша інтенсивність випромінювання збуджених нейтральних атомів Ag спостерігається також на довжинах хвиль 466,8 і 447,6 нм (переходи з $7s^2S$ на $5p^2P^0$) та на 768,8 і 827,4 нм (переходи з $6s^2S$ на $5p^2P^0$) [45, 46]. Також спостерігається випромінювання порівняно невеликої інтенсивності збуджених іонів срібла Ag^+ (позначається Ag II) на довжинах хвиль 540,01 нм (перехід з $4d^4f$ на $4d^5d$) і 489,13 нм (перехід з $4d^85s^2$ на $4d^95p$) [45].

У [45] описано, що спостерігаються також випромінювання порівняно невеликої інтенсивності з довжинами хвиль 656,3 нм, що належить першому (альфа) переходу серії Бальмера у атомах водню (H_α) та 777,42 нм, яка належить збудженим нейтральним атомам кисню ($O I$) [33]. Відомо, що молекулярний кисень на висотах від 80 до 150 км під дією сонячного вітру випромінює полярне сійво зеленого кольору з довжиною хвилі 557,7 нм [47]. На срібному аноді в результаті електрохімічного розкладання води під дією уніполярних розрядних імпульсів [48] утворюються молекули кисню, оскільки кисень не дуже активно реагує із сріблом:



Під дією електричних струмів і випромінювання іскрового ядра, електрони в молекулах кисню можуть переходити на більш високі енергетичні рівні, а після повернення з них – випромінювати фотони із зазначеною довжиною хвилі. Тобто, випромінювання з довжиною хвилі 557,7 нм може бути непрямим свідченням про існування або утворення молекул кисню у плазмових каналах, наприклад в результаті реакції (4).

Електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі приблизно від 510 до 550 нм око людини інтерпретує як зелений колір, а від 550 до 575 нм – як жовто-зелений [43]. Тобто, найбільш яскраві спектральні лінії випромінювання у ШМГ срібла утворюють відтінки саме зеленого результуючого кольору.

Спрощення методу спектральної оцінки плазми між гранулами низки металів у деяких робочих рідинах. При підвищенні амплітуди імпульсів напруги у ШМГ алюмінію до ≈ 400 В характер плазмових каналів між ними дещо змінюється. По-перше, лінійні розміри каналів збільшуються у 2–5 разів. По-друге, значно збільшуються сила світла і питомий розмір іскрового ядра, яке тепер займає майже весь об'єм плазмового каналу. По-третє, зовні іскрового ядра іноді додатково до синьо-фіолетового ореолу, а іноді замість нього, з'являється смужка ореолу блідо-лілового або блідо-рожевого відтінку. Імовірність її появи дещо підвищується у разі збільшення швидкості направленої знизу догори протоку води, що сприяє збільшенню середньої відстані між поверхнями сусідніх гранул.

Колір цього додаткового ореолу схожий на колір випромінювання збуджених атомів водню як у складі молекули газу H_2 , так і у складі молекули H_2O парів води, які утворюються в результаті нагрівання води плазмовими каналами. Цей колір визначається комбінацією випромінювання найбільш інтенсивних ліній серії Бальмера у видимій частині спектру з довжиною хвилі $H_\alpha=656,3$ нм червоного, $H_\beta=486,1$ нм блакитного, а також фіолетового кольорів: $H_\gamma=434,1$ нм, $H_\delta=410,2$ нм і $H_\epsilon=397,0$ нм. У разі співмірної інтенсивності всіх цих ліній результуючим буде блідо-ліловий відтінок, а у разі переваги інтенсивності лінії H_α – блідо-рожевий.

У проведених нами дослідах з іскроерозійного оброблення ШМГ низьколегованої сталі як у воді, так і в етанолі [49] за умов значень амплітуди імпульсів напруги більше 300 В навколо яскравого іскрового ядра плазмових каналів неозброєним оком спостерігався вузький блідо-жовтий ореол. До збільшення його розмірів і сили світла призводили підвищення енергії імпульсів, частоти їх повторення, а також швидкості потоку робочої рідини та інтенсивності продувки повітрям ШМГ, напрямок яких був знизу догори, що сприяло збільшенню середньої відстані між гранулами.

Спектральні дослідження випромінювання плазмових каналів у воді між гранулами заліза показали, що найбільш інтенсивні лінії випромінювання нейтральних атомів Fe (позначається $Fe I$) мають довжину хвилі у діапазоні від 560 до 590 нм [46, 50], що відповідає жовтому кольору (575–585 нм) та його відтінкам від жовто-зеленого (550–575 нм) до помаранчевого (585–620 нм) [43]. Також у випромінюванні присутні описані вище лінії $H_\alpha=656,3$ нм та $O I=777,1$ нм, та

група ліній малої інтенсивності з довжиною хвилі у діапазоні від 490 до 540 нм, які належать $Fe I$ [45, 50].

В процесах іскро- та плазмоерозійного отримання стійких до седиментації гідрозолів міді [15] нами спостерігалась вузька тьмяна смужка ореолу малахітово-нефритового відтінку зеленого кольору навколо іскрового ядра каналу. Спектральні дослідження випромінювання таких каналів показали, що найбільшу інтенсивність (у порядку її зменшення) мали лінії випромінювання нейтральних атомів Cu (позначається $Cu I$) з довжиною хвилі 521,8, 515,3, 510,5, 465,1, 529,3, і 458,6 нм [51], що відповідає короткохвильовій ділянці діапазону зеленого кольору (510–550 нм) і діапазону блакитного кольору (480–510 нм) [43]. Як і у випадку плазмових каналів у воді між гранулами деяких інших металів, присутні лінії H_α , H_β , $O I=777,41$ нм та лінії низької інтенсивності випромінювання $Cu I$: 570,0, 578,2, 793,3 і 809,2 нм [51], внесок яких у колір сумарного випромінювання несуттєвий.

Під час отримання нами іскроерозійних частинок сплавів з магнітною пам'яттю форми $Ni-Mn-Ga$ [1] та сорбуючих водень сплавів $Ti-Zr-Ni$ [7] у рідкому азоті спостерігались яскраві і великі у порівнянні з іскровим ядром ореоли плазмових каналів результуючого синьо-блакитно кольору, а у рідкому аргоні сплавів $Ti-Zr-Ni$ [7] – фіолетово-синього кольору меншої яскравості. У рідкому азоті найбільшу інтенсивність випромінювання мають лінії іонізованої молекули азоту N_2^+ (позначається $N_2 II$) з довжиною хвилі 391,4 та 427,8 нм [52, 53]. У порядку зменшення інтенсивності випромінювання далі ідуть спектральні лінії нейтральної молекули азоту N_2 (позначається $N_2 I$) з довжиною хвилі 394,3, 575,5, 470,9, 551,6 та 537,3 нм [54]. Також присутня серія спектральних ліній невеликої інтенсивності з довжиною хвилі у діапазоні від 457,4 до 470,9 нм [54], які око людини інтерпретує як синій колір [43].

У нейтральних атомах Ar (позначається $Ar I$) найбільшу інтенсивність випромінювання (у порядку її зменшення) мають лінії з довжиною хвилі 420,07, 415,86, 427,22, 419,83, 425,94, 430,01, 433,36, 426,63, 404,44, 418,19, 394,9, 416,42, 433,53, 434,52 та 425,12 нм [55]. Випромінювання цих ліній око людини інтерпретує як фіолетовий колір, довжина хвилі якого знаходиться у діапазоні від 390 до 440 нм [43]. У випромінюванні іонів аргону Ar^+ (позначається $Ar II$) у порядку зменшення інтенсивності випромінювання присутні лінії з довжиною хвилі 459,0, 472,7, 440,1, 501,7, 476,5, 461,0, 488,0, 427,8, 434,8, 480,6, 454,5 нм та ін. [56], які відповідають фіолетовому (390–440 нм), синьому (440–480 нм) і блакитному (480–510 нм) кольорам [43]. Результати спектральних досліджень узагальнено у табл. 1.

У першій колонці представлені атоми, іони та молекули хімічних елементів, які були присутні у плазмових каналах і мали спектральні лінії випромінювання помітної інтенсивності. У дужках наведені їхні позначення прийняті у спектроскопії. У другій колонці представлена довжина хвилі п'яти найбільш яскравих спектральних ліній випромінювання цих елементів. Більш повний перелік спектральних ліній випромінювання цих елементів наведено вище. У третій колонці представлено загально розповсюджену назву відтінку, який найбільше підходить кольору




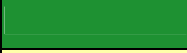





результуючого випромінювання на суб'єктивну думку авторів, а також приблизний діапазон довжини хвиль випромінювання основних кольорів цього відтінку.

Приблизний вигляд відтінку випромінювання представлено у четвертій колонці. На відтінок результуючого випромінювання впливає багато факторів: яскравість іскрового ядра плазмових каналів і віддалення точки спостереження від нього, ступінь і частотна залежність поглинання випромінювання робочою рідиною і

матеріалом стінок розрядної камери, відбиття ними зовнішнього освітлення, його спектр і яскравість та ін. Крім того, на вигляд відтінку на екрані монітора також впливають його налаштування (яскравість, контрастність, гамма-корекція, кольорова температура) та відповідні налаштування графічної карти. Наведені у табл. 1 приклади коректні для початкових значень налаштувань відео карти ноутбука Samsung R508, на якому вони були відтворені: гамма = 1, яскравість = 0, контрастність = 50.

Таблиця 1

Результати спектральних досліджень випромінювання ореолів плазмових каналів

Атом, іон, молекула	Довжина хвиль найяскравіших ліній λ , нм	Назва результуючого відтінку випромінювання	Приблизний вигляд відтінку	RGB-код відтінку
Al ($Al I$), Al^+ ($Al II$), Al^{2+} ($Al III$), Al_2O_3 ($AlO I$)	396,2, 394,4, 484,5, 466,4, 451,3	Синьо-фіолетовий (390–480 нм)		R=60, G=0, B=255
Ag ($Ag I$), Ag^+ ($Ag II$)	546,5, 520,9, 540,0, 489,1	Смарагдовий (510–550 нм)		R=75, G=170, B=90
		Зеленої м'яти (510–550 нм)		R=150, G=230, B=140
Cu ($Cu I$)	521,8, 515,3, 510,5, 465,1, 529,3	Малахітово-нефритовий (510–530 нм)		R=30, G=145, B=50
Fe ($Fe I$), Fe^+ ($Fe II$)	558,6, 557,2, 562,4, 576,3, 591,4	Блідо-жовтий (575–585 нм)		R=255, G=255, B=170
H ($H I$)	656,3, 486,1, 434,1, 410,2, 397,0	Блідо-ліловий (397–656 нм)		R=220, G=90, B=255
	656,3	Блідо-рожевий (656 нм)		R=255, G=195, B=195
N_2 ($N_2 I$), N_2^+ ($N_2 II$)	391,4, 427,8, 394,3, 575,5, 470,9, 551,6	Синьо-блакитний (440–510 нм)		R=100, G=150, B=255
Ar ($Ar I$)	420,1, 415,9, 427,2, 459,0, 472,7, 440,1	Фіолетово-синій (390–480 нм)		R=150, G=120, B=255

Для підвищення об'єктивності відтворення відтінків на різних пристроях у п'ятій колонці наведено їх RGB-код. Значення отримані за допомогою інструмента піпетка програми Photoshop для найбільш характерних ділянок кольорових ореолів на їх цифрових фотографіях. Якщо відтінки ореолів суттєво відрізнялись при віддаленні від іскрових ядер плазмових каналів, як у випадку Ag , або через зміну потужності та умов у локальних плазмових каналах, як у випадку H , то у четвертій і п'ятій колонках представлено два найбільш характерних відтінки та їхні RGB-коди відповідно.

Аналіз відтінку результуючого випромінювання значно простіший, ніж його спектрометричний аналіз, який потребує дорогого і складного вузькоспеціалізованого обладнання. Запропонований аналіз ґрунтується на отриманих раніше результатах спектрометричного аналізу випромінювання збуджених атомів конкретних металів та оточуючих їх робочих рідин в умовах, близьких до режимів їх іско- та плазмоерозійного оброблення.

Узагальнення та висновки.

1. Розроблено оптикометричний метод визначення об'ємів кольорових ореолів, імовірно спричинених стримерами, та іскрових ядер плазмових каналів між зануреними у робочу рідину гранулами металів та їхнього відношення, який не потребує спеціалізованого спектрометричного обладнання. Отримані значення свідчать про енергії стримерно-лідерних та іскрових каналів між гранулами металів та їхнє відношення, які впливають на розподіл за розмірами ерозійних частинок, в тому числі на співвідношення їх нано- та мікро-розмірних фракцій. Їхнє використання доцільне при коригуванні режимів іско- та плазмоерозійних елект-

ротехнологічних процесів з метою збільшення питомої частки ерозійних частинок необхідних розмірів.

2. У іскоерозійних технологіях найбільший вплив на розміри, яскравість і кількість іскрових каналів має напруга розрядних імпульсів, тому її використання для керування цими параметрами має першочергове значення порівняно з тривалістю розрядних імпульсів. У плазмоерозійних технологіях напруга розрядних імпульсів підтримується мінімально можливою для усталеного процесу і регулюванню майже не підлягає. Натомість основним параметром регулювання у цьому випадку стає тривалість розрядних імпульсів.

3. Обґрунтовано можливість спрощення спектрометричного методу аналізу плазми та оточуючої її парогазової фази у ШМГ за аналізом відтінку результуючого випромінювання, який базується на отриманих раніше спектрометричних даних.

4. Проведено аналіз спектрів випромінювання кольорових ореолів плазмових каналів у дистильованій воді між гранулами Al , Ag , Fe та Cu та $Ni-Mn-Ga$ та $Ti-Zr-Ni$ у рідкому азоті і $Ti-Zr-Ni$ у рідкому аргоні. Обґрунтовано і узагальнено відтінки результуючого випромінювання ореолів у цих випадках та наведено їх опис за RGB-кодами.

5. На основі аналізу спектрів випромінювання кольорових ореолів плазмових каналів у дистильованій воді, які спричинені електричним струмом, підтверджено протікання реакцій утворення газоподібного водню, а у випадку з гранулами срібла також і кисню в результаті електрохімічного розкладання води. При іскоерозійному диспергуванні гранул алюмінію у воді опосередковано підтверджено протікання хімічних реакцій утворення

його гідроксиду, а також невеликої частки оксиду під дією високих температур іскрових каналів.

Фінансування. Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (тема ДБ № 0121U107443).

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Ochin P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 738-739, pp. 451-455. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
- Monastyrsky G. Nanoparticles formation mechanisms through the spark erosion of alloys in cryogenic liquids. *Nanoscale Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 1, art. no. 503. doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1212-9>.
- Aur S., Egami T., Berkowitz A.E., Walter J.L. Atomic Structure of Amorphous Particles Produced by Spark Erosion. *Physical Review B*, 1982, vol. 26, no. 12, pp. 6355-6361. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.6355>.
- Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells. *Journal of Materials Research*, 2008, vol. 23, no. 06, pp. 1758-1763. doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>.
- Wang W., Zhu F., Weng J., Xiao J., Lai W. Nanoparticle morphology in a granular Cu-Co alloy with giant magnetoresistance. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 72, no. 9, pp. 1118-1120. doi: <https://doi.org/10.1063/1.120942>.
- Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 254-255, pp. 1-6. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00932-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00932-0).
- Kolbasov G.Ya., Ustinov A.I., Shcherba A.A., Perekos A.Ye., Danilov M.O., Vyunova N.V., Zakharchenko S.N., Hossbah G. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys. *Journal of Power Sources*, 2005, vol. 150, pp. 276-281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.02.025>.
- Jin C.H., Si P.Z., Xiao X.F., Feng H., Wu Q., Ge H.L., Zhong M. Structure and magnetic properties of Cr/Cr₂O₃/CrO₂ microspheres prepared by spark erosion and oxidation under high pressure of oxygen. *Materials Letters*, 2013, vol. 92, pp. 213-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.10.126>.
- Harrington T., McElfresh C., Vecchio K.S. Spark erosion as a high-throughput method for producing bimodal nanostructured 316L stainless steel powder. *Powder Technology*, 2018, vol. 328, pp. 156-166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.012>.
- Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders. *Journal of Materials Research*, 1987, no. 2, pp. 277-288. doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1987.0277>.
- Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, no. 3, pp. 823-829. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1635973>.
- Shen B., Inoue A. Fabrication of large-size Fe-based glassy cores with good soft magnetic properties by spark plasma sintering. *Journal of Materials Research*, 2003, vol. 18, no. 9, pp. 2115-2121. doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2003.0297>.
- Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Мазуренко І.Л., Куліда М.А. Фізичні і техніко-економічні аспекти сучасних методів підготовки води для теплової та атомної енергетики. *Технічна електродинаміка*, 2022, № 4, С. 69-77. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.069>.
- Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфіцирующее действие объемного электронно-искрового разряда в воде. *Химия и технология воды*, 1999, Т. 21, № 3, С. 328-336.
- Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Применение объемного электронно-искрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2009. Вип. 22, С. 74-79.
- Захарченко С.Н., Шидловская Н.А., Перекоз А.Е., Лопатько К.Г., Савлук О.С. Особенности получения плазмозерозонных нанодисперсных гидрозолей серебра, их бактерицидные и фунгицидные свойства. *Металлофізика та новітні технології*, 2020, Т. 42, № 6, С. 829-851. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.06.0829>.
- Batsmanova L., Taran N., Konotop Ye., Kalenska S., Novytska N. Use of a Colloidal Solutions of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer for Increasing Soybean Productivity. *Journal of Central European Agriculture*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 311-319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>.
- Youssef F.S., El-Banna H.A., Elzorba H.Y., Gabal A.M. Application of Some Nanoparticles in the Field of Veterinary Medicine. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 78-93. doi: <https://doi.org/10.1080/23144599.2019.1691379>.
- Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмозерозійних навантажень. *Технічна електродинаміка*, 2017, № 2, С. 5-12. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>.
- Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, Springer, 1991. 449 p.
- Lo A., Cessou A., Lacour C., Lecordier B., Boubert P., Xu D., Laux C.O., Vervisch P. Streamer-to-spark transition initiated by a nanosecond overvoltage pulsed discharge in air. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, vol. 26, no. 4, art. no. 045012. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa5c78>.
- Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозивной коагуляции при очистке водных сред. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, 2008, Ч. 2, С. 120-125.
- Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Technical Electrodynamics*, 2006, no. 2, pp. 10-14.
- Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Определение вероятностных свойств электрических характеристик цепей электроразрядных установок с учетом стохастически изменяющихся параметров. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 4, С. 3-11. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.003>.
- Шуайбов О.К., Малініна А.О., Грицак Р.В., Малінін О.М., Білак Ю.Ю., Гомокі З.Т., Ватрала М.І. Характеристики і параметри плазми перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами в аргоні. *Металлофізика та новітні технології*, 2021, Т. 43, № 12, С. 1683-1706. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1683>.
- ToupTek. Download. Режим доступу: <https://www.touptek.com/download> (Дата звернення: 15.03.2023).
- ToupTek. Download. Software Download. Help files for TouPCam camera. Режим доступу: <http://www.touptek.com/download/showdownload.php?lang=en&id=7> (Дата звернення: 15.03.2023).
- Medvedev N., Zastrau U., Forster E., Gericke D.O., Rethfeld B. Short-Time Electron Dynamics in Aluminum Excited by Femtosecond Extreme Ultraviolet Radiation. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, art. no. 165003. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.165003>.
- Kim S.J., Lee Y.S., Cho Ch.H., Choi M.S., Seong I.H., Lee J.J., Kim D.W., You Sh.J. Observation of prior light emission before arcing development in a low-temperature plasma with multiple snapshot analysis. *Scientific Reports*, 2022, no. 12, art. no. 20976. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25550-2>.
- Baranov M.I. A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 1, pp. 34-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05>.
- Щерба А.А., Щерба М.А., Перетятко Ю.В. Електрофізичні процеси деградації зшитої полетиленової ізоляції силових кабелів і самоутримних ізованих проводів за несинусоїдних напругах і струмах. *Технічна електродинаміка*, 2023, № 1, С. 3-6. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.03>.
- Берека В.О., Божко І.В., Кондратенко І.П. Вплив параметрів руху води на ефективність її обробки імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*, 2022, № 3, С. 62-68. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.062>.
- Zaidel' A.N., Prokof'ev V.K., Raiskii S.M., Slavnyi V.A., Shreider E.Ya. *Tables of Spectral Lines*. New York, Springer, 1970. 782 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1601-6>.

34. Parigger C.G., Hornkohl J.O., Nemes L. Measurements of aluminum and hydrogen microplasma. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 19, pp. 4026-4031. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.46.004026>.
35. Soo M., Goroshin S., Glumac N., Kumashiro K., Vickery J., Frost D.L., Berghthorson J.M. Emission and Laser Absorption Spectroscopy of Flat Flames in Aluminum Suspensions. *Combustion and Flame*, 2017, vol. 180, pp. 230-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.03.006>.
36. Sarvan M., Radić-Perić J., Kasalica B., Belča I., Stojadinović S., Perić M. Investigation of Long-duration Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum by Means of Optical Spectroscopy. *Surface & Coatings Technology*, 2014, vol. 254, pp. 270-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.029>.
37. Liu R., Wu J., Xue W., Qu Ya., Yang Ch., Wang B., Wu X. Discharge Behaviors During Plasma Electrolytic Oxidation on Aluminum Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 148, no. 1-2, pp. 284-292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.045>.
38. Qayyum A., Akhtar M.N., Riffat T. Light Emission from Sputtered Aluminum Atoms and Ions Produced by Ion Bombardment. *Radiation Physics and Chemistry*, 2005, vol. 72, no. 6, pp. 663-667. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.05.048>.
39. Stojadinovic S., Vasilic R., Petkovic M., Nedic Z., Kasalica B., Belca I., Zekovic Lj. Luminescence properties of oxide films formed by anodization of aluminum in 12-tungstophosphoric acid. *Electrochimica Acta*, 2010, vol. 55, no. 12, pp. 3857-3863. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.02.011>.
40. Staninski K., Piskula Z., Kaczmarek M. Photo- and electroluminescence properties of lanthanide tungstatedoped porous anodic aluminum oxide. *Optical Materials*, 2017, vol. 64, pp. 142-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.12.003>.
41. Stepniowski W.J., Norek M., Michalska-Domanska M., Bombalska A., Nowak-Stepniowska A., Kwasny M., Bojar Z. Fabrication of Anodic Aluminum Oxide with Incorporated Chromate Ions. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 259, pp. 324-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.043>.
42. Щербя А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул. *Стабилизация параметров электрической энергии*, 1991, С. 65-74.
43. *Abcibc.com*. Длины световых волн. Режим доступа: <http://abcibc.com/photo-reference-tables.php?art=19> (Дата звернення: 15.03.2023).
44. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, vol. 29, no. 10, art. no. 103001. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05>.
45. Ninyovskij V., Murmantsev A., Veklich A., Boretskij V. Plasma spectroscopy of electric spark discharge between silver granules immersed in water. *Energetika*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 107-114. doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v68i1.4862>.
46. Veklich A., Tmenova T., Zazimko O., Trach V., Lopatko K., Titova L., Boretskij V., Aftandilyants Ye., Lopatko S., Rogovskiy I. Regulation of Biological Processes with Complexions of Metals Produced by Underwater Spark Discharge. *Nanooptics and Photonics, Nanochemistry and Nanobiotechnology and Their Applications: Selected Proceedings of the 7th International Conference Nanotechnology and Nanomaterials (NANO2019)*, pp. 283-306. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52268-1_23.
47. *Aurora*. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora> (Дата звернення: 15.03.2023).
48. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Анализ электромагнитных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмозеронозной нагрузки при изменении их параметров в широких диапазонах. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 1, С. 87-95. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>.
49. Захарченко С.Н., Перекоз А.Е., Шидловская Н.А., Устинов А.И., Бойцов О.Ф., Войнаш В.З. Электроискровое диспергирование металлических материалов. I. Влияние скорости протока рабочей жидкости на дисперсность порошков. *Металлофізика та новітні технології*, 2018, Т. 40, № 3. С. 339-357. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.03.0339>.
50. Murmantsev A., Veklich A., Boretskij V. Optical emission spectroscopy of plasma of electric spark discharge between metal granules in liquid. *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 5231-5237. doi: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02744-8>.
51. Tmenova T.A., Veklich A.N., Boretskij V.F., Cressault Y., Valensi F., Lopatko K.G., Aftandilyants Y.G. Optical Emission Spectroscopy of Plasma Underwater Electric Spark Discharges Between Metal Granules. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 132-135.
52. Li S.-Y., Li S.-C., Sui L.-Z., Jiang Y.-F., Chen A.-M., Jin M.-X. Contribution of nitrogen atoms and ions to the luminescence emission during femtosecond filamentation in air. *Physical Review A*, 2016, vol. 93, no. 1, art. no. 013405. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.013405>.
53. Lianzhu Z., Shuxia Z., Xiulan M. Characterization of Nitrogen Glow Discharge Plasma via Optical Emission Spectrum Simulation. *Plasma Science and Technology*, 2008, vol. 10, no. 4, pp. 455-462. doi: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/10/4/11>.
54. Wang Z., Cohen S.A., Ruzic D.N., Goeckner M.J. Nitrogen atom energy distributions in a hollow-cathode planar sputtering magnetron. *Physical Review E*, 2000, vol. 61, no. 2, pp. 1904-1911. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.1904>.
55. Bogaerts A., Gijbels R., Vlcek J. Modeling of glow discharge optical emission spectrometry: Calculation of the argon atomic optical emission spectrum. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1998, vol. 53, no. 11, pp. 1517-1526. doi: [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(98\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(98)00139-6).
56. Saloman E.B. Energy Levels and Observed Spectral Lines of Ionized Argon, Ar II through Ar XVIII. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2010, vol. 39, no. 3, art. no. 033101. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3337661>.

REFERENCES

1. Ochinnikov P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 738-739, pp. 451-455. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
2. Monastyrsky G. Nanoparticles formation mechanisms through the spark erosion of alloys in cryogenic liquids. *Nanoscale Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 1, art. no. 503. doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1212-9>.
3. Aur S., Egami T., Berkowitz A.E., Walter J.L. Atomic Structure of Amorphous Particles Produced by Spark Erosion. *Physical Review B*, 1982, vol. 26, no. 12, pp. 6355-6361. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.6355>.
4. Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells. *Journal of Materials Research*, 2008, vol. 23, no. 06, pp. 1758-1763. doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>.
5. Wang W., Zhu F., Weng J., Xiao J., Lai W. Nanoparticle morphology in a granular Cu-Co alloy with giant magnetoresistance. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 72, no. 9, pp. 1118-1120. doi: <https://doi.org/10.1063/1.120942>.
6. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 254-255, pp. 1-6. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00932-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00932-0).
7. Kolbasov G.Ya., Ustinov A.I., Shcherba A.A., Perekos A.Ye., Danilov M.O., Vyunova N.V., Zakharchenko S.N., Hossbah G. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys. *Journal of Power Sources*, 2005, vol. 150, pp. 276-281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.02.025>.
8. Jin C.H., Si P.Z., Xiao X.F., Feng H., Wu Q., Ge H.L., Zhong M. Structure and magnetic properties of Cr/Cr₂O₃/CrO₂ microspheres prepared by spark erosion and oxidation under high pressure of oxygen. *Materials Letters*, 2013, vol. 92, pp. 213-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.10.126>.
9. Harrington T., McElfresh C., Vecchio K.S. Spark erosion as a high-throughput method for producing bimodal nanostructured 316L stainless steel powder. *Powder Technology*, 2018, vol. 328, pp. 156-166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.012>.
10. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders. *Journal of Materials Research*, 1987, no. 2, pp. 277-288. doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1987.0277>.

11. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, no. 3, pp. 823-829. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1635973>.
12. Shen B., Inoue A. Fabrication of large-size Fe-based glassy cores with good soft magnetic properties by spark plasma sintering. *Journal of Materials Research*, 2003, vol. 18, no. 9, pp. 2115-2121. doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2003.0297>.
13. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Mazurenko I.L., Kulida M.A. Physical and Technical-economic Aspects of Modern Methods of Water Treatment for Thermal and Nuclear Power Engineering. *Technical Electrodynamics*, 2022, no. 4, pp. 69-77. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.069>.
14. Goncharuk V.V., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Savluk O.S., Potapchenko N.G., Kosinova V.N. Disinfectant action of the volume electrospark discharges in water. *Khimia i tehnologija vody*, 1999, vol. 21, no. 3, pp. 328-336. (Rus).
15. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Aftandilyants E.G. Application of volume electric spark dispersion for production steady to sedimentation hydrosols of biological active metals. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2009, no. 22, pp. 74-79. (Rus).
16. Zakharchenko S.M., Shydlovska N.A., Perekos A.O., Lopatko K.G., Savluk O.S. Features of Obtaining of Plasma-Erosion Nanodispersed Silver Hydrosols and Their Bactericidal and Fungicidal Properties. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 829-851. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.06.0829>.
17. Batsmanova L., Taran N., Konotop Ye., Kalenska S., Novytska N. Use of a Colloidal Solutions of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer for Increasing Soybean Productivity. *Journal of Central European Agriculture*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 311-319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>.
18. Youssef F.S., El-Banna H.A., Elzorbha H.Y., Gabal A.M. Application of Some Nanoparticles in the Field of Veterinary Medicine. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 78-93. doi: <https://doi.org/10.1080/23144599.2019.1691379>.
19. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Physical Prerequisites of Construction of Mathematical Models of Electric Resistance of Plasma-erosive Loads. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 2, pp. 5-12. (Ukr) doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>.
20. Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, Springer, 1991. 449 p.
21. Lo A., Cessou A., Lacour C., Lecordier B., Boubert P., Xu D., Laux C.O., Vervisch P. Streamer-to-spark transition initiated by a nanosecond overvoltage pulsed discharge in air. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, vol. 26, no. 4, art. no. 045012. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa5c78>.
22. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yatsyuk S.A., Kucheryavaya I.N., Lopatko K.G., Aftandilyants E.G. Analysis of the Methods of Increasing the Efficiency of Electric-erosive Coagulation During Cleaning of Aqueous Media. *Technical Electrodynamics. Thematic Issue «Power Electronics and Energy Efficiency»*, 2008, part 2, pp. 120-125. (Rus).
23. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Technical Electrodynamics*, 2006, no. 2, pp. 10-14.
24. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Determination of Probabilistic Properties of Electrical Characteristics of Circuits of Electric Discharge Installations Taking into Account their Stochastically Changing Parameters. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 4, pp. 3-11. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.003>.
25. Shuaibov O.K., Malinina A.O., Hrytsak R.V., Malinin O.M., Bilak Yu.Yu., Gomoki Z.T., Vatrana M.I. Characteristics and Parameters of Overstressed Nanosecond Discharge Plasma Between Copper Electrodes in Argon. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, vol. 43, no. 12, pp. 1683-1706. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1683>.
26. ToupTek. Download. Available at: <https://www.touptek.com/download> (Accessed 15 March 2023).
27. ToupTek. Download. Software Download. Help files for ToupCam camera. Available at: <http://www.touptek.com/download/showdownload.php?lang=en&id=7> (Accessed 15 March 2023).
28. Medvedev N., Zastrau U., Forster E., Gericke D.O., Rethfeld B. Short-Time Electron Dynamics in Aluminum Excited by Femtosecond Extreme Ultraviolet Radiation. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, art. no. 165003. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.165003>.
29. Kim S.J., Lee Y.S., Cho Ch.H., Choi M.S., Seong I.H., Lee J.J., Kim D.W., You Sh.J. Observation of prior light emission before arcing development in a low-temperature plasma with multiple snapshot analysis. *Scientific Reports*, 2022, no. 12, art. no. 20976. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25550-2>.
30. Baranov M.I. A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 1, pp. 34-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05>.
31. Shcherba A.A., Shcherba M.A., Peretyatko Ju.V. Electro-Physical Processes of Degradation of Cross-Linked Polyethylene Insulation of Power Cables and Self-Carrying Insulated Wires under Non-Sinusoidal Voltages and Currents. *Technical Electrodynamics*, 2023, no. 1, pp. 3-6. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.03>.
32. Bereka V.O., Bozhko I.V., Kondratenko I.P. Influence of Parameters of Water Movement at its Treatments on Energy Efficiency Pulse Barrier Discharge. *Technical Electrodynamics*, 2022, no. 3, pp. 62-68. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.062>.
33. Zaidel' A.N., Prokof'ev V.K., Raikii S.M., Slavnyi V.A., Shreider E.Ya. *Tables of Spectral Lines*. New York, Springer, 1970. 782 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1601-6>.
34. Parigger C.G., Hornkohl J.O., Nemes L. Measurements of aluminum and hydrogen microplasma. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 19, pp. 4026-4031. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.46.004026>.
35. Soo M., Goroshin S., Glumac N., Kumashiro K., Vickery J., Frost D.L., Bergthorson J.M. Emission and Laser Absorption Spectroscopy of Flat Flames in Aluminum Suspensions. *Combustion and Flame*, 2017, vol. 180, pp. 230-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.03.006>.
36. Sarvan M., Radić-Perić J., Kasalica B., Belča I., Stojadinović S., Perić M. Investigation of Long-duration Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum by Means of Optical Spectroscopy. *Surface & Coatings Technology*, 2014, vol. 254, pp. 270-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.029>.
37. Liu R., Wu J., Xue W., Qu Ya., Yang Ch., Wang B., Wu X. Discharge Behaviors During Plasma Electrolytic Oxidation on Aluminum Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 148, no. 1-2, pp. 284-292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.045>.
38. Qayyum A., Akhtar M.N., Riffat T. Light Emission from Sputtered Aluminum Atoms and Ions Produced by Ion Bombardment. *Radiation Physics and Chemistry*, 2005, vol. 72, no. 6, pp. 663-667. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.05.048>.
39. Stojadinovic S., Vasilic R., Petkovic M., Nedic Z., Kasalica B., Belca I., Zekovic Lj. Luminescence properties of oxide films formed by anodization of aluminum in 12-tungstophosphoric acid. *Electrochimica Acta*, 2010, vol. 55, no. 12, pp. 3857-3863. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.02.011>.
40. Staninski K., Piskula Z., Kaczmarek M. Photo- and electroluminescence properties of lanthanide tungstatedoped porous anodic aluminum oxide. *Optical Materials*, 2017, vol. 64, pp. 142-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.12.003>.
41. Stepniowski W.J., Norek M., Michalska-Domanska M., Bombalska A., Nowak-Stepniowska A., Kwasny M., Bojar Z. Fabrication of Anodic Aluminum Oxide with Incorporated Chromate Ions. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 259, pp. 324-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.043>.
42. Shcherba A.A., Shtompel I.V. Analysis electrical parameters and dynamics of spark discharges in a layer of current-conducting granules. *Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi energii*, 1991, pp. 65-74. (Rus).
43. *Abcibc.com. Light wavelengths*. Available at: <http://abcibc.com/photo-reference-tables.php?art=19> (Accessed 15 March 2023). (Rus).
44. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, vol. 29, no. 10, art. no. 103001. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aba005>.
45. Ninyovskij V., Murmantsev A., Veklich A., Boretskij V. Plasma spectroscopy of electric spark discharge between silver granules immersed in water. *Energetika*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 107-114. doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v68i1.4862>.
46. Veklich A., Tmenova T., Zazimko O., Trach V., Lopatko K., Titova L., Boretskij V., Aftandilyants Ye., Lopatko S., Rogovskiy I. Regulation of Biological Processes with Complexions of Metals Produced by Underwater Spark Discharge. *Nanooptics and Photonics, Nanochemistry and Nanobiotechnology and Their Applications: Selected Proceedings of the 7th International Conference Nanotechnology and Nanomaterials (NANO2019)*, pp. 283-306. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52268-1_23.

47. *Aurora*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora> (Accessed 15 March 2023).
48. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. The Analysis of Electromagnetic Processes in Output Circuit of the Generator of Discharge Pulses with Non-linear Model of Plasma-erosive Load at Change Their Parameters in Wide Ranges. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 1. pp. 87-95. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>.
49. Zakharchenko S.M., Perekos A.O., Shydlovska N.A., Ustinov A.I., Boytsov O.F., Voynash V.Z. Electrospark Dispersion of Metal Materials. I. Influence of Velocity of Flow of Operating Fluid on Dispersivity of Powders. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2018, vol. 40, no. 3, pp. 339-357 (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.03.0339>.
50. Murmantsev A., Veklich A., Boretskij V. Optical emission spectroscopy of plasma of electric spark discharge between metal granules in liquid. *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 5231-5237. doi: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02744-8>.
51. Tmenova T.A., Veklich A.N., Boretskij V.F., Cressault Y., Valensi F., Lopatko K.G., Aftandilyants Y.G. Optical Emission Spectroscopy of Plasma Underwater Electric Spark Discharges Between Metal Granules. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 132-135.
52. Li S.-Y., Li S.-C., Sui L.-Z., Jiang Y.-F., Chen A.-M., Jin M.-X. Contribution of nitrogen atoms and ions to the luminescence emission during femotosecond filamentation in air. *Physical Review A*, 2016, vol. 93, no. 1, art. no. 013405. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.013405>.
53. Lianzhu Z., Shuxia Z., Xiulan M. Characterization of Nitrogen Glow Discharge Plasma via Optical Emission Spectrum Simulation. *Plasma Science and Technology*, 2008, vol. 10, no. 4, pp. 455-462. doi: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/10/4/11>.
54. Wang Z., Cohen S.A., Ruzic D.N., Goeckner M.J. Nitrogen atom energy distributions in a hollow-cathode planar sputtering magnetron. *Physical Review E*, 2000, vol. 61, no. 2, pp. 1904-1911. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.1904>.
55. Bogaerts A., Gijbels R., Vlcek J. Modeling of glow discharge optical emission spectrometry: Calculation of the argon atomic optical emission spectrum. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1998, vol. 53, no. 11, pp. 1517-1526. doi: [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(98\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(98)00139-6).
56. Saloman E.B. Energy Levels and Observed Spectral Lines of Ionized Argon, Ar II through Ar XVIII. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2010, vol. 39, no. 3, art. no. 033101. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3337661>.

Надійшла (Received) 18.03.2024
 Прийнята (Accepted) 31.05.2024
 Опублікована (Published) 21.10.2024

Шидловська Наталія Анатоліївна¹, чл.-кор. НАН України,
 д.т.н., гол.н.с.,

Захарченко Сергій Миколайович¹, д.т.н., пров.н.с.,

Захарченко Микола Федорович², к.х.н.,

Куліда Марія Анатоліївна³, к.вет.н., доц.,

Закусило Сергій Анатолійович¹, аспірант,

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

03057, Київ, пр. Берестейський, 56,

e-mail: snzakhar@ukr.net (Corresponding Author)

² Інститут загальної та неорганічної хімії

ім. В.І. Вернадського НАН України,

03142, Київ, пр. акад. Палладіна, 32/34.

³ Національний університет біоресурсів

і природокористування України,

03041, Київ, вул. Виставкова, 16.

N.A. Shydlovska¹, S.M. Zakharchenko¹, M.F. Zakharchenko²,

M.A. Kulida³, S.A. Zakusilo¹

¹ Institute of Electrodynamics

of the National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Prospect Beresteiskyyi, Kyiv, 03057, Ukraine.

How to cite this article:

Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Kulida M.A., Zakusilo S.A. Spectral and optic-metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 6, pp. 72-83. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>

² V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, 32/34, Prospect Palladina, Kyiv, 03142, Ukraine.

³ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 16, Vystavkova Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

Spectral and optic-metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids.

Introduction. Spark-erosion processing of metals and alloys granules in working liquids is the basis of a several technological processes. Efficiency of energy use in them and parameters of the resulting product largely depend on the accuracy of stabilization and regulation of pulse power in each plasma channel between the granules. To achieve this, until now only the voltage and current of the discharge pulses in the entire layer of granules have been controlled. **Problem.** The measurement methods, which are used, are not effective enough for monitoring the parameters of individual plasma channels and predicting the size distribution of eroded metal particles at the stage of their formation. The **aim** of the work is to develop a method for determining the volumes of components of plasma channels in layers of metals granules during their spark-erosion treatment to predict the size distribution of eroded metal particles at the stage of their formation, as well as to simplify the method of spectrometric analysis of the elemental composition of substances surrounding plasma channels for the operational prediction of the chemical composition of resulting products. **Methodology.** A series of experiments were carried out on spark-erosion processing of Al and Ag granules layers in distilled water. Using a digital camera, images of the plasma channels in them were obtained. Based on the theory of pulsed electrical breakdown of liquid dielectrics, an analysis of the components of plasma channels was carried out. Using the specialized ToupView program, the volumes of equivalent ellipsoids of rotation were determined, approximating the halos of colored radiation likely arising from streamers, as well as the spark cores of plasma channels emitting white light. The shades of the resulting radiation were studied for several metals and working liquids. The obtained data were compared with the known results of spectrometric studies for the same elements excited by similar mechanisms. **Results.** The theory of discharge-pulse systems for spark-erosion processing of granular conductive media has been developed in the direction of new methods for monitoring the parameters of discharge pulses and predicting the chemical composition and size distribution parameters of eroded metal particles at the stage of their production. An optic-metric method has been developed for determining the volumes of halos and cores of plasma channels. A simplified spectral method for determining the chemical composition of erosion particles based on the shade of the resulting radiation was proposed. **Originality.** The developed new optic-metric method makes it possible to obtain information about almost every plasma channel, which refines predictions of the size distribution of erosion particles. To implement the method, general-purpose hardware and specialized software that is freely available are used. The developed method of simplified spectral analysis of excited atoms makes it possible to make preliminary predictions of the chemical composition of the obtained erosion particles already at the stage of their formation without the use of expensive specialized equipment. **Practical significance.** The ratio of the volumes of halos and cores of plasma channels between Al and Ag granules in distilled water was measured. An analysis of the emission spectra of plasma channel halos between Al, Ag and Cu granules in distilled water, Fe in ethyl alcohol, Ni-Mn-Ga and Ti-Zr-Ni alloys in liquid nitrogen, and Ti-Zr-Ni in liquid argon was carried out. Based on spectrometry data, the resulting shades of these radiations were substantiated and their description in the RGB system is given. References 56, table 1, figures 4.

Key words: discharge current, plasma channels, metal granules, optical emission spectrum.