

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛІВ ЗА ДІАМЕТРАМИ ОТРИМАНИХ ЗА СУБМІЛІСЕКУНДНІЙ ТРИВАЛОСТІ РОЗРЯДНИХ ІМПУЛЬСІВ ІСКРОЕРОЗІЙНИХ ЧАСТИНОК АЛЮМІНІЮ І ЛУНОК НА ПОВЕРХНІ ЙОГО ГРАНУЛ

Н.А. Шидловська^{1*}, чл.-кор. НАН України, С.М. Захарченко^{1**}, докт. техн. наук,

А.О. Перекош^{2***}, канд. фіз.-мат. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net

² Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

бульв. акад. Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна.

E-mail: perekos@ukr.net

Наведено умови і методу отримання одномодальних розподілів за розмірами іскроерозійних частинок алюмінію. Розраховано статистичні параметри розподілів за розмірами іскроерозійних частинок алюмінію і лунок на поверхні його гранул, отриманих за субмілісекундній тривалості розрядних імпульсів. Проведено порівняльний аналіз об'ємів металу ерозійних лунок і частинок. Перевірено узгодженість отриманих на практиці розподілів за діаметрами іскроерозійних частинок і лунок з наступними теоретичними розподілами безперервної випадкової величини: Гауса, Вейбулла, інтеграла функції Розіна-Раммлера та з логарифмічно нормальним. При цьому параметри теоретичних розподілів розраховувались як за статистичними параметрами отриманих на практиці розподілів, так і за критерієм мінімально можливого значення середнього модуля відносного відхилення теоретичного і практичного розподілів. Показано, що за значеннях параметрів теоретичних розподілів, які відповідають статистичним параметрам практичних розподілів, розподіл ерозійних частинок за діаметром найкраще узгоджується з розподілом Гауса, а лунок – з розподілом інтеграла функції Розіна-Раммлера. Бібл. 27, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: розрядні імпульси, електроіскрове диспергування металів, розподіл іскроерозійних частинок.

Вступ. Формування іскро- та плазмоерозійних частинок металів і сплавів в процесі об'ємного електроімпульсного диспергування шарів їхніх гранул є основою технологічних процесів отримання мікродисперсних [1-6], в тому числі аморфних [7] і аморфно-кристалічних [8], нанодисперсних [9] порошків металів і сплавів як у криогенних [5, 6], так і некриогенних робочих рідинах, нанодисперсних гідрозолів біологічно активних металів [10-12], а також знезараження і очищення промислових водних скидів та природних поверхневих вод [13-15]. Без детального вивчення механізмів та особливостей формування ерозійних частинок металів в результаті проходження розрядних струмів у шарі їхніх гранул вкрай важко забезпечити підвищення ефективності зазначених вище технологічних процесів та режимів роботи відповідного електротехнічного обладнання.

Основні механізми формування іскроерозійних частинок металів розглядалися в роботах [1, 6, 7, 12, 16, 17] та в ін. Проте досі дискусійним є ряд питань. **Метою** роботи є пошук відповідей на наступні з них: за яких умов розподіл ерозійних частинок за розмірами є одномодальним, якими теоретичними законами розподілу безперервної випадкової величини найбільш коректно можна описати розподіли за розмірами ерозійних частинок та ерозійних лунок на поверхні гранул, як вони співвідносяться між собою, чи можна оцінювати параметри ерозійних частинок середньостатистичного діаметра за параметрами лунок середньостатистичного діаметра.

Методика досліджень, обладнання і матеріали. Об'єктами статистичного аналізу були іскроерозійні частинки та лунки на поверхні гранул алюмінію, отримані в ході їх електроімпульсного диспергування у водопровідній воді. Лабораторна установка електроімпульсного диспергування шарів металевих гранул у некриогенних робочих рідинах, на якій вони були отримані, складалася з транзисторного генератора розрядних імпульсів, розрядної камери, седиментаційного бака-уловлювача ерозійних частинок і цифрового запам'ятовуючого осцилографа Siglent SDS1104CFL із стандартним щупом 1:10 як датчиком напруги розрядних імпульсів та імпульсним трансформатором струму як датчиком розрядного струму.

У загальному випадку розподіл за розмірами іскроерозійних частинок металів і сплавів має три моди [6]. Перша мода (пік) відповідає найдрібнішим (як правило, до 1 мкм) частинкам, які

© Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Перекош А.О., 2021

ORCID ID: * <http://orcid.org/0000-0002-9907-7416>, ** <http://orcid.org/0000-0002-8597-8045>,

*** <https://orcid.org/0000-0002-1669-2342>

утворюються в результаті конденсації в парах робочої рідини навколо плазмових каналів парів металів і сплавів, утворених з матеріалу гранул в результаті їх іскрової або плазмової ерозії. Об'єми таких частинок, як правило, на один – три порядки менші, ніж найменших ерозійних лунок, що свідчить про те, що з однієї лунки у таких режимах можуть утворюватися від десятків до тисяч частинок. Друга мода відповідає частинкам, розміри яких, як правило, становлять від 1 до приблизно 50 мкм. Переважна їх більшість утворена в результаті застигання розплавленого металу гранул в парах робочої рідини та в ній. Третя мода відповідає частинкам з розмірами від приблизно 50 до кількох сотень мікрметрів (в залежності від сплаву, робочої рідини, умов диспергування та ін.). Третя мода зазвичай спостерігається тільки при диспергуванні крихких сплавів з низькою міцністю, наприклад, сплавів з магнітною пам'яттю форми групи Ni-Mn-Ga у криогенних рідинах [6].

Як правило, частинки, розміри яких відповідають двом першим модам, мають квазікульову форму, хоча зустрічаються частинки складних форм і навіть порожнисті [4, 5]. Частинки, розміри яких відповідають третій моді розподілу, майже завжди мають форму уламків з чітко вираженими гранями та гострими ребрами. Зустрічаються навіть частинки голкоподібної форми [6]. Такі частинки утворюються в результаті механічного руйнування гранул крихких сплавів під дією гідравлічних ударів, які виникають в розрядних камерах малих об'ємів (до сотень кубічних сантиметрів) під дією розрядних імпульсів з енергією близько десяти Джоулів і більше, або в результаті стрімкого перепаду температур у разі занурення гранул у криогенну робочу рідину та екстракції з неї.

Повний діапазон розмірів плазмо- та іскроерозійних частинок металів і сплавів дуже великий – від десятків нанометрів до сотень мікрметрів, тому для дослідження частинок з усіма можливими розмірами потрібно залучати різні типи мікроскопів. Для дослідження частинок з розмірами від 10 нм до 1 мкм – електронні, від 1 до 5 мкм – імерсійні оптичні, від 2 до сотень мікрметрів – металографічні оптичні з об'єктивами різної кратності. Оскільки методика приготування зразків для різних типів мікроскопів різна, то для дослідження одного і того ж самого зразка технічно неможливе використання всіх згаданих мікроскопів. Тому різні ділянки розподілу досліджують на різних зразках з використанням різних пристроїв. У розпорядженні авторів був лише металографічний оптичний мікроскоп Neophot 2 з цифровою камерою-окуляром і програмним забезпеченням Image-Pro, який дозволяв ефективно досліджувати об'єкти з розмірами від 2 до 100 мкм. Тому першочергова увага під час вибору металу гранул і режимів диспергування приділялася тому, щоб розміри ерозійних частинок і лунок були у зазначених вище межах. Оскільки горизонтальна проекція ерозійних частинок та лунок не завжди мала форму правильного кола, їх діаметр розраховувався програмою Image-Pro як діаметр кола еквівалентної площі.

Матеріалами гранул і електродів було вибрано широкодоступні електротехнічні сплави алюмінію А7Е та АД0 з малим (менше 0,3% та менше 0,5% відповідно) вмістом домішок інших хімічних елементів. Робочою рідиною була водопровідна вода. В результаті хімічної взаємодії з водою ерозійні частинки алюмінію субмікронних розмірів швидко перетворювалися на гідроксид алюмінію, який виносився з розрядної камери і седиментаційного баку-уловлювача потоком водопровідної води в каналізацію. Таким чином, у зразках були відсутні частинки розмірами менше 1 мкм, які не могли бути ефективно розпізнані даним мікроскопом як окремі об'єкти, а лише забруднювали зразок. Алюміній та його сплави не є крихкими, і відносно великі уламки його гранул в ході експериментів у лабораторній розрядній камері не спостерігалися навіть за енергії імпульсів до 20 Дж у разі підвищення початкової напруги на робочому конденсаторі до 600 В і вище в інших режимах. В даних експериментах енергія імпульсів не перевищувала 15 Дж, навіть за підживлення робочого конденсатора від зарядного пристрою безпосередньо в процесі його розряду, тому частинки з розмірами понад 50 мкм також були відсутні, і зразки могли ефективно досліджуватися на описаному вище обладнанні.

Задля підвищення точності вимірювання розмірів ерозійних частинок і лунок режими диспергування гранул алюмінію вибиралися такими, щоб пік розподілу ерозійних частинок за розмірами зміщувався у бік великих значень діаметрів (більше 10 мкм). Як було показано у [18], одним із факторів, який сприяє збільшенню як загальних розмірів ерозійних частинок металів, так і їхнього кристалічного ядра (області когерентного розсіювання рентгенівських променів), є збільшення тривалості розрядних імпульсів τ . Тому у процесі отримання ерозійних частинок тривалість розрядних імпульсів була максимальною для усталеної роботи генератора імпульсів з лабораторною розрядною камерою і складала $\tau = 500$ мкс. Задля забезпечення малого спаду напруги на електродах розрядної камери протягом всієї тривалості імпульсу ємність робочого конденсатора

встановлювалася максимально можливою для даної конфігурації обладнання $C = 330$ мкФ, а зарядний пристрій не відключався під час розряду робочого конденсатора. Це сприяло наближенню форми імпульсів напруги до прямокутної.

Збільшення амплітуди напруги розрядних імпульсів U_m однозначно збільшує енергію всього імпульсу, що теоретично сприяє збільшенню об'ємів металу, які розплавляються та випаровуються за умови безперервного протікання струму в одних і тих самих ділянках гранул, тобто збільшенню розмірів ерозійних частинок. Але за таких умов швидкість нагрівання, розплавлення і випаровування металу також зростає, і його відокремлення від гранули з утворенням лунки може настати значно раніше закінчення тривалості всього імпульсу розрядного струму. При цьому в деяких режимах це може призвести до зменшення енергії, яка виділилася в окремому плазмовому каналі та прилеглих до нього областях гранул, порівняно з режимом, в якому амплітуда імпульсу напруги була меншою, проте тривалість існування окремого плазмового каналу була більшою. Як бачимо, збільшення амплітуди імпульсів напруги в усталених режимах завжди призводить до збільшення продуктивності процесу, але не завжди до збільшення розмірів ерозійних частинок. Тому під час вибору амплітуди імпульсів розрядної напруги автори перш за все зважали на стабільність і продуктивність процесу. В досліді середнє значення амплітуди напруги було $U_m = 180$ В, а середня амплітуда імпульсу розрядного струму – $I_m = 140$ А.

В розрядній камері з вертикальними електродами розміщувалися гранули сплаву А7Е квазікульової форми діаметром $d_g \approx 4$ мм. З метою підвищення стабільності процесу диспергування їхня поверхня пройшла попереднє іскроерозійне оброблення. Висота їхнього шару h складала 25 мм, ширина – $y = 60$ мм, а відстань між електродами $l = 50$ мм. Проток води Q був направлений знизу до гори і в процесі диспергування складав приблизно 12 мл/с, що забезпечувало його стабільність і виніс переважної кількості ерозійних частинок з активної зони розрядної камери до седиментаційного баку. Задля виносу найбільших ерозійних частинок швидкість потоку робочої рідини періодично збільшували до 50 мл/с.

Результати досліджень та обговорення. Результати оптичної гранулометрії ерозійних частинок та лунок на поверхні гранул та їхньої статистичної обробки представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Діаметр частинок d_p , мкм		Кількість в інтервалі n_j	Відсоток в інтервалі, %	Діаметр лунок d_c , мкм		Кількість в інтервалі n_j	Відсоток в інтервалі, %
Інтервал	Центр інтервалу			Інтервал	Центр інтервалу		
0 – 5	2,5	23	12,85	0 – 10	5	30	35,29
5 – 10	7,5	37	20,67	10 – 20	15	24	28,24
10 – 15	12,5	49	27,37	20 – 30	25	17	20,00
15 – 20	17,5	33	18,44	30 – 40	35	7	8,24
20 – 25	22,5	25	13,97	40 – 50	45	5	5,88
25 – 30	27,5	12	6,70	50 – 60	55	2	2,35
Загальна кількість n_p		179	100	Загальна кількість n_c		85	100
Мат. сподівання $M[d_p]$, мкм		13,506	–	Мат. сподівання $M[d_c]$, мкм		17,824	–
Дисперсія $D[d_p]$, мкм ²		50,665	–	Дисперсія $D[d_c]$, мкм ²		170,851	–
Коефіцієнт варіації $\nu[d_p]$		0,5270	–	Коефіцієнт варіації $\nu[d_c]$		0,7334	–
Об'єм кулі середнього діаметру $V_{dp}^-,$ мкм ³		1289,85	–	Об'єм півкулі середнього діаметру $V_{dc}^-,$ мкм ³		1482,35	–

Загальна кількість вимірних діаметрів частинок n_p була $179 > 50$, лунок $n_c = 85 > 50$, а кількість об'єктів в кожному з інтервалів їх розподілу (крім одного) перевищувала 5 (табл. 1). Це свідчить, що закон великих чисел виконується і частота повторення діаметрів об'єктів прямує до імовірності їхнього спостереження, що дає змогу не тільки коректно застосовувати методи математичної статистики до отриманих розподілів, але і апроксимувати розподіли дискретної частоти спостереження функціями розподілу імовірності безперервної випадкової величини [19, 20]. Значення математичного сподівання $M[d]$, дисперсії $D[d]$ та коефіцієнта варіації $\nu[d]$ розподілів діаметрів об'єктів табл. 1 загальною кількістю n розраховувалися за класичними формулами:

$$M[d] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j, \quad D[d] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (d_j - M[d])^2 \quad \text{та} \quad v[d] = \sqrt{D[d]}/M[d] \quad \text{відповідно.}$$

Об'єм ерозійної частинки середньостатистичного діаметра $\bar{d}_p = M[d_p]$, розрахований в гіпотезі її кульової форми за формулою $V_{\bar{d}_p} = \pi \bar{d}_p^3 / 6$, складає 1289,85 мкм³ (табл. 1). Ерозійні лунки в переважній більшості мали форму кульового сегмента. Якщо діаметр горизонтальної проекції лунок було легко визначити за їхніми фотографіями під мікроскопом, то її глибину за цими фотографіями визначити неможливо. Задля точного визначення глибини лунки необхідно зробити шліф гранули у площині, перпендикулярній горизонтальній проекції лунки, причому лінія симетрії горизонтальної проекції лунки повинна точно лежати у площині шліфу. Тоді, вивчаючи під мікроскопом поверхню шліфа, можна точно виміряти глибину лунки і діаметр її горизонтальної проекції. На жаль, під час аналізу розмірів лунок на поверхні гранул застосування цього методу на практиці пов'язане із значними труднощами, оскільки, по-перше, неможливо зробити шліф кульової гранули малих розмірів точно у площині лінії симетрії лунки розміром кілька десятків мікрометрів, а по-друге, такий шліф зруйнує інші лунки, не даючи можливість виміряти їхні параметри.

Проте в процесі диспергування беруть участь не тільки гранули, а також і електроди, які мають форму прямокутного паралелепіпеду. Вивчаючи під мікроскопом шліфи торців електродів можна знайти на них лунки, вісь симетрії яких близька до площини шліфів. З використанням такого підходу авторами [16] отримано графіки розкиду глибини ерозійних лунок на електродах та на гранулах в залежності від їхнього діаметру. Використання такої методики для електродів у формі прямокутного паралелепіпеду технічно можливе і зрозуміле. У разі достатній довжині лінії шліфів можливо набрати відповідну статистику. Для гранул невеликого розміру і довільної форми вочевидь ця методика не дуже підходить через складність шліфування таких об'єктів без руйнування їхньої поверхні в зонах, які досліджуються, та відносно малу кількість лунок у периметрі такого шліфа, що не дозволяє ефективно використовувати статистичні методи. Крім того в обох випадках точність вимірювання істотно знижується по мірі віддалення площини шліфа від вісі симетрії лунки, що проконтролювати майже неможливо.

За даними [16] можливі випадки, коли глибина ерозійних лунок перевищує радіус їхньої горизонтальної проекції, що суперечить фізиці формування іскроерозійних лунок і ніколи на практиці авторами не спостерігалось. Скоріш за все, такі результати є наслідком недосконалої методики вимірювання глибини лунок, яка застосовувалася у [16]. Для оцінювання глибини ерозійних лунок був використаний наступний підхід. В ручному режимі об'єктів мікроскопа фокусувався на поверхні гранули біля краю лунки, а потім фокусувався на дні лунки. За переміщенням мікрометричного гвинта фокусування об'єктива оцінювалася глибина лунки. Така методика є прийнятною тільки для відносно крупних (більше 20 мкм) лунок. Оскільки операція виконується вручну, дуже важко набрати достатню кількість вимірювань для коректного застосування апарату математичної статистики.

За результатами оцінки глибини п'яти великих лунок визначено, що вона лежить у межах від 40% до 50% значень їхнього діаметру. Зважаючи на це, під час визначення об'єму лунок автори умовно вважали що їхня глибина дорівнює радіусу їхньої горизонтальної проекції. Тому об'єм лунки середньостатистичного діаметра $\bar{d}_c = M[d_c]$ визначали як об'єм півкулі: $V_{\bar{d}_c} = \pi \bar{d}_c^3 / 12$. Як впливає з табл. 1, відношення об'єму лунки середньостатистичного діаметра до об'єму ерозійної частинки середньостатистичного діаметра становить приблизно 1,15, тобто з однієї такої лунки може сформуватися лише одна частинка середньостатистичного діаметру, а її об'єм – приблизно на 15% менший об'єму такої лунки. Але це не означає, що з об'єму металу однієї лунки завжди формується тільки одна ерозійна частинка. Це зауваження особливо стосується великих лунок і малих частинок. Відношення об'ємів лунок і частинок середніх значень діаметрів на першому і останньому інтервалах їхнього розподілу (табл. 1) становить 4.

У [16] зазначено, що за розрахунками з однієї лунки середнього об'єму на поверхні гранули могли бути сформовані 7 ерозійних частинок максимально можливого діаметру 29,47 мкм, а з однієї лунки середнього об'єму на поверхні електродів – до 60 – 70 таких частинок. Тобто, за даними [16] середній об'єм лунки в декілька разів перевищує об'єм не тільки середніх, а й найбільших ерозійних частинок і за ним складно оцінювати об'єми частинок. Це суперечить отриманим авторами даним, які наведено вище. Причиною цього є відмінність у матеріалах гранул, робочої рідини, параметрах

розрядних імпульсів і режимах диспергування цих двох досліджень, а також у недосконалості методики вимірювання глибини лунок, застосованої у [16]. При цьому максимальні значення діаметрів ерозійних частинок, отриманих у [16], – 29,47 мкм і у дослідженнях авторів – 30 мкм – майже співпали, а їхні середні значення 6,3 мкм в [16] та 13,5 мкм (табл. 1) відрізняються майже вдвічі. Це наводить на думку, що великі значення об'єму металу, виплавленого з однієї лунки, є лише необхідною, але не достатньою умовою формування частинки об'єму, наближеного до нього. Можливо на стадії затвердіння найбільших частинок вирішальну роль у формуванні їхніх розмірів грають сили поверхневого натягу розплавленого металу і сили гравітації та Архімеда, що діють на частинку.

Підбір теоретичних законів розподілу діаметрів ерозійних частинок і лунок. Гістограми розподілів за розмірами діаметрів ерозійних частинок і лунок, побудовані за даними табл. 1, показано на рис. 1 та рис. 2 відповідно. Визначення теоретичних законів розподілу, які найкращим чином описують отримані у ході експериментів результати, проводилося у три етапи. На першому етапі висувалися гіпотези щодо їх математичних виразів, виходячи з характерних випадків їхнього застосування та загального вигляду отриманих в ході експериментів розподілів. Оскільки: 1) на формування ерозійних частинок і лунок як одночасно, так і послідовно у часі, впливає багато факторів [1, 5, 7, 10-13]; 2) коефіцієнти варіації розподілів отриманих у ході експериментів даних лежать у діапазоні від 0,5 до 0,75 [23]; 3) вигляд розподілу для частинок є квазісиметричним і нагадує нормальний, то за рекомендаціями [19, 21-23] найбільш імовірно, що саме цей закон розподілу найкращим чином буде описувати отримані результати. Тому першим до розгляду було обрано саме нормальний закон розподілу, тобто розподіл Гауса [19, 21], щільність імовірності якого задається,

$$f_{NOR}(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[d]}} \exp\left[\frac{(d - M[d])^2}{-2D[d]}\right]. \quad (1)$$

Крім того, виходячи з ознак 1 – 2, як альтернативні гіпотези також розглядалися розподіли Вейбула, логарифмічно нормальний та інтегралу функції Розіна-Рамлера.

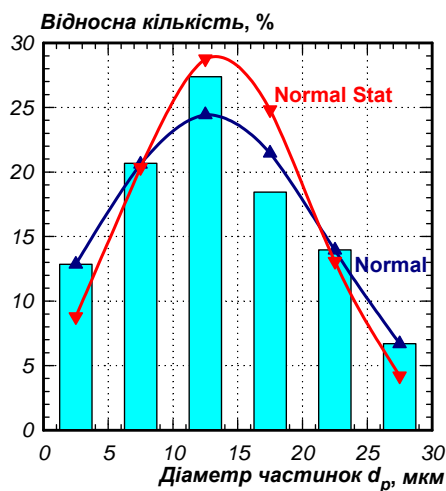


Рис. 1

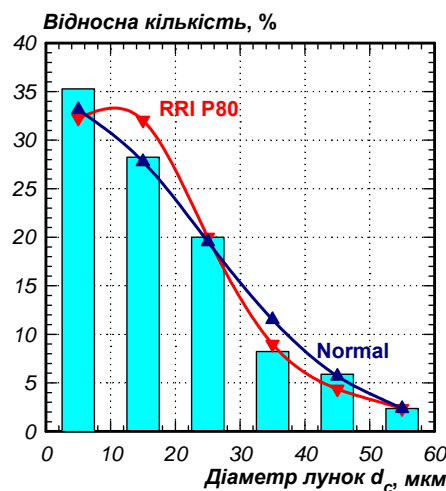


Рис. 2

Теоретичний розподіл (1) задано на інтервалі $d \in (-\infty; +\infty)$, у той час як отримані у ході експериментів розподіли задано лише на інтервалах $d_p \in [2,5; 27,5]$ мкм для ерозійних частинок і $d_c \in [5; 55]$ мкм для ерозійних лунок. Взагалі інтервали зміни аргументів всіх теоретичних розподілів значно ширші, ніж розподілів, отриманих в ході експериментів. Тому для

забезпечення значення 100% функцій розподілу в інтервалах зміни їхніх аргументів, які отримані у ході експериментів $[x_{min}; x_{max}]$, щільності імовірності всіх теоретичних розподілів $f(x)$ необхідно

домножити на поправочні коефіцієнти: $k = 100\% / \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) dx$. Їхні значення для всіх розглянутих

теоретичних розподілів, а також значення параметрів цих розподілів і параметрів оцінювання якості апроксимацій ними розподілів діаметрів частинок наведено у табл. 2, а діаметрів лунок – у табл. 3.

На другому етапі за двома різними методами – моментів [21] та найменшого відхилення від результатів експериментів [24] – розраховувалися значення параметрів теоретичних розподілів. Метод моментів передбачає, що значення параметрів розподілів, які пов'язані з такими статистичними моментами як математичне сподівання $M[d]$, дисперсія $D[d]$ та іншими моментами більш високого порядку, розраховуються за відповідними формулами, виходячи із значень цих моментів, які отримано методами математичної статистики [21]. Суцільною кривою Normal Stat, дискретні значення якої у центрах інтервалів розподілу діаметрів ерозійних частинок за розмірами

(табл. 1) позначено трикутниками з вершиною внизу, на рис. 1 показано теоретичний розподіл (1), значення параметрів якого отримано методом моментів. Отримані в результаті статистичного аналізу експериментальних даних значення математичного сподівання $M[d_p]$ і дисперсії $D[d_p]$ цього розподілу наведено у табл. 1, а поправочного коефіцієнта k – у табл. 2.

Якість апроксимацій, отриманих у ході експериментів розподілів дискретних випадкових величин теоретичними функціями щільності розподілу безперервних випадкових величин, оцінювалася за двома незалежними методиками. За першою методикою, яка широко застосовується задля оцінювання якості апроксимацій, отриманих у ході експериментів залежностей аналітичними функціями, обчислювався середній модуль відносного відхилення апроксимації [24]

$$\delta[d] = \frac{100\%}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{p(d_j) - f(d_j)}{p(d_j)} \right|, \quad (2)$$

де $p(d_j)$ – значення експериментальної залежності (у нашому випадку отримана у ході вимірювань імовірність потрапляння значення діаметра частинки або лунки у заданий інтервал їх розподілу); $f(d_j)$ – значення аналітичної функції, за допомогою якої виконується апроксимація експериментальної залежності (у нашому випадку – значення функції щільності теоретичного розподілу в центрі відповідного інтервалу розподілу діаметрів частинок або лунок); N – кількість пар значень, які порівнюються (у нашому випадку – інтервалів розподілу діаметрів). Чим менше значення середнього модуля відносного відхилення апроксимації (2), тим краще аналітична функція апроксимує експериментальну залежність, а у нашому випадку теоретичний закон розподілу діаметрів ерозійних частинок і лунок узгоджується з отриманими у ході вимірювань даними.

Далі, згідно з методом найменшого відхилення від результатів експериментів [24] розраховувалися значення параметрів теоретичних розподілів. Для цього з усіх критеріїв, наведених у [24], використовувався лише критерій мінімального середнього значення відносних модулів відхилень експериментальних і теоретичних даних. Згідно з ним у програмному пакеті Excel за допомогою модуля «пошук рішення» за необхідних обмежень на значення параметрів теоретичних розподілів були знайдені оптимальні їхні значення за критерієм мінімуму (2). Результати пошуку для розподілів частинок представлено у табл. 2, а для розподілів лунок – у табл. 3.

Розподіл діаметрів частинок	Параметри розподілу	Середній модуль відносного відхилення $\delta[d]$, %	Хі квадрат χ_N^2	Рівень значимості нульової гіпотези p -value	Рішення щодо нульової гіпотези
Нормальний $f_{NOR}(d)$ із статистичними параметрами	$M[d]=13,506$ мкм; $D[d]=50,665$ мкм ² ; $k=518,31\%$	19,414	9,188	0,1018	Не відхиляється
Нормальний $f_{NOR}(d)$ із підбиранням параметрів за мінімумом (2)	$M[d]=12,839$ мкм; $D[d]=83,031$ мкм ² ; $k=558,67\%$	4,603	1,393	0,925	Не відхиляється
Логарифмічно нормальний $f_{LNOR}(d)$ із статистичними параметрами	$\mu=2,4805$ мкм; $\alpha=0,49509$; $k=2,09\%$	193,725	19031	0	Відхиляється
Логарифмічно нормальний $f_{LNOR}(d)$ із підбиранням параметрів за мінімумом (2)	$\mu=0$ мкм; $\alpha=1,7099$; $k=256,63\%$	53,82	48,032	3,50E-09	Відхиляється
Вейбулла $f_W(d)$ із статистичними параметрами	$M[d]=13,506$ мкм; $k_b=0,886$; $b=2$; $k=114,65\%$	223,17	2466,54	0	Відхиляється
Вейбулла $f_W(d)$ із підбиранням параметрів за min (2)	$M[d]=13,506$ мкм; $k_b=0,3434$; $b=1$; $k=937,52\%$	35,492	22,912	3,51E-04	Відхиляється
Інтеграл Розіна-Раммлера $f_{RRI}(d)$ із підбиранням параметрів за min (2)	$P_{80}=21,348$ мкм; $m=-5,387$; $k=198,78\%$	15,461	9,71	0,0839	Не відхиляється

Таблиця 3					
Розподіл діаметрів лунок	Параметри розподілу	Середній модуль відносного відхилення $\delta[d]$, %	Хі квадрат χ_N^2	Рівень значимості нульової гіпотези p -value	Рішення щодо нульової гіпотези
Нормальний $f_{NOR}(d)$ із статистичними параметрами	$M[d]=17,8236$ мкм; $D[d]=170,85$ мкм ² ; $k=10887,14\%$	46,6762	19,2166	0,00175	Відхиляється
Нормальний $f_{NOR}(d)$ із підбиранням параметрів за мінімумом (2)	$M[d]=0,0036$ мкм; $D[d]=567$ мкм ² ; $k=20222,85\%$	8,8575	0,9305	0,968	Не відхиляється
Логарифмічно нормальний $f_{LNOR}(d)$ із статистичними параметрами	$\mu=2,6653$ мкм; $\alpha=0,656$; $k=140,03\%$	122,831	134,3	2,90E-27	Відхиляється
Логарифмічно нормальний $f_{LNOR}(d)$ із підбиранням параметрів за мінімумом (2)	$\mu=356,33$ мкм; $\alpha=299,48$; $k=99388,56\%$	41,3212	18,692	2,19E-03	Відхиляється
Вейбулла $f_W(d)$ із статистичними параметрами	$M[d]=17,8236$ мкм; $k_b=0,911$; $b=1$; $k=10603,02\%$	18,397	2,879	0,7186	Не відхиляється
Вейбулла $f_W(d)$ із підбиранням параметрів за $\min(2)$	$M[d]=17,8236$ мкм; $k_b=1,003$; $b=1$; $k=10490,94\%$	16,3166	4,0039	0,5488	Не відхиляється
Інтеграл Розіна-Раммлера $f_{RRR}(d)$ із підбиранням параметрів за $\min(2)$	$P_{80}=21,355$ мкм; $m=-3,2309$; $k=32,26\%$	9,5342	1,1402	0,9505	Не відхиляється

Значення нормального розподілу (1) з корекцією на поправочний коефіцієнт k (табл. 2) та параметрами, розрахованими за критерієм мінімуму (2), показано на рис. 1 суцільною лінією Normal, дискретні значення якої у центрах інтервалів розподілу діаметрів ерозійних частинок за розмірами позначено трикутниками з вершиною вгорі.

Як видно з рис. 1 і табл. 2, нормальний закон розподілу (1) з параметрами, знайденими за мінімальним значенням середнього модуля відносного відхилення апроксимації (2), більш точно відображає отриманий у ході вимірювань розподіл діаметрів частинок, ніж нормальний закон розподілу (1), параметри якого розраховувалися методом моментів. Слід звернути увагу, що значення математичного сподівання, знайдені за формулою математичної статистики та за критерієм мінімуму (2) для нормального закону розподілу, відрізняються менше ніж на 5%, а значення дисперсії – більше ніж на 60%. Можливо це викликано відносно невеликою кількістю вимірювань.

За значенням (2) можна порівнювати ступінь наближення експериментальних даних аналітичними функціями, але для визначення чи можливе застосування теоретичного розподілу безперервної випадкової величини задля відображення отриманого у ході вимірювань розподілу дискретної випадкової величини необхідно обґрунтувати порогові значення (2), перевищення яких означає, що запропонований теоретичний закон розподілу не підходить для даного випадку. Задля прийняття рішення щодо відповідності або невідповідності теоретичного закону експериментальним даним використовувалася класична методика відкидання або прийняття нульової гіпотези щодо узгодженості частот попадання дискретної випадкової величини у визначені інтервали її розподілу, які отримано у ході вимірювання, та значень функцій щільності розподілу безперервних випадкових величин теоретичних розподілів, що перевірялася за критерієм узгодженості Пірсона (критерій хі-квадрат)

$$\chi_N^2 = \sum_{j=1}^N \frac{(n_{jO} - n_{jE})^2}{n_{jE}}, \quad (3)$$

де n_{jO} – кількість об'єктів (частинок або лунок), яка спостерігалася у j -ому інтервалі їхнього розподілу за розмірами, отриманого на практиці; n_{jE} – кількість об'єктів (частинок або лунок), яка очікується у j -ому інтервалі їхнього розподілу за розмірами, виходячи із передбачуваного теоретичного

закону розподілу; N – кількість інтервалів розподілу за розмірами згідно з експериментальними даними.

Задля перевірки сформульованої вище нульової гіпотези за критерієм узгодженості Пірсона необхідно задатися рівнем значимості похибки першого роду s відхилення нульової гіпотези, коли вона є істиною, тобто коли теоретичний розподіл відхиляється, а насправді він узгоджений з даними експериментів. Задасося, як рекомендується у більшості випадків [19, 20], рівнем значимості похибки першого роду $s=0,05$. Знайдемо число ступенів свободи розподілу $L = N - 1$. У нашому випадку число інтервалів розподілу діаметрів N як частинок, так і лунок дорівнює 6 (табл. 1), тобто $L=5$. Згідно з критерієм Пірсона, значення критичної точки розподілу χ^2_{kp} розраховувалося за допомогою вбудованої функції *Chi2Обр*($s; L$) русифікованого програмного пакета Excel 2003 і для $s=0,05$ та $L=5$ становить приблизно 11,07. Тобто, якщо знайдені за (3) значення менші, ніж 11,07, то з рівнем значимості похибки першого роду 5% нульова гіпотеза не відхиляється.

Критерій узгодженості Пірсона (критерій χ^2 -квадрат) у своїй класичній інтерпретації дає змогу однозначно прийняти або відкинути нульову гіпотезу щодо узгодженості теоретичного розподілу і результатів вимірювань, але не дає змоги порівнювати якість апроксимації кількома теоретичними розподілами отриманих на практиці результатів, як це дозволяє середній модуль відносного відхилення апроксимації (2). В рамках даної методики задля порівняння точності апроксимацій отриманих на практиці результатів кількома теоретичними розподілами необхідно розрахувати рівень значимості нульової гіпотези p -value для кожного значення χ^2_N , отриманого при порівнянні теоретичних розподілів з практичними результатами. Його розрахунок здійснювався за допомогою вбудованої функції *Chi2Расн*($\chi^2_N; L$) русифікованого програмного пакета Excel 2003. Чим більше отримане значення, тим точніше апроксимація теоретичним розподілом отриманих на практиці результатів. В ідеальному випадку p -value прямує до 1. Назва розподілів, значення їхніх параметрів, середнього модуля відносного відхилення апроксимації, χ^2 квадрату χ^2_N , рівень значимості нульової гіпотези p -value та висновок щодо прийняття або відкидання нульової гіпотези для розподілу діаметрів частинок наведено у табл. 2, а діаметрів лунок – у табл. 3.

В рамках першого етапу, зважаючи на асиметричний вигляд отриманого на практиці розподілу діаметрів ерозійних лунок за розмірами та аналогічні випадки застосування теоретичних законів розподілу, першим на узгодженість з практичними результатами перевірявся запропонований авторами розподіл, функція щільності імовірності якого співпала з інтегральною функцією розподілу Розіна-Раммлера-Шперлінга-Беннета [25, 26], який скорочено можна назвати інтегралом функції Розіна-Раммлера

$$f_{RRI}(d) = \begin{cases} 1 - \exp[-\ln 0,2(d/P_{80})^m] & d \geq 0 \\ 0 & d < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

де d – діаметр лунки або частинки; P_{80} – 80-й процентиль розподілу лунок або частинок за розмірами (значення, менше якого діаметри 80% всіх лунок або частинок); m – параметр, який описує розмах розподілу. Суцільною кривою RRI P80, дискретні значення якої у центрах інтервалів розподілу діаметрів ерозійних лунок за розмірами (табл. 1) позначено трикутниками з вершиною вниз, на рис. 2 показано теоретичний розподіл (4) з відповідним поправочним коефіцієнтом k , значення параметрів якого P_{80} та m (табл. 3) в рамках другого етапу розраховано за критерієм мінімуму (2).

Виходячи з асиметричного вигляду отриманого на практиці розподілу діаметрів ерозійних лунок та рекомендацій для опису розподілів продуктів подрібнення, викладених у [27] як можлива альтернатива попередньому розподілу, наступним до розгляду було обрано логарифмічно нормальний розподіл невід'ємних значень d з параметрами $\alpha > 0$ та $\mu \in \mathfrak{R}$, функція щільності імовірності якого має вигляд [19, 27]

$$f_{LNOR}(d) = \frac{1}{d\alpha\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\ln d - \mu}{\alpha\sqrt{2}}\right)^2\right]. \quad (5)$$

Математичне сподівання $M[d]$ і дисперсія $D[d]$ пов'язані з параметрами логарифмічно нормального закону розподілу наступним чином:

$$M[d] = \exp\left[\mu + \alpha^2/2\right], \quad (6)$$

$$D[d] = (\exp[\alpha^2] - 1) \cdot \exp[2\mu + \alpha^2]. \quad (7)$$

Розв'язуючи систему з рівнянь (6) і (7), отримаємо

$$\alpha = \sqrt{\ln[D[d]/M^2[d] + 1]}, \quad (8)$$

$$\mu = \ln[M[d]/\sqrt{D[d]/M^2[d] + 1}]. \quad (9)$$

Результати апроксимації отриманого на практиці розподілу діаметрів ерозійних лунок логарифмічно нормальним законом розподілу безперервної випадкової величини (5) як з параметрами, що на другому етапі визначалися методом моментів за (8) і (9), так і з підбором значень α та μ за критерієм мінімального значення (2), наведено у табл. 3. Як видно з таблиці, обидві ці нульові гіпотези відхиляються за критерієм узгодженості Пірсона через занадто великі значення (3).

Оскільки розподіл інтеграла функції Розіна-Раммлера (4) показав дуже добру узгодженість з отриманим у ході вимірювань розподілом лунок за діаметрами (табл. 1), то як альтернативу, вирішено було перевірити узгодженість експериментального закону також і з розподілом Вейбулла, який є розвитком закону Розіна-Раммлера і щільність імовірності якого визначається за формулою [23]:

$$f_w(d) = \left(\frac{k_b}{M[d]}\right)^b \cdot b \cdot d^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{k_b d}{M[d]}\right)^b\right], \quad (10)$$

де b – параметр форми; k_b – параметр масштабу.

Результати апроксимації отриманого на практиці розподілу діаметрів ерозійних лунок розподілом Вейбулла (10) як з параметрами, що визначались методом моментів за математичним сподіванням і дисперсією згідно з методикою, описаною в [23], так і з підбором значень b та k_b за критерієм мінімального значення (2), наведено у табл. 3. Хоча за критерієм узгодженості Пірсона нульова гіпотеза щодо розподілу (10) з обома цими наборами значень параметрів не відхиляється, за значеннями параметрів p -value та $\delta[d]$ розподіл (10) поступається розподілу (4) в обох випадках.

На третьому етапі перевірялася можливість апроксимації отриманих у ході експерименту розподілів діаметрів як частинок, так і лунок однією теоретичною функцією розподілу щільності імовірності, але з різними значеннями параметрів. Оскільки нормальний розподіл показав гарну узгодженість з отриманим на практиці розподілом діаметрів частинок, то його було перевірено на узгодженість з розподілом діаметрів лунок, отриманим в результаті експерименту. У першому випадку у разі застосування методу моментів параметри нормального розподілу (1) відповідали розрахованим методами математичної статистики значенням математичного сподівання і дисперсії (табл. 1), а у другому – підбиралися за критерієм мінімуму (2). Результати перевірки представлено у табл. 3. Як бачимо, у першому випадку нульова гіпотеза відхиляється, а у другому – не відхиляється. Але значення математичного сподівання у другому випадку прямує до нуля, а дисперсія у 10 разів перевищує значення, знайдене методами математичної статистики. Тому, не дивлячись на те, що виконується критерій узгодженості Пірсона, не можна стверджувати, що розподіл діаметрів лунок адекватно описується нормальним законом (1).

Також у рамках третього етапу перевірялася точність апроксимації отриманих у ході експериментів розподілів діаметрів частинок розподілами (4), (5) та (10), які раніше було перевірено на узгодженість з розподілом діаметрів лунок як з розрахунком значень параметрів розподілів методами математичної статистики (метод моментів), так і їхнім підбором за критерієм мінімуму (2). Результати перевірки наведено у табл. 2. Згідно з ними для опису отриманих у ході експериментів розподілів діаметрів частинок нульові гіпотези щодо розподілу Вейбулла (10) та логарифмічно нормального розподілу (5) відхиляються в обох випадках визначення їхніх параметрів. Нульова гіпотеза щодо розподілу інтегралу функції Розіна-Раммлера (4) з підбором параметрів за критерієм мінімуму (2) формально за критерієм Пірсона не відхиляється, але дуже мале значення p -value та велике значення $\delta[d]$ свідчать про дуже низьку точність апроксимації розподілу частинок за діаметрами функцією (4).

Висновки. 1. На основі результатів прямих гранулометричних досліджень ерозійних частинок і лунок, а також аналізу електро- та термодинамічних процесів у шарі гранул алюмінію під час протікання в ньому імпульсних розрядних струмів обґрунтовано режими, в яких розподіли за діаметрами іскроерозійних частинок і лунок на поверхні гранул є квазіодномодальними. Значному

зниженню питомої ваги першої моди розподілу за діаметрами іскроерозійних частинок (менше 2 мкм) сприяє зниження середньої за час імпульсу потужності розрядних імпульсів за збереженні їхньої енергії менше 15 Дж шляхом збільшення їхньої тривалості до субмілісекундного діапазону (порядку 0,5 мс) та одночасного зменшення амплітуд напруги (до 200 В) і струму (до 150 А). Незначна кількість таких частинок в результаті хімічної взаємодії з водою утворює гідроксид алюмінію, який виноситься із седиментаційного баку і не забруднює поле мікроскопа. Виродженню третьої моди розподілу за діаметрами іскроерозійних частинок (більше 30 мкм) сприяє зменшення відношення енергії розрядного імпульсу до об'єму активної зони розрядної камери до значень порядку 0,05 Дж/см³ і менше, що підтверджує аналіз розмірів гранул після їхньої обробки. За таких умов розподіл отриманих у воді іскроерозійних частинок алюмінію за діаметрами є одномодальним, в якому яскраво виражена лише друга мода найбільш загального розподілу іскроерозійних частинок сплавів за діаметрами.

2. Розподіл за розмірами іскроерозійних частинок, отриманих в режимах субмілісекундної тривалості розрядних імпульсів з енергією до 15 Дж і щільністю енергії в активній зоні розрядної камери до 0,05 Дж/см³ найкраще узгоджується з теоретичним розподілом Гауса, а лунок – з теоретичним розподілом інтеграла функції Розіна-Раммлера.

3. Аналітичний розподіл, який би одночасно добре узгоджувався з отриманими у результаті вимірювань розподілами діаметрів як ерозійних частинок, так і лунок і параметри якого не суперечать отриманим методами математичної статистики результатам, знайти не вдалося, навіть за різних значеннях його параметрів. Це свідчить про те, що після формування ерозійної лунки об'єм виплавленого та випаруваного металу проходить додаткові трансформації перш, ніж з нього сформується одна або декілька ерозійних частинок. Тому за виглядом розподілу діаметрів лунок не можна судити про вигляд розподілу діаметрів частинок і навпаки.

4. У описаних режимах, коли тривалість розрядних імпульсів перевищує кілька сотень мікросекунд, об'єм ерозійної лунки середньостатистичного діаметра приблизно дорівнює (у нашому випадку на 15% перевищує) об'єму ерозійної частинки середньостатистичного діаметра. Тобто, в таких режимах за об'ємом ерозійної лунки середньостатистичного діаметра можна оцінювати об'єм ерозійної частинки середньостатистичного діаметра, але за виглядом розподілу лунок за діаметрами не можна судити про розподіл частинок за діаметрами.

Роботу виконано за темою «Підвищення економічності та екологічності плазмоерозійного коагуляційного очищення води для теплових агрегатів ТЕС, ТЕЦ і АЕС (Н.Е.4.12)» державний реєстраційний номер 0119U001631 цільової програми наукових досліджень НАН України «Нова енергетика», КПКВК 6541030.

1. 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/10.1088/0957-4484/23/4/415604>

2. Solomon V.C., McCartney M., Tang Y.J., Berkowitz A.E., O'Handley R.C., Smith D.J. Magnetic domain configurations in spark-eroded ferromagnetic shape memory Ni-Mn-Ga particles. *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 192503-1 – 192503-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1925319>

3. Liu Y., Zhu K., Li X., Lin F., Li Y. Analysis of multi-scale Ni particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. Issue 4. Pp. 863–873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.003>

4. Berkowitz A.E., Harper H., Smith D.J., Hu H., Jiang Q., Solomon V.C., Radousky H.B. Hollow Metallic Microspheres Produced by Spark Erosion. *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. Pp. 940–942. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1779962>

5. Ochinn P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Yu.N., 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. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451>

6. Монастырский Г.Е., Коваль Ю.Н., Шпак А.П., Мусиенко Р.Я., Коломыцев В.И., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яковенко П.Г. Получение электроискровым методом порошков сплавов с эффектом памяти формы. *Порошковая металлургия*. 2007. № 5–6. С. 3–15.

7. 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)

8. 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. Issue 06. Pp. 1758–1763. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>

9. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark erosion: a high production rate method for producing $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7.
10. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандилянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 22. С. 74–79.
11. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. Vol. 61. Pp. 105–115.
12. Лопатько К.Г., Мельничук М.Д. Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. 297 с.
13. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде. *Химия и технология воды*. 1999. № 3. Т. 21. С. 328 – 336.
14. Danilenko N.B., Savelev G.G., Yavorovskii N.A., Khaskelberg M.B., Yurmazova T.A., Shamanskii V.V. Water purification to remove As(V) by electropulse treatment of an active metallic charge. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2005. Vol. 78. No 10. Pp. 1631–1635.
15. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
16. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Изучение эрозионного разрушения материалов при электроискровой обработке токопроводящих гранулированных сред. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 1. С. 3–10.
17. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкасский О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>
18. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекоп А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5 (60). С. 66–72.
19. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Юнити–Дана, 2004. 573 с.
20. Езепов Д. Критерий согласия Пирсона (Хи-квадрат). URL: <https://statanaliz.info/statistica/proverka-gipotez/kriterij-soglasiya-pirsona-khi-kvadrat/>. (Дата доступу: 13.05.2020).
21. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1969. 576 с.
22. Киреев В.В., Попов Д.М., Ратников С.А., Грачев А.В. Разработка методики оценки дисперсной среды сложного состава. *Техника и технология пищевых производств*. 2012. № 1(24). С. 107–112.
23. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем: М.: Финансы и статистика, 2006. 432 с.
24. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 6. С. 3–17.
25. Распределение Вейбулла. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Вейбулла. (Дата доступу: 15.05.2020).
26. Rosin P., Rammler E. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. *Journal of the Institute of Fuel*. 1933. Vol. 7. Pp. 39–36.
27. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. *Доклады АН СССР*. 1941. Т. 31. С. 99–101.

УДК: 621.3.014.14: 621.373.54: 620.1-1/-9

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ДИАМЕТРАМ ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СУБМИЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИСКРОЭРОЗИОННЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И ЛУНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ЕГО ГРАНУЛ

Н.А. Шидловская¹, чл.-корр. НАН Украины, С.Н. Захарченко¹, докт. техн. наук, А.Е. Перекоп², канд. физ.-мат. наук

¹ Институт электродинамике НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net

² Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульв. акад. Вернадского 36, Киев, 03142, Украина.

E-mail: perekos@ukr.net

Приведены условия и методика получения одномодальных распределений по размерам искроэрозионных частиц алюминия. Рассчитаны статистические параметры распределений по размерам искроэрозионных частиц

алюминия и лунок на поверхности его гранул, полученных при субмиллисекундной длительности разрядных импульсов. Проведен сравнительный анализ объемов металла эрозионных лунок и частиц. Проверено согласие полученных на практике распределений по диаметрам искроэрозионных частиц и лунок со следующими теоретическими распределениями непрерывной случайной величины: Гаусса, Вейбулла, интеграла функции Розина-Рамлера, а также с логарифмически нормальным. При этом параметры теоретических распределений рассчитывались как по статистическим параметрам полученных на практике распределений, так и по критерию наименьшего значения среднего модуля относительного отклонения теоретического и практического распределений. Показано, что при значениях параметров теоретических распределений, которые отвечают статистическим параметрам практических распределений, распределение эрозионных частиц по диаметрам лучше всего согласуется с распределением Гаусса, а лунок – с распределением интеграла функции Розина-Рамлера. Библ. 27, рис. 2, табл. 3.

Ключевые слова: разрядные импульсы, электроискровое диспергирование металлов, распределение искроэрозионных частиц

PECULIARITIES OF THE DIAMETER DISTRIBUTIONS OBTAINED AT SUBMILISECOND DURATION OF DISCHARGE PULSES SPARK-EROSIVE ALUMINUM PARTICLES AND CAVERNS ON THE SURFACE OF ITS GRANULES

N.A. Shydlovska¹, S.M. Zakharchenko¹, A.O. Perekos²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net

² G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics National Academy of Sciences of Ukraine, blvd. Academician Vernadsky, 36, Kyiv, 03142, Ukraine. E-mail: perekos@ukr.net

The conditions and technique for obtaining single-mode size distributions of spark-erosive aluminum particles are given. The statistical parameters of the size distributions of spark-erosive aluminum particles and caverns on the surface of its granules, obtained at a submillisecond duration of discharge pulses were calculated. A comparative analysis of the volumes of metal of erosion caverns and particles is carried out. The agreement of the diameter distributions of spark-erosive particles and caverns obtained in practice with the following theoretical distributions of a continuous random variable: Gauss, Weibull, the integral of the Rosin-Rammler function, and also log-normal distribution is verified. In this case, the parameters of theoretical distributions were calculated both by the statistical parameters of the distributions obtained in practice, and by the criterion of the smallest value of the average module of the relative deviation of the theoretical and practical distributions. It has been shown that for the values of the parameters of theoretical distributions that correspond to the statistical parameters of practical distributions, the distribution of erosive particles by diameters is in the best agreement with the Gauss distribution, and the caverns – with the distribution of integral of the Rosin-Rammler function. References 27, figures 2, tables 3.

Keywords: discharge pulses, electric spark dispersion of metals, distribution of spark-erosion particles

1. 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/10.1088/0957-4484/23/4/1415604>

2. Solomon V.C., McCartney M., Tang Y.J., Berkowitz A.E., O'Handley R.C., Smith D.J. Magnetic domain configurations in spark-eroded ferromagnetic shape memory Ni-Mn-Ga particles. *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 192503-1 – 192503-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1925319>

3. Liu Y., Zhu K., Li X., Lin F., Li Y. Analysis of multi-scale Ni particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. Issue 4. Pp. 863–873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.003>

4. Berkowitz A.E., Harper H., Smith D.J., Hu H., Jiang Q., Solomon V.C., Radousky H.B. Hollow Metallic Microspheres Produced by Spark Erosion. *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. Pp. 940–942. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1779962>

5. Ochinnikov P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Yu.N., 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. P. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451>

6. Monastyrskii G.E., Koval' Yu.N., Shpak A.P., Musienko R.Ya., Kolomytsev V.I., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yakovenko P.G. Electrospark Powders of Shape Memory Alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46. No 5-6. Pp. 207–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0034-4>

7. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavrenia 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)

8. 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. Issue 06. Pp. 1758–1763. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>
9. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark erosion: a high production rate method for producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7.
10. 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. Issue 22. Pp. 74–79. (Rus)
11. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. Vol. 61. Pp. 105–115.
12. Lopatko K.G., Melnichuk M.D. Physics, synthesis and biological functionality of nanosize objects. Kyiv: Vidavnychii centr Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryrodokorystuvannia Ukrainy, 2013. 297 p. (Ukr)
13. 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. *Khimiia i tehnologiia vody*. 1999. No 3. Vol. 21. Pp. 328 – 336. (Rus)
14. Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskii N.A., Khaskel'berg M.B., Yurmazova T.A., Shamanskii V.V. Water purification to remove As(V) by electropulse treatment of an active metallic charge. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2005. Vol. 78. No 10. Pp. 1631–1635.
15. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
16. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. The study of erosive destruction of materials during electrical spark treatment of conductive granular media. *Tekhnichna Electrodynamicika*. 2006. No 1. Pp. 3–10. (Rus)
17. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Physical Prerequisites of Construction of Mathematical Models of Electric Resistance of Plasma-erosive Loads. *Tekhnichna Electrodynamicika*. 2017. No 2. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>
18. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electroerosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
19. Kremer N.Sh. Probability Theory and Mathematical Statistics. Moskva: Unity–Dana, 2004. 573 p.
20. Yezepov D. Pearson's consent criterion (Chi-square). URL: <https://statanaliz.info/statistica/proverka-gipotez/kriterij-soglasiya-pirsona-khi-kvadrat/> (accessed at 13.05.2020). (Rus)
21. Ventzel E.S. Theory of Probability. Moskva: Nauka, 1969. 576 p. (Rus)
22. Kireyev V.V., Popov D.M., Ratnikov S.A., Grachev A.V. Development of Estimation Technique for Disperse Medium with Complex Composition. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2012. No 1(24). Pp. 107–112. (Rus)
23. Berezhnaya E.V., Berezhnoy V.I. Mathematical Methods of Modeling Economic Systems: Moskva: Finance and Statistics, 2006. 432 p.
24. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.N., Cherkasskyi A.P. Nonlinear-parametrical Model of Electrical Resistance of Current-Carrying Granulated Mediums for a Wide Range of Applied Voltage. *Tekhnichna Electrodynamicika*. 2014. No 6. Pp. 3–17. (Rus)
25. Weibull distribution. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution (accessed at 15.05.2020).
26. Rosin P., Rammler E. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. *Journal of the Institute of Fuel*. 1933. Vol. 7. Pp. 39–36.
27. Kolmogorov A.N. About the logarithmically normal law of particle size distribution during the crushing. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1941. Vol. 31. Pp. 99–101.

Надійшла 18.05.2020
Остаточний варіант 25.08.2020