

УДК 537.528 : 621.039.532

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ ТИТАНУ У ВУГЛЕВОДНЕВІЙ РІДИНІ

О. М. СИЗОНЕНКО, М. С. ПРИСТАШ, Е. І. ТАФТАЙ,
А. С. ТОРПАКОВ, Є. В. ЛИПЯН

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

Фізично змодельовано електророзрядні процеси в шарі порошку Ті у гасі та етиловому спирті. Проаналізовано залежності розподілу плазмових утворень в об'ємі розрядної камери зі збільшенням кількості розрядів. Підтверджено можливість синтезу частинок субмікронного та ультрадисперсного діапазону за високовольтного електророзрядного оброблення порошку титану у вуглеводневій рідині (спирт або гас) внаслідок електротеплового впливу плазми розрядів на частинки порошку.

Ключові слова: *гас, спирт етиловий, електричний розряд, нановуглець, електро-розрядне диспергування, титан, плазма, плазмові технології.*

Physical modeling of electric discharge processes in a Ti powder layer in kerosene and alcohol is carried out. Dependences of the distribution of plasma formations in the volume of the discharge chamber with the increase of a number of discharges are analyzed. The possibility to synthesize the particles of submicron and ultradispersive range under high-voltage electric-spark treatment of titanium powder in hydrocarbon liquid (alcohol or kerosene) due to electric heat influence of the discharge plasma on powder particles is proposed.

Keywords: *kerosene, ethylene alcohol, electric discharge, electric discharge dispersion, titanium, plasma, plasma technology.*

Вступ. Упродовж останніх десятиріч у науково-технічному осередку розвинутих країн світу виконують дослідницькі роботи зі створення нових металевих та металокомпозитних матеріалів з підвищеними фізико-хімічними властивостями. Потреба у нових композиційних матеріалах із високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, які забезпечать необхідну надійність роботи виробів в екстремальних умовах, є актуальною для розвитку сучасної техніки. На жаль, можливості їх отримання за допомогою традиційних металургійних методів значною мірою вичерпані. Тому важливим завданням є створення нових матеріалів з вищими фізико-механічними властивостями, ніж отримані традиційними металургійними способами, зі застосуванням фізичних методів диспергування та синтезу твердих фаз. Одним з таких методів є високоенергетична підготовка порошків за допомогою високовольтних електричних розрядів (ВЕР) [1, 2].

Головна ідея застосування ВЕР для приготування вихідних порошкоподібних сумішей полягає в тому, що під час оброблення порошків у вуглеводневій рідині відбувається диспергування, синтез нановуглецю різних алотропних модифікацій та дисперснозміцнювальних додатків різної стехіометрії [1–4].

Комплекс чинників за ВЕР обробки: термічний вплив плазмових утворень міжчасткових розрядів, який обумовлює перенесення (абляцію) металу з поверхні частинок в робочу рідину з подальшою рекристалізацією, і ударна дія хвиль стиснення-розтягування, які виникають внаслідок стрімкого розширення плазмових утворень [1–5].

Контактна особа: М. С. ПРИСТАШ, e-mail: prystash@nas.gov.ua

Перспективність використання ВЕР обробки порошків пов'язана з можливістю отримання ультрадисперсних мікро- і нанорозмірних частинок з підвищеним рівнем вільної енергії і, як наслідок, з посиленою здатністю до інтенсивної взаємодії з навколишнім середовищем, зокрема, з нановуглецевими частинками, які утворюються внаслідок піролізу вуглеводневих рідин плазмовим каналом розряду [1].

Проте процеси ВЕР обробки металевих порошків у рідких діелектриках залишаються недостатньо вивченими, незважаючи на низку теоретичних припущень і гіпотез [1–5]. Зокрема, відсутні результати про вплив складу вуглеводневої робочої рідини на високовольтний електричний розряд та закономірності розподілу плазмових утворень. Відомі роботи, в яких подібні дослідження виконували для об'ємного електроіскрового диспергування [6–12], що дає можливість використовувати схожу методологію для вивчення ВЕР обробки металевих порошків.

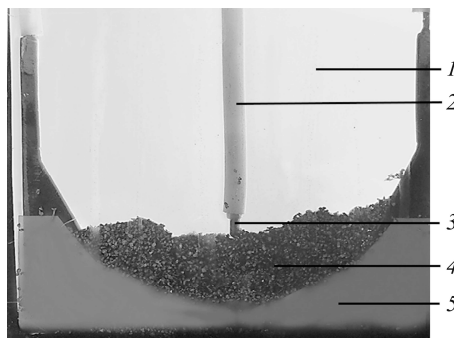
Мета роботи – дослідити вплив складу робочої рідини (гасу та етилового спирту) на особливості високовольтного електричного розряду в дисперсній системі “вуглеводнева рідина–порошок Ті”.

Методика досліджень. Для оцінювання впливу складу робочої рідини на дію високовольтного електричного розряду виконали фізичне моделювання електророзрядних процесів, які відбуваються в дисперсній системі “порошок Ті–вуглеводнева рідина”. Для цього використали порошок титану марки ПТ-6 ТУ У 14-10-026-98 із середнім діаметром 60 μm , виготовлений ПАТ “Інститут титану”. Як робоче середовище під час високовольтної обробки порошку титану використовували вуглеводневі рідини з різною кількістю атомів вуглецю у складі молекули, а саме гас освітлювальний (ГОСТ 11128-65) та спирт етиловий ректифікований (ДСТУ 4221:2003). Використання вуглеводневої рідини за високовольтного розряду дає змогу не тільки запобігти утворенню небажаних оксидів титану [2], а й синтезувати різні алотропні модифікації нановуглецю, який завдяки своїй активності може утворювати карбіди металів.

Для фізичного моделювання електророзрядних процесів у шарі порошку Ті в гасі та етиловому спирті виготовили плоску прозору розрядну камеру (рис. 1) для фотографічної реєстрації розрядів у товщі порошку. Відстань між прозорими стінками камери $k = 5 \text{ mm}$. Під час обробки застосували електродну систему “вістря–площина”. Для фотореєстрації інтегрального розподілу плазмових утворень у товщі порошку використовували дзеркальну фотокамеру.

Рис. 1. Зовнішній вигляд плоскої прозорої розрядної камери:
1 – вуглеводнева рідина; 2 – ізолятор;
3 – анод; 4 – порошок титану;
5 – катод.

Fig. 1. An external view of a flat transparent discharge chamber:
1 – hydrocarbon liquid; 2 – insulator;
3 – anode; 4 – titanium powder;
5 – cathode.



Розрядну камеру через повітряний розрядник, який забезпечував встановлення робочої напруги, підключили до конденсаторної батареї ємністю $C = 0,2 \mu\text{F}$, а зарядна напруга U становила 20 kV.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз результатів дослідження свідчить, що на початку ВЕР обробки у вуглеводневій рідині (спирт або гас) із електродною системою “вістря–площина” плазмові утворення сконцентровані

переважно у ближньоелектродній зоні (рис. 2а, б). Пробійна напруга тут становила ~16 кВ (рис. 2а), що нижче, ніж зарядна (20 кВ). Кількість повних періодів розрядного струму – 5, що свідчить про режим, близький до короткого замикання. Зі збільшенням кількості розрядів пробійна напруга дещо знижується (до ~14 кВ), що свідчить про незначне зростання електропровідності робочого середовища внаслідок деструкції спирту у мікроплазмових каналах.

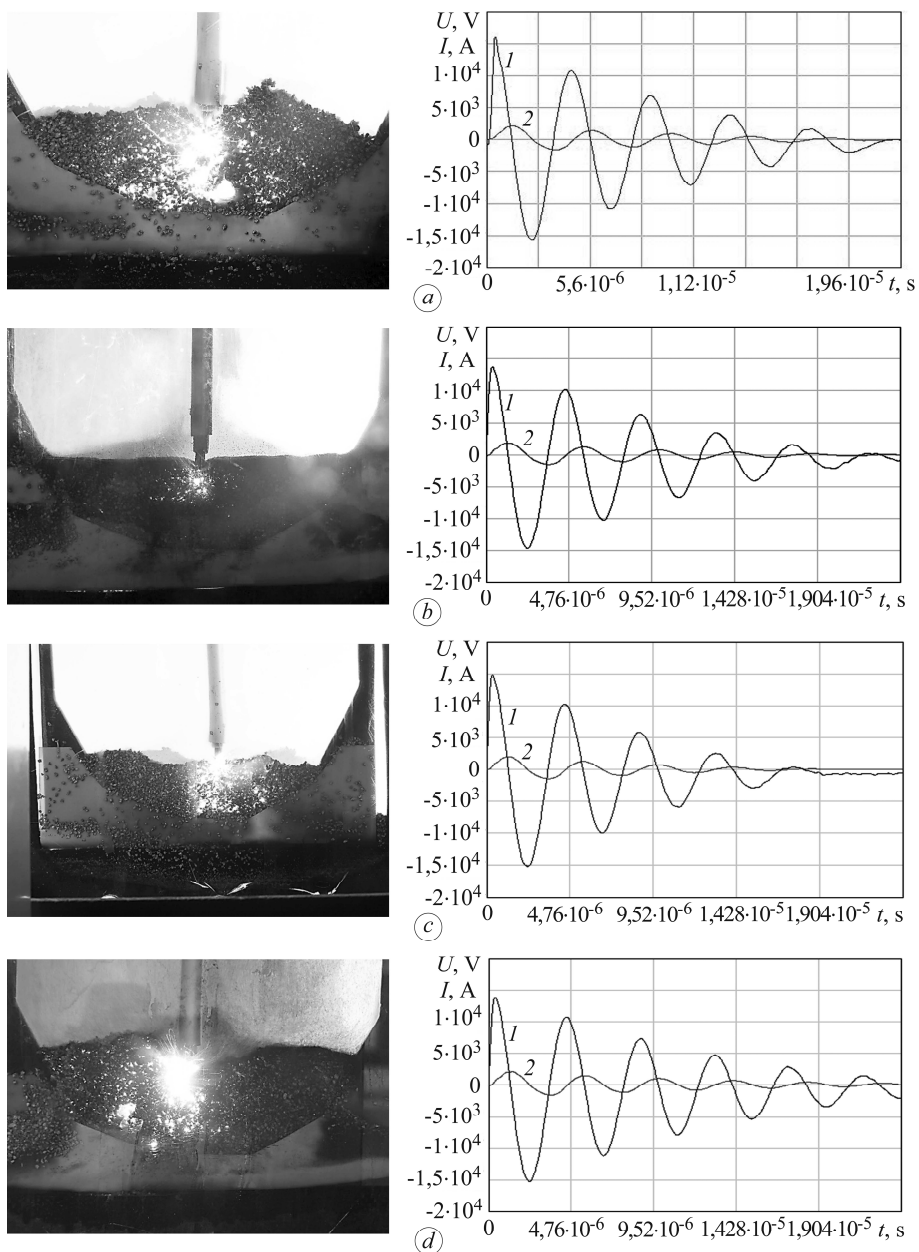


Рис. 2. Інтегральні фотографії та осцилограми першого (а, б) та 50-го розряду (с, д) ВЕР обробки у спирті (а, с) і гасі (б, д) із електродною системою “вістря–площина”:
 1 – розрядна напруга; 2 – розрядний струм.

Fig. 2. Integral photographs and oscillograms of the first discharge (a, b) and the 50th discharge (c, d) of high-voltage electric discharge (HVED) treatment alcohol (a, c) and kerosene (b, d) with a “point–plane” electrode system: 1 – discharge voltage; 2 – discharge current.

Зі зростанням кількості розрядів у гасі (рис. 2*b, d*) плазмові утворення спостерігаємо у більшому об'ємі порошку, що супроводжується суттєвим викидом вуглецю та швидким помутнінням гасу. Це може свідчити про поступове збільшення електричної провідності гасу по мірі його піролізу зі зростанням кількості розрядів, що підтверджується зміною характеру осцилограми розряду, де кількість повних періодів струму зростає з п'яти (для першого розряду) до шести (для 50-го).

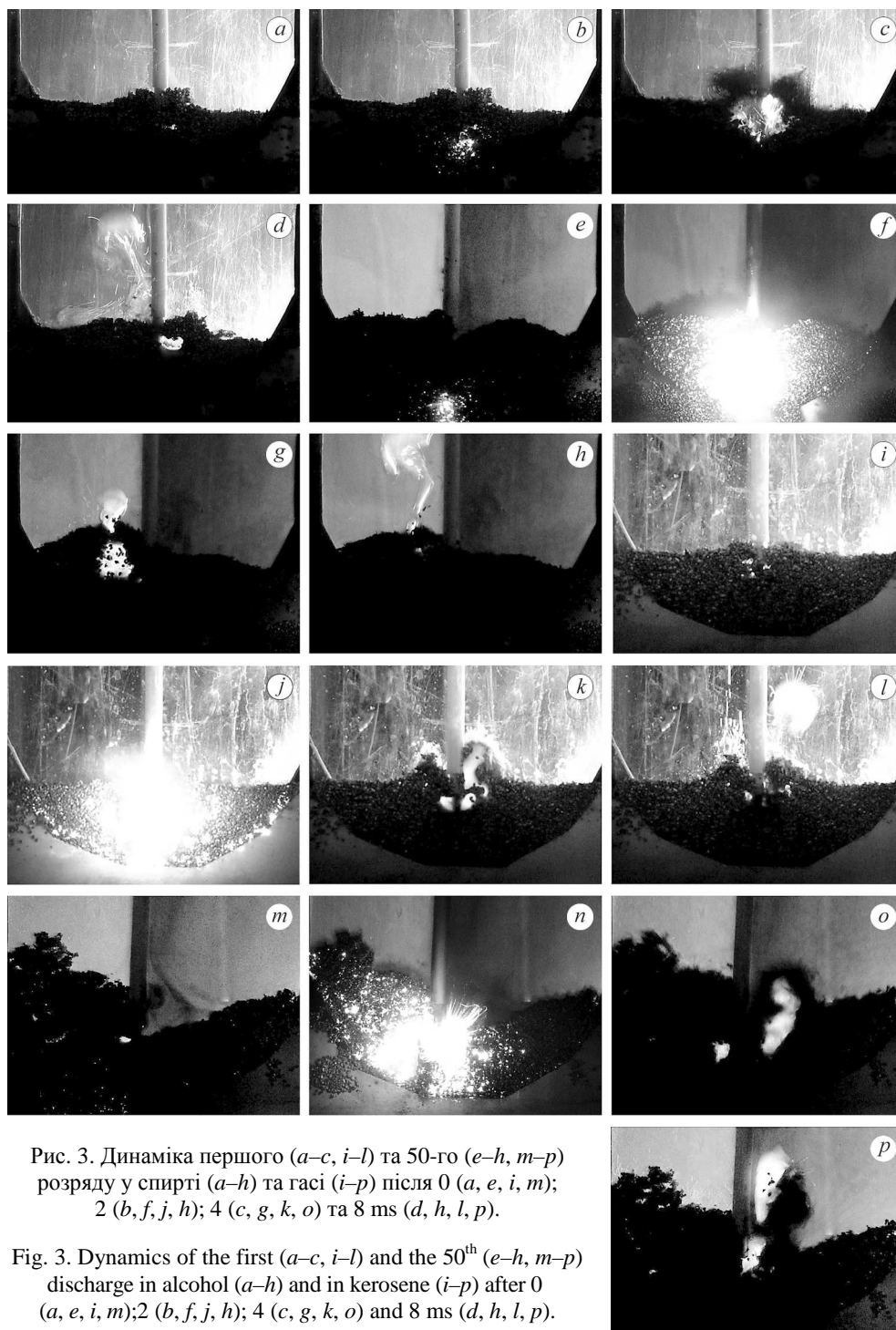


Рис. 3. Динаміка першого (*a–c, i–l*) та 50-го (*e–h, m–p*) розряду у спирті (*a–h*) та гасі (*i–p*) після 0 (*a, e, i, m*); 2 (*b, f, j, h*); 4 (*c, g, k, o*) та 8 ms (*d, h, l, p*).

Fig. 3. Dynamics of the first (*a–c, i–l*) and the 50th (*e–h, m–p*) discharge in alcohol (*a–h*) and in kerosene (*i–p*) after 0 (*a, e, i, m*); 2 (*b, f, j, h*); 4 (*c, g, k, o*) and 8 ms (*d, h, l, p*).

Пробійна напруга, як і за використання спирту як робочого середовища, теж дещо знижується зі збільшенням кількості розрядів (з до 15 kV до ~14 kV), що теж свідчить про певне зростання електричної провідності робочого середовища.

Окремо варто зазначити зміну розташування порошку відносно електродної системи під час оброблення. Циклічне формування плазмових утворень (і, як наслідок, парогазових порожнин) у приелектродній зоні призводить до зміщення порошку від центральної частини камери до її стінок, що сприяє посиленню гідродинамічного впливу та послабленню ефектів абляції (рис. 3).

За фізичного моделювання ВЕР обробки порошку у етиловому спирті ефект синтезу нановуглецю виражений менш помітно, що корелює із результатами [13], згідно з якими, за ВЕР обробки в однакових режимах кількість синтезованого нановуглецю за використання гасу у ~ 5 разів перевищує кількість нановуглецю, синтезованому в етиловому спирті. Це призводить до меншого потемніння робочої рідини.

Внаслідок цього основні зміни електропровідності робочого проміжку відбуваються через ефект виштовхування, при цьому картина розподілу плазмових утворень в об'ємі камери залишається практично незмінною – на відміну від оброблення за використання гасу, де інтенсивність формування розрядів між частинками зростає зі збільшенням кількості розрядів, у етиловому спирті плазмові утворення займають приблизно однаковий об'єм приелектродної зони незалежно від кількості робочих циклів.

Таким чином, використання етилового спирту як робочої рідини дає змогу певною мірою стабілізувати режим розряду, а також збільшити кількість розрядів до появи залишкового нановуглецю, внаслідок чого можна досягнути більшої дисперсності оброблених порошків.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що склад вуглеводневої рідини (спирт або гас) впливає на високовольний електричний розряд у дисперсній системі “вуглеводнева рідина–порошок Ti”. За використання гасу інтенсивність формування розрядів між частинками зростає зі збільшенням кількості розрядів, а в етиловому спирті плазмові утворення займають приблизно однаковий об'єм приелектродної зони незалежно від кількості робочих циклів. Етиловий спирт як робоча рідина дає змогу певною мірою стабілізувати режим розряду, а також збільшити кількість розрядів до появи залишкового нановуглецю, внаслідок чого можна досягнути більшої дисперсності оброблених порошків. Дослідження підтвердили можливість синтезу частинок субмікронного та ультрадисперсного діапазону за ВЕР обробки порошку титану у вуглеводневій рідині (спирт або гас) через електротепловий вплив плазми розрядів на частинки порошку.

1. *Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles* / O. N. Sizonenko, E. G. Grigoryev, N. S. Pristash, A. D. Zaichenko, A. S. Torpakov, Ye. V. Lypian, V. A. Tregub, A. G. Zholnin, A. V. Yudin, and A. A. Kovalenko // *High Temperature Materials and Processes*. – 2017. – **36**, № 9. – P. 891–896.
2. *The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes* / O. Sizonenko, S. Prokhorenko, A. Torpakov, D. Zak, Y. Lypian, R. Wojnarowska–Nowak, J. Polit, and E. Sheregii // *AIP Advances*. – 2018. – **8**, № 8. – P. 085317.
3. *Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge* / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko, E. I. Taftai, E. V. Lypian, A. D. Zaichenko, A. S. Torpakov, and E. V. Guseva // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2012. – **51**, № 3/4. – P. 129–136.

4. *Effect of high-voltage discharge on the particle size of hard alloy powders* / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko, G. P. Bogatyreva, N. A. Oleinik, E. I. Taftai, E. V. Lipyay, and A. S. Torpakov // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2011. – **49**, № 11/12. – P. 630–636.
5. *The influence of high-voltage electrical discharge on dispersion and structure of B₄C powder* / O. M. Syzonenko, P. I. Loboda, A. D. Zaichenko, Ye. V. Solodkyi, A. S. Torpakov, M. S. Prystash, and V. O. Trehub // *J. of Superhard Mat.* – 2017. – **39**, № 4. – P. 243–250.
6. *Намитокоев К. К.* Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
7. *Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования* / А. А. Щерба, С. Н. Захарченко, К. Г. Лопатько, Н. И. Шевченко, Н. А. Ломко // *Праці ІЕД НАНУ*, 2010. – № 26. – С. 152–160.
8. *Агеев Е. В., Семенухин Б. А., Латыпов Р. А.* Исследование влияния электрических параметров установки на процесс порошкообразования при электроэрозионном диспергировании отходов твердого сплава // *Изв. Самарск. научн. центра Российской академии наук*. – 2009. – **11**, № 5 (2). – С. 238–240.
9. *Меерсон Г. А., Кассир Г. А., Темников Е. М.* Электроимпульсный способ получения порошков металлов и сплавов // *Порошковая металлургия*. – 1976. – № 2. – С. 9–15.
10. *Щерба А. А., Щерба М. А.* Моделирование и анализ электрического поля в диэлектрической среде, возмущенного проводящими микровключениями разных размеров и конфигураций // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 6. – С. 3–9.
11. *Щерба А. А., Захарченко С. М., Спінул Л. Ю.* Закономірності змінення електричного опору шару алюмінієвих гранул при їх електроіскровому диспергуванні // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – Вип 25. – С. 133-139.
12. *Щерба А. А., Петриченко С. В.* Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”*. – 2002. – С. 61–65.
13. *Зависимость выхода углеродных наноматериалов от строения молекул органических жидкостей в процессе электроразрядной обработки* / Н. И. Кускова, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, В. Ю. Бакларь // *Электронная обработка материалов*. – 2013. – **49**, № 1. – С. 14–19.

Одержано 30.06.2020