

- Scientific Heritage*, 47, 26–30.
6. *Shcho take haubytsi ta SAU, yaki tak vazhlyvi u viini Rosii proty Ukrainy [What are howitzers and self-propelled guns, which are so important in Russia's war against Ukraine]*. (b.d.). VVS News Ukraine. <https://www.bbc.com/ukrainian/news-61266396> [in Ukrainian].
 7. Derevianchuk, A. Y. (2011). *Osnovy budovy artyleriiskykh harmat ta boieprypasiv: pidruchnyk [Basics of the structure of artillery guns and ammunition: a textbook]*. Sumskyi derzhavnyi universytet [in Ukrainian].
 8. Jakopčić, M., & Grilec, K. (2011). Influence of artillery weapon barrel superheat on erosion wear resistance of material. *Tehnicki Vjesnik*, 18(2).

УДК 621.537.528:621.762.3

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-326-336

О. М. Сизоненко, д-р техн. наук, **А. С. Торпаков**, **М. С. Присташ**,
кандидати технічних наук

*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, просп. Богоявленський, 43-а,
54018, Миколаїв, e-mail: olgasizonenko43@gmail.com*

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ Al – Ti – C

Метою роботи є створення поліфункціональних композиційних матеріалів із використанням висококонцентрованих потоків енергії.

В роботі використані методи фізичного експерименту, реєстрації швидкоплинних електричних процесів, рентгенофазового аналізу, оптичної мікроскопії, а також експериментальні методи визначення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів (твердість, зносостійкість, жаростійкість). Робота ґрунтується на новому підході до отримання метало-матричних композитів (ММК), у якому дисперснозміцнюючі вклучення не додаються механічно у порошкову суміш як додатковий компонент, а синтезуються під час обробки високовольтним електричним розрядом (ВЕР) та досягається гомогенне змішування компонентів. Подальша консолідація підготованих порошків методом іскрового плазмового спікання (ІПС) дозволяє запобігти зростанню зерна та отримувати консолідований матеріал за відносно невеликий час при менших енергозатратах, ніж у традиційних методах.

ВЕР обробка порошкової системи вихідного складу 85 % Ti + 15 % Al у етанолі при $W_{\text{num}} = 10$ МДж/кг дозволяє диспергувати вихідні порошки від середнього діаметру 33 мкм до середнього діаметру ~ 6 мкм та синтезувати в них дисперснозміцнюючі фази TiC, Ti₂AlC, та Ti₃AlC₂. Консолідація підготовленої шихти методом ІПС дозволяє отримати наноламінат-композит Ti₃AlC₂ – TiC твердістю HV5 = 4 ГПа. Абсолютна інтенсивність зношування матеріалу складала 0,007 г/км.

Практичне значення роботи полягає в тому, що підготовка порошків за допомогою ВЕР із наступною консолідацією методом ІПС дозволяє отримати ММК із підвищеним рівнем твердості, зносостійкості та жаростійкості для отримання інструментів різного призначення та конструкційних матеріалів для використання у авіакосмічній галузі та машинобудуванні.

Оригінальність роботи випливає з того, що нові ММК отримують шляхом підготовки вихідних порошків ВЕР, що сприяє диспергуванню порошків та реакційному синтезу дисперснозміцнюючих вклучень під впливом мікроплазмових розрядів, а подальше ІПС забезпечує керовану зміну фазового складу та структури.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, іскрове плазмове спікання, металоматричний композит, твердість, зносостійкість, жаростійкість

Вступ

Найважливішим завданням сучасного машинобудування є підвищення конструкційної міцності, надійності та довговічності деталей. Підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів та виробів вимагає створення оптимальних структур, що забезпечують необхідний рівень надійності і довговічності.

Отримання оптимальних структур, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей, можливе зокрема шляхом створення дислокаційної структури за рахунок наявності дисперсних фаз у структурі матеріалу [1]. Тому в усьому світі активізуються дослідження, спрямовані на більш широке практичне застосування металоматричних композиційних матеріалів (ММК), в яких поєднуються переваги конструкційних металевих матеріалів з перевагами наповнювача, найчастіше, високомодульного. Тому для ММК характерні високі значення міцності, модулів пружності, в'язкості руйнування, вони зберігають стабільність своїх характеристик в широких температурних межах, мають високу електро- і теплопровідність, а також малу чутливість до поверхневих дефектів [2].

В роботі [3] показано перспективність ММК, армованих дисперсними тугоплавкими частинками, для впровадження в автомобілебудуванні і інших галузях машинобудування. Однак, незважаючи на переваги ММК перед традиційними матеріалами, їх виробництво і застосування наразі обмежено. Зокрема, відсутні рекомендації по розробці дисперснозміцнених алюмоматричних композиційних матеріалів і технологічних процесів їх виробництва для заданих конкретних умов експлуатації при забезпеченні оптимального комплексу механічних і експлуатаційних властивостей.

Тому дослідження ефективного використання високовольтного електричного розряду (ВЕР) для підготовки вихідних порошків до консолідації є актуальною науковою задачею. Реалізація високовольтного електричного розряду в дисперсній системі «вуглеводнева рідина – порошок» дозволяє досягнути зміни дисперсності до полідисперсних розмірів і синтезу МАХ-фаз системи $Ti - Al - C$ та карбідної складової TiC . Використання для компактування оброблених ВЕР порошкових матеріалів іскрового плазмового спікання (ПС) забезпечує збереження зерногетерофазної структури в матеріалі.

При цьому дисперснозміцнюючі вclusions не додаються механічно у порошкову суміш як додатковий компонент, а синтезуються під час ВЕР обробки як результат реакційного синтезу під впливом мікроплазмових розрядів, та досягається гомогенне змішування компонентів. Подальше ПС забезпечує керовану зміну фазового складу і щільності із збереженням дисперсної структури. Це дозволяє отримувати необхідну порошкову суміш та консолідований з неї матеріал за відносно невеликий час та при менших енергозатратах, ніж у традиційних методах [4–6].

Метою роботи є створення поліфункціональних композиційних матеріалів із використанням висококонцентрованих потоків енергії.

Об'єкти і методика досліджень

У ролі вихідних матеріалів для дослідження було обрано елементарні порошки Ti марки ПТ-6 ТУ У 14-10-026-98 (середній діаметр до обробки $d_0=60$ мкм), Al марки ПА1 ГОСТ 6058-73 ($d_0=21$ мкм) та їх суміш масового складу 85 % Ti + 15 % Al . Дослідження виконували в суміші системи $Al - Ti$ у вуглеводневій рідині. Склад порошкової системи $Al - Ti$, а саме 85 %

Ti + 15 % Al, обрано для забезпечення умов для утворення МАХ-фаз системи Al – Ti – С стехіометричного складу (Ti_2AlC та Ti_3AlC_2) [7].

У ролі робочої рідини використовували гас марки ТС-1 (ГОСТ 10227-86) та етиловий спирт (ДСТУ 4221:2003). Використання вуглеводневої рідини замість води дозволяє запобігти окисненню частинок оброблюваного металу. Як показано в [4–6, 8, 9], відмінністю високовольтного електричного розряду у вуглеводневій рідині є її піроліз (розрив ланцюгів зв'язків) під впливом температури плазмового каналу розряду та імпульсного тиску із утворенням активних наночастинок вуглецю до C_{70} [10], що створює умови для синтезу дисперснозміцнюючих сполук, зокрема, карбідів та МАХ-фаз. Співвідношення твердої та рідкої фази при дослідженнях складало 1:15 (маса оброблюваного порошку 100 г, об'єм робочої рідини – 1,5 дм³).

Для проведення ВЕР обробки використовували дослідний стенд, головною особливістю якого є можливість досягнення високої швидкості введення енергії в канал розряду (швидкість зростання струму di/dt до 40 ГА/с) за рахунок низької індуктивності розрядного контуру (менш 0,7 мкГн), що дозволяє досягати високих значень (сотні МПа) пікового тиску хвилі стиснення [4–6, 8, 9, 11]. Схему та детальний опис експериментального стенду та зокрема робочої камери наведено у роботах [4, 11].

Дослідження ВЕР в дисперсній системі «рідкий діелектрик – порошок металу» згідно результатів робіт [4–6, 8, 9, 11] виконували при напрузі $U=50$ кВ, індуктивності розрядного контуру L до 1 мкГн та розрядному проміжку l_p , який обирався в залежності від робочої рідини і складав ~17 мм для гасу та ~24 мм – для етилового спирту. В процесі досліджень виконували варіювання питомою енергією обробки за рахунок зміни кількості розрядів n при сталому значенні накопиченої енергії одиничного розряду 1 кДж.

В дослідженнях використовували електродну систему (ЕС) «багатовістрійний анод – площа» (БВ – П) із трьома вістрями. Згідно з результатами робіт [12, 13], використання такої ЕС дозволяє досягнути більш рівномірного розподілу плазмових утворень у об'ємі порошку, що оброблюється, у порівнянні із використанням традиційної для технологій диспергування порошоків за допомогою ВЕР електродної системи типу «одновістрійний анод – площа». Це дозволяє інтенсифікувати процеси електроерозійного та гідродинамічного диспергування та синтезу карбідних, інтерметалідних та МАХ сполук при ВЕР обробці [4–6, 8, 9].

Після обробки суміш порошоків та вуглеводневої рідини зливали з камери та висушували. Зміну дисперсності та фазового складу оброблених порошоків визначали із використанням методів оптичної мікроскопії (мікроскоп «Біолам-І») та рентгенофазового аналізу (дифрактометр Bruker D8 DISCOVER). Обробку результатів рентгенофазового аналізу здійснювали з використанням програмного забезпечення Bruker: EVA.

Всі експериментальні данні наведено після статистичної обробки за результатами не менш, ніж 5 експериментів. Похибка досліджень становила не більш, ніж 5 %.

Дослідження та відпрацювання оптимальних режимів відбувалося шляхом консолідації зразків ММК та визначення їх складу, структури та основних фізико-механічних та експлуатаційних характеристик згідно методик, наведених у [4–6, 8, 9, 11–13].

ІПС оброблених зразків виконували на розробленому у ІПТ НАНУ комплексі «Гефест-10», який дозволяє консолідувати порошки у графітових матрицях шляхом механічного навантаження у вакуумі шляхом пропускання через порошкову засипку суперпозиції постійного та змінного (54 кГц) струмів сумарною амплітудою 1,1 кА при механічному навантаженні до 60 МПа [5].

Попередні дослідження [5, 6] показали, що для збереження ультрадисперсного розміру (від 300 до 600 нм) частинок TiC у структурі консолідованого матеріалу швидкість нагрівання

зразків повинна складати 10 °С/с. Час ізотермічної витримки при $T=1100$ °С має складати не більше за 3 хв, а величина механічного навантаження має бути максимальною (60 МПа).

Твердість за Віккерсом визначали згідно ДСТУ ISO 6507-1:2007. Для всіх консолідованих зразків ММК було виконано дослідження зносостійкості. Випробування характеристик абразивного зношування виконували ваговим методом на машині тертя «СМЦ-2» згідно методики, викладеної у роботі [14].

Жаростійкість досліджуваних зразків визначали шляхом їх витримки у печі СНОЛ 7,2/1300 на повітрі ваговим методом (по зростанню маси зразку) згідно ГОСТ 6130–71. Зразки завантажували до печі та виконували витримку при температурі у 600 °С протягом 5 год із наступним охолодженням всередині печі протягом 16 год до температури ~115 °С. Дослідження повторювали протягом п'яти циклів. Загальна тривалість досліджень при підвищеній температурі для кожного зразка складала 105 год, а загальний час витримки при температурі у 600 °С становив 25 год.

Результати та обговорення

ВЕР-обробка суміші порошоків 85 % Ti + 15 % Al у гасі із $W_{\text{пит}}=10$ МДж/кг призводить до зміщення основного піку розподілу частинок суміші за розмірами із точки 20 мкм (~68 %) у точку 7,5 мкм (35 %, 1, крива 2), при цьому середній діаметр суміші після обробки у такому

режимі складає ~ 8 мкм, а ~22 % частинок потрапляють у діапазон діаметрів менш ніж 1 мкм.

Збільшення питомої енергії обробки до 20 МДж/кг призводить до подальшого диспергування частинок оброблюваного порошку (1, крива 3) – пік розподілу зміщується у точку 7 мкм (36 %), середній діаметр частинок суміші після обробки становить 6,2 мкм, а ~ 20 % частинок мають

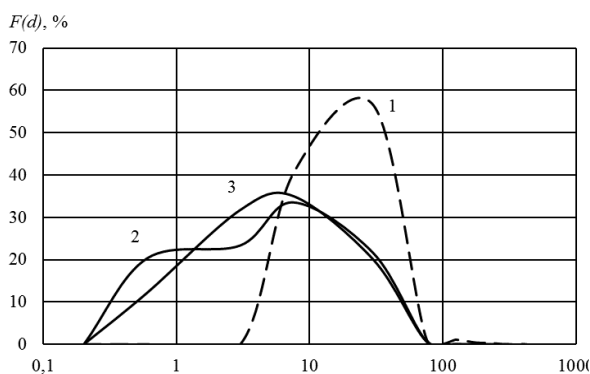


Рис. 1 Розподіл частинок порошку 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки у гасі в режимі ОБР із різними значеннями $W_{\text{пит}}$: 1 – вихідний порошок; 2 – 10 МДж/кг, 3 – 20 МДж/кг

діаметр менш ніж 1 мкм.

ВЕР-обробка суміші порошоків 85 % Ti + 15 % Al у етанолі із $W_{\text{пит}}=10$ МДж/кг призводить до зростання кількості частинок розміром 1 мкм (18 %, рис. 2, крива 2), а менш ніж 1 мкм – близько 10 %, при цьому середній діаметр суміші після обробки у такому режимі складає ~ 9 мкм. Збільшення питомої енергії обробки до 20 МДж/кг призводить до подальшого диспергування частинок оброблюваного порошку (рис. 2, крива 3) – пік розподілу зміщується у точку 7 мкм (42 %),

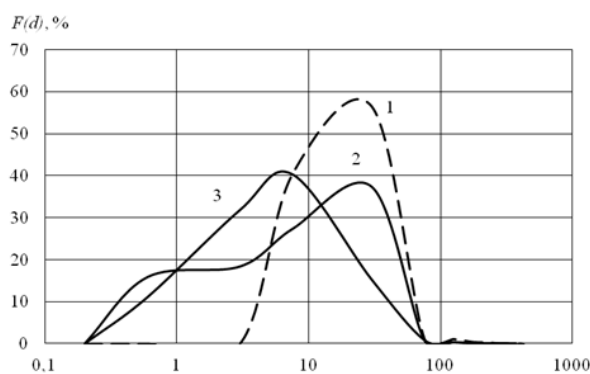


Рис.2 Розподіл частинок порошку 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки у етанолі в режимі ОБР із різними значеннями $W_{\text{пит}}$: 1 – вихідний порошок; 2 – 10 МДж/кг, 3 – 20 МДж/кг

середній діаметр частинок суміші після обробки становить 6,2 мкм, кількість частинок розміром 1 мкм становить 18 %, (рис. 2, крива 3), а менш ніж 1 мкм – близько 10 %.

Пропускання суперпозиції постійного та змінного електричного струму під час іскроплазмового спікання (ІПС) через порошкову суміш початкового складу 85% Ti + 15% Al після ВЕР обробки шляхом реалізації ОБР у гасі та в етанолі призвело до додаткових фазових перетворень в консолідованому матеріалі, а саме утворення TiC, Ti₂AlC, Ti₃AlC₂ та часткове вивільнення вуглецю у всіх вибраних режимах (рис. 3). При цьому інтенсивність піків вихідних Ti та Al зі збільшенням питомої енергії обробки зменшується, а інтенсивність піків TiC, Ti₂AlC та Ti₃AlC₂ зростає. Це свідчить про те, що синтез нових фаз відбувається при кожному розряді в серії.

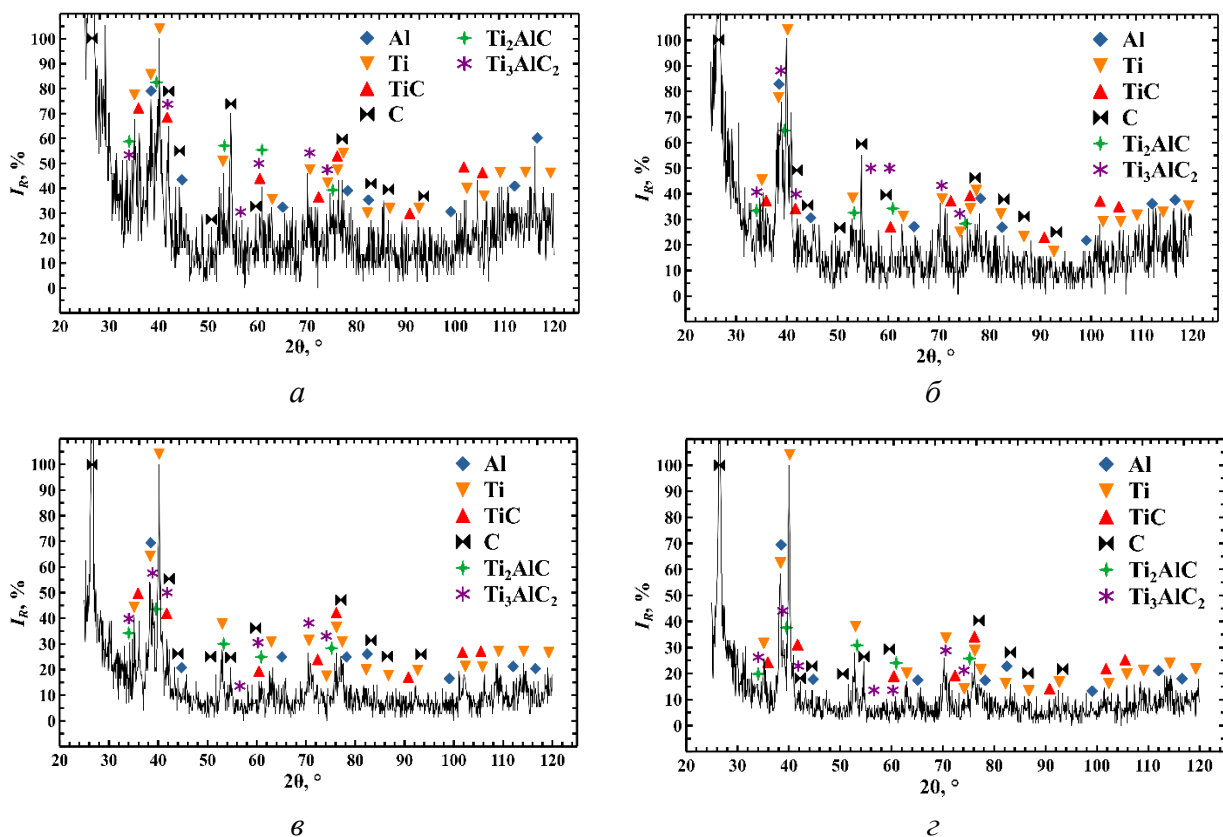


Рис. 3. Дифрактограми матеріалів, консолідованих методом ІПС з шихти, отриманої шляхом ВЕР обробки суміші 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР в гасі (а, в) та етиловому спирті (б, г) з питомою енергією 10 МДж/кг (а, б) та 20 МДж/кг (в, г)

Після консолідації шихти, отриманої шляхом ВЕР обробки суміші 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР у гасі з питомою енергією 10 МДж/кг, матеріал має однорідну структуру з рівномірно розподіленими вуглецевмісними зонами загальної площею до 5% (рис. 4, а). Збільшення енергії обробки до 20 МДж/кг призвело до збільшення відносної кількості вуглецевмісних компонентів, площа яких становить до 30% від загальної площі поверхні зразка (рис. 4, в). Консолідація шихти, отриманої шляхом ВЕР обробки суміші 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР в етанолі з питомою енергією 10 МДж/кг, також дозволила отримати матеріал з однорідною структурою та рівномірно розподіленими вуглецевмісними зонами загальної площею до 5% від площі дослідженого (див. рис.2, б). Збільшення енергії обробки до 20 МДж/кг призвело до

значного збільшення площі вуглецевмісних компонентів, яка становить 20% (див. рис. 4, г). Таким чином, заміна робочого середовища ВЕР з гасу на етанол під час реалізації режиму ОБР призводить до зниження кількості синтезованого під час обробки вуглецю.

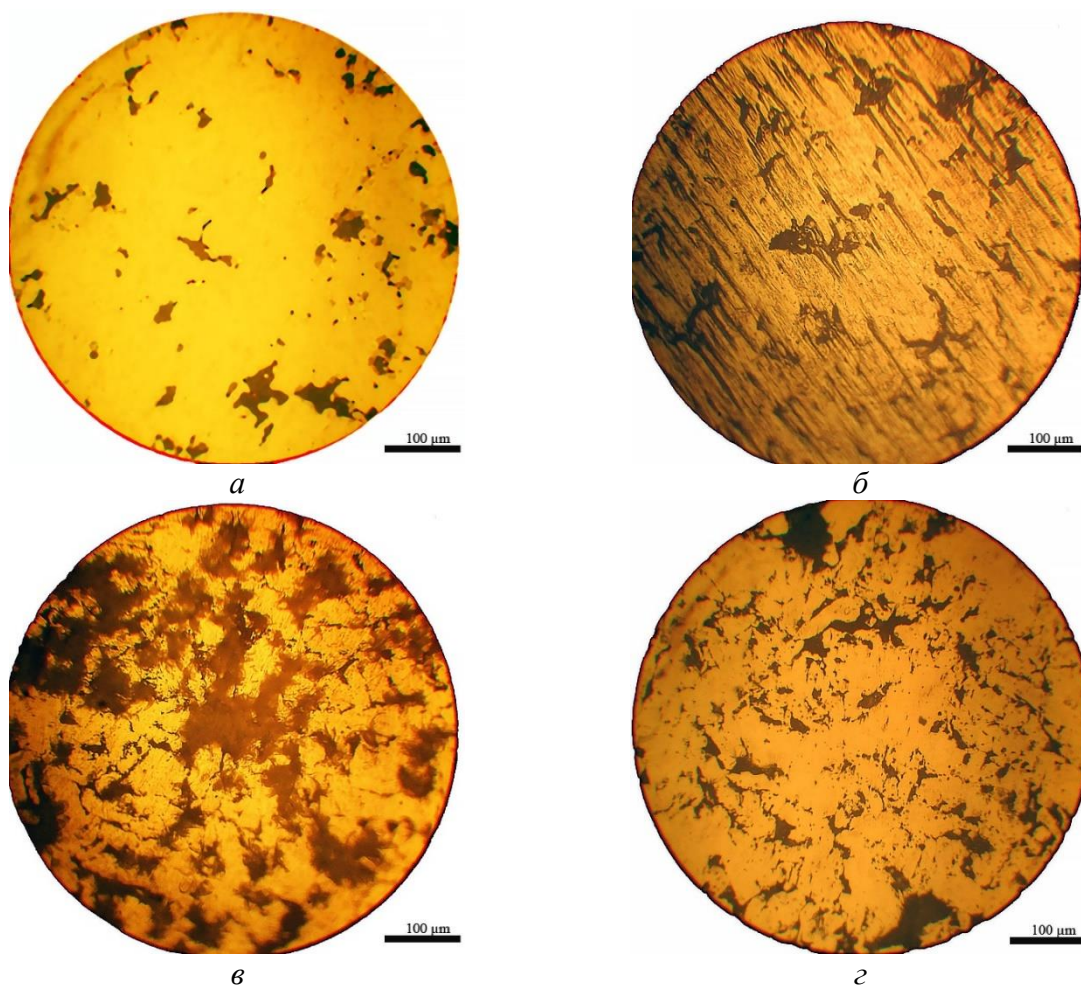


Рис. 4. Мікроструктура матеріалів, консолідованих методом ППС з шихти, отриманої шляхом ВЕР обробки суміші 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР в гасі (а, в) та етиловому спирті (б, г) з питомою енергією 10 МДж/кг (а, б) та 20 МДж/кг (в, г)

Твердість консолідованих зразків матеріалів, отриманих з порошків 85% Ti + 15% Al, оброблених у режимі ОБР у гасі та етанолі з питомою енергією 10 МДж/кг, становить ~4 ГПа (див. рис. 5). Збільшення питомої енергії обробки вихідної порошкової суміші призводить до зниження твердості ММК за рахунок збільшення кількості вільного вуглецю у структурі матеріалу.

Всі досліджені зразки мали відносно високі показники зносостійкості. Так, втрата маси матеріалу, отриманого при консолідації порошкової суміші 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР у гасі з питомою енергією 10 МДж/кг, становить ~0,04 г на 5 км шляху (див. рис. 6). Таким

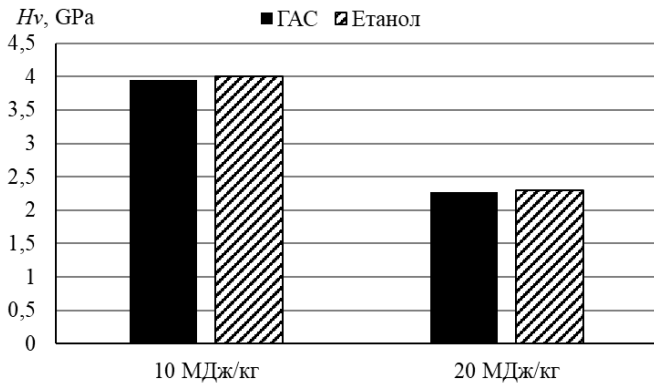


Рис. 5. Твердість консолідованих зразків матеріалів, отриманих з порошків 85% Ti + 15% Al у режимі ОБР у гасі та етанолі

чином, абсолютна інтенсивність зносу цього матеріалу становила 0,008 г/км, а відносна – 0,68%/км. А використання для отримання консолідованих матеріалів порошкової суміші початкового складу 85% Ti + 15% Al, обробленої ВЕР в режимі ОБР в гасі з питомою енергією 20 МДж/кг, призводить до зменшення зносостійкості та зростання абсолютної інтенсивності зношування до 0,060 г/км (див. рис. 7).

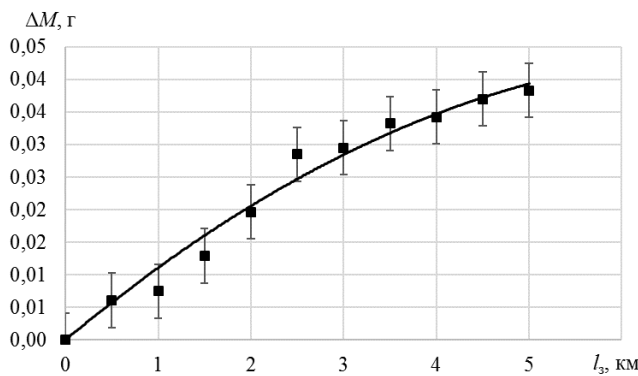


Рис. 6. Крива зношування зразка, отриманого з шихти початкового складу 85% Ti + 15% Al після ВЕР обробки в режимі ОБР у гасі з $W_{nut} = 10$ МДж/кг

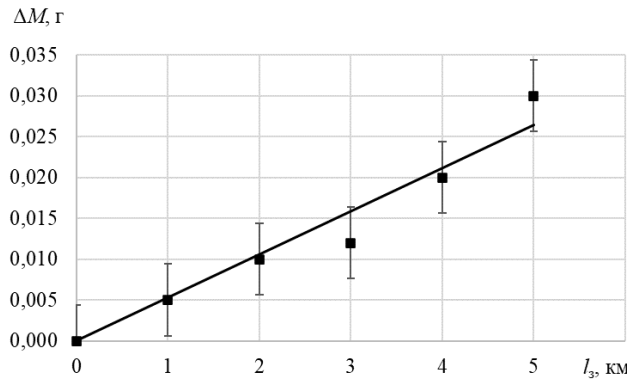


Рис. 7. Крива зношування зразка, отриманого з шихти початкового складу 85% Ti + 15% Al після ВЕР обробки в режимі ОБР в гасі з $W_{nut} = 20$ МДж/кг

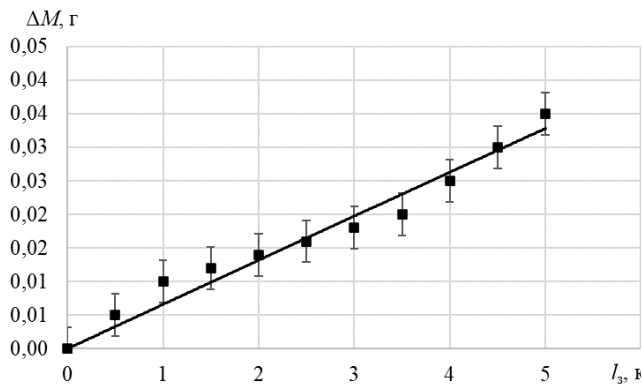


Рис. 8. Крива зношування зразка, отриманого із шихти початкового складу 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки у режимі ОБР у етанолі із $W_{nut} = 10$ МДж/кг

Зміна робочого середовища з гасу на етанол при ВЕР обробці шихти початкового складу 85% Ti + 15% Al в режимі ОБР призводить до незначного зростання зносостійкості

консолідованого матеріалу (рис. 8) та дозволяє отримати ММК, абсолютна інтенсивність зношування якого становить 0,007 г/км, а відносна – 0,56%/км.

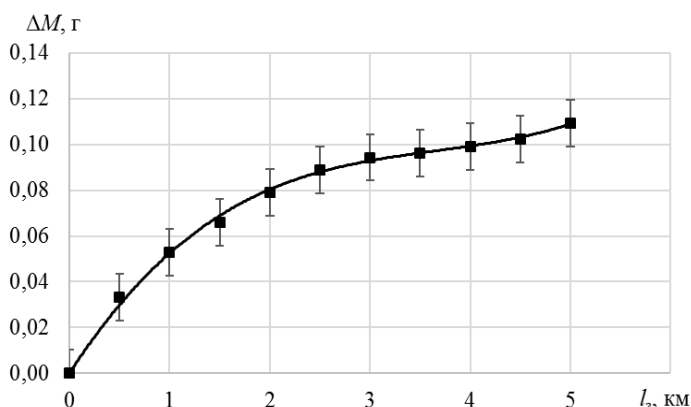


Рис. 9 Крива зношування зразка, отриманого із шихти початкового складу 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки у режимі ОБР у етанолі із $W_{\text{пит}} = 20 \text{ МДж/кг}$

За 5 км пройденого при дослідженні абразивного тертя шляху зразок матеріалу, отриманого при консолідації порошкової суміші 85 % Ti + 15 % Al у режимі ОБР у етанолі з питомою енергією 20 МДж/кг, втратив ~0,11 г або ~7 % своєї маси (рис. 9). Таким чином, абсолютна інтенсивність його зношування становила 0,022 г/км, а відносна – 1,4 %/км.

Використання шихти, отриманої в режимі ОБР у гасі та етанолі з $W_{\text{пит}} = 10 \text{ МДж/кг}$, показало, що у зразках з шихти, отриманої обробкою в гасі, зміна маси становить 0,02%, для

одержаної в етанолі – 0,025% маси (рис. 10). Це свідчить про високу жаростійкість отриманих матеріалів.

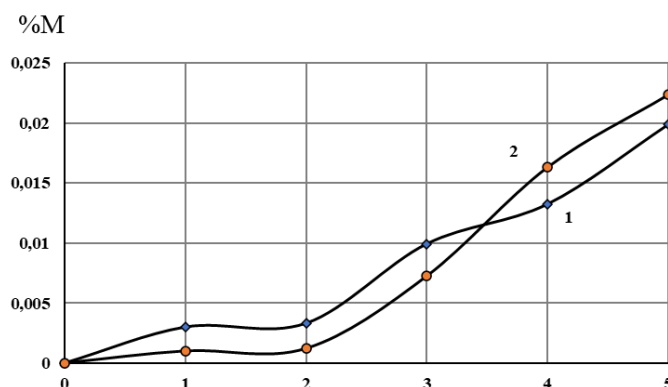


Рис. 10 Крива зміни маси зразків, отриманих з шихти початкового складу 85% Ti + 15% Al після ВЕР обробки в режимі ОБР у гасі та етанолі з $W_{\text{пит}} = 10 \text{ МДж/кг}$, при дослідженні на жаростійкість: 1 – шихта ОБР у гасі; 2 – шихта ОБР в етанолі

За комплексом характеристик (інтенсивність зношування 0,007 г/км, твердість HV5 = 4 ГПа, втрата маси при дослідженні на жаростійкість ~2 % за 5 циклів випробування) найкращим серед досліджених зразків був ММК, отриманий шляхом ІПС суміші порошків вихідного складу 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки в етанолі у режимі ОБР із $W_{\text{пит}} = 10 \text{ МДж/кг}$. Це пов'язано з тим, що заміна робочого середовища ВЕР з гасу на етанол під час реалізації режиму ОБР призводить до зниження кількості синтезованого під час обробки вуглецю.

Висновки

1. Встановлено, що ВЕР обробка порошкової системи Ti–Al впливає на особливості структуроутворення поліфункціональних високотносостійких дисперснозміцнених композитів при їх консолідації методом ІПС. Доведено, що заміна робочого середовища ВЕР

з газу на етанол під час реалізації режиму ОБР призводить до зниження кількості синтезованого під час обробки вуглецю, що позитивно впливає на структуру та властивості консолідованого матеріалу.

2. Експериментально показано, що дисперсність і фазовий склад порошкової шихти 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки впливає на структуру, фазовий склад, твердість, зносостійкість та жаростійкість консолідованого матеріалу. Так, консолідація шихти вихідного складу 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР обробки в етанолі при $W_{\text{пит}} = 10$ МДж/кг із використанням ОБР дозволяє отримати наноламінат–композит $\text{Ti}_3\text{AlC}_2 - \text{TiC}$ твердістю $\text{HV}5 = 4$ ГПа, який має голчасту структуру Ti_3AlC_2 розміром до 10 мкм, між кристалами якого знаходиться зміцнююча фаза TiC розміром до 1 мкм та Al_4C_3 . Абсолютна інтенсивність зношування цього матеріалу склала 0,007 г/км, а відносна – 0,56 %/км. Дослідження на жаростійкість свідчать, що втрата маси зразків такого матеріалу складає ~2 % за п'ять циклів випробування.

О. М. Syzonenko, A. S. Torpakov, M S. Prystash

Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

USAGE OF HIGHLY CONCENTRATED ENERGY FLOWS FOR THE CREATION OF POLYFUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS OF THE Al – Ti – C SYSTEM

The goal of the work is the creation of multifunctional composite materials using highly concentrated energy flows.

The methods of physical experiment, registration of transient electrical processes, X-ray phase analysis, optical microscopy, as well as experimental methods of determining the physical-mechanical and operational properties of materials (hardness, wear resistance, heat resistance) are used in the work. The work is based on a new approach to obtaining metal-matrix composites (MMC), in which dispersion-strengthening inclusions are not added mechanically to the powder mixture as an additional component, but instead are synthesized during treatment with a high-voltage electric discharge (HVED) and homogeneous mixing of the components is achieved. Further consolidation of the prepared powders by the spark plasma sintering (SPS) method allows preventing grain growth and obtaining a consolidated material in a relatively short time with lower energy consumption than using conventional methods.

HVED treatment of the powder system with the initial composition of 85% Ti + 15% Al in ethanol at $W_s = 10$ MJ/kg allows to disperse the initial powders from an average diameter of 33 μm to an average diameter of ~ 6 μm and to synthesize the dispersion-strengthening phases of TiC, Ti_2AlC , and Ti_3AlC_2 in them. Consolidation of the prepared powders by the SPS method allows obtaining a $\text{Ti}_3\text{AlC}_2 - \text{TiC}$ nanolaminate composite with a hardness of $\text{HV}5 = 4$ GPa. The absolute wear intensity of the material was 0.007 g/km.

The practical significance of the work is that the preparation of powders using HVED with subsequent consolidation by the SPS method allows obtaining MMC's with an increased level of hardness, wear resistance and heat resistance for obtaining tools for various purposes and construction materials for use in the aerospace industry and mechanical engineering.

The originality of the work stems from the fact that the new MMC is obtained by preparing the original powders with HVED, which contributes to the dispersion of the powders and the reactive synthesis of dispersing inclusions under the influence of microplasma discharges, and the subsequent SPS provides a controlled change in the phase composition and structure.

Key words: *high voltage electric discharge, spark plasma sintering, metal-matrix composite, hardness, wear resistance, heat resistance*

Література

1. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способы зміцнення металів: Навчальний посібник. Дніпро: НМетАУ, 2021. 89 с.
2. Неорганическое материаловедение : энциклопедич. изд. В 2 т. / В. М. Ажажа [и др.] ;

- под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – К. : Наук. думка, 2008. – ISBN 978-966-00-0631-7.
3. Wang Y., Wang D., Zhang T., Song G.-M., Chen L., Wei B.-X., Zhao Y., Zhou Y. Refractory carbide reinforced tungsten matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 925. P. 166342. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166342>.
 4. Sizonenko O. N., Baglyuk G. A., Raichenko A.I., Taftai É.I., Lypian E.V., Zaichenko A.D., Guseva E.V. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol. 51, N 3. P. 129–136.
 5. Syzonenko O., Prokhorenko S., Torpakov A., Zak D., Lypian Y., Wojnarowska-Nowak R., Polit J., Sheregii E. M. The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes AIP *Advances*. 2018. Vol. 8, N 8. P. 085317. DOI: 10.1063/1.5031195.
 6. Syzonenko O.M., Prokhorenko S.V., Lypian E.V., Zaichenko A.D., Prystash M.S., Torpakov A.S., Pashchyn M.O., Voinarovska-Novak R., Sherehii E. Pulsed Discharge Preparation of a Modifier of Ti–TiC System and its Influence on the Structure and Properties of the Metal. *Materials Science*. 2020. Vol. 56, N 2. – P. 232–239. DOI: 10.1007/s11003-020-00421-1.
 7. Zhou W. B., Mei B. C., JZhu. Q., Hong X. L. Rapid synthesis of Ti₂AlC by spark plasma sintering technique. *Materials Letters*. 2005. Vol. 5. P. 131–139.
 8. Kandrotaitė Janutienė, R., Syzonenko O., Mažeika D., Gegeckienė L., Venytė I., Torpakov A. Microstructure and Phase Composition of Ti–Al–C Materials Obtained by High Voltage Electrical Discharge/Spark Plasma Sintering. *Materials*. 2024. Vol. 17, N 1. P. 115. DOI: 10.3390/ma17010115.
 9. Kandrotaitė Janutienė R., Mažeika D., Dlouhý J., Syzonenko O., Torpakov A., Lipian E., Baltušnikas A. Investigation of the Microstructure of Sintered Ti–Al–C Composite Powder Materials under High-Voltage Electrical Discharge. *Materials*. 2023. Vol. 16, N 17. P. 5894. DOI: 10.3390/ma16175894.
 10. Kuskova N. I., Boguslavskii L. Z., Smal'ko A. A., Zubenko A. A. Obtaining nanocarbon using the electric-discharge treatment method of organic liquids. *Electrical Processes in Engineering and Chemistry*. 2007. Vol. 43. P. 269–275. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375507040072>
 11. Syzonenko O. M., Loboda P. I., Zaichenko A. D., Solodkyi Ye. V., Prystash M. S., Trehub V. O. The Influence of High-Voltage Electrical Discharge on Dispersion and Structure of B₄C Powder. *Journal of Superhard Materials*. 2017. – Vol. 39, N 4. P. 243–250.
 12. Сизоненко, О. Н. Анализ физико-технических процессов при высоковольтной электроразрядной обработке металлических порошков / О. Н. Сизоненко, В. А. Трегуб, Е. В. Липян // Вестник Украинского материаловедческого общества. – 2015. – Вып. 8. – С. 10 – 21.
 13. Трегуб В. А., Сизоненко О. Н., Зинченко Д. А., Солодкий Е. В. Влияние концентрации смеси порошков Ti–TiC–C, полученной высоковольтным электроразрядным синтезом, на свойства эпоксидного олигомера. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах: матеріали 6-ой міжнарод. науч.-практ. Конф., Київ, 1–2 грудня 2016 р. Київ, 2016. С. 54–58.*
 14. Ясь Д. С., Подмоков В. Б., НДяденко. С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование. К.: Техніка, 1971. 140 с.

Надійшла 28.08.24

References

1. Pohrebna, N. E., Kutsova, V. Z., & Kotova, T. V. (2021). *Sposoby zmitsnennia metaliv: Navchalnyi posibnyk* [Methods of metal strengthening: A textbook]. Dnipro: NMetAU.
2. Azhazha, V. M., & Gnesin, G. G., & Skorokhod, V. V. (Eds.). (2008). *Neorganicheskoe materialovedenie: Entsiklopedicheskoe izdanie v 2 t* [Inorganic materials science: Encyclopedia in 2 volumes]. Naukova dumka.
3. Wang, Y., Wang, D., Zhang, T., et al. (2022). Refractory carbide reinforced tungsten matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 925, 166342. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166342>.
4. Sizonenko, O. N., Baglyuk, G. A., Raichenko, et al. (2012). Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51(3), 129–136.
5. Syzonenko, O., Prokhorenko, S., Torpakov, et al. (2018). The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes. *AIP Advances*, 8(8), 085317. <https://doi.org/10.1063/1.5031195>
6. Syzonenko, O. M., Prokhorenko, S. V., Lypyan, E. V., et al. (2020). Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Science*, 56(2), 232–239. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>
7. Zhou, W. B., Mei, B. C., Zhu, J. Q., & Hong, X. L. (2005). Rapid synthesis of Ti₂AlC by spark plasma sintering technique. *Materials Letters*, 59, 131–139.
8. Kandrotaitė Janutienė, R., Syzonenko, O., Mažeika, D., et al. (2024). Microstructure and phase composition of Ti–Al–C materials obtained by high voltage electrical discharge/spark plasma sintering. *Materials*, 17(1), 115. <https://doi.org/10.3390/ma17010115>
9. Kandrotaitė Janutienė, R., Mažeika, D., Dlouhý, J., et al. (2023). Investigation of the microstructure of sintered Ti–Al–C composite powder materials under high-voltage electrical discharge. *Materials*, 16(17), 5894. <https://doi.org/10.3390/ma16175894>
10. Kuskova, N. I., Boguslavskii, L. Z., Smal'ko, A. A., & Zubenko, A. A. (2007). Obtaining nanocarbon using the electric-discharge treatment method of organic liquids. *Electrical Processes in Engineering and Chemistry*, 43, 269–275. <https://doi.org/10.3103/S1068375507040072>.
11. Syzonenko, O. M., Loboda, P. I., Zaichenko, A. D., Solodkyi, Ye. V., Prystash, M. S., & Trehub, V. O. (2017). The influence of high-voltage electrical discharge on dispersion and structure of B₄C powder. *Journal of Superhard Materials*, 39(4), 243–250.
12. Sizonenko, O. N., Trehub, V. A., & Lypyan, E. V. (2015). Analiz fiziko-tekhnicheskikh protsessov pri vysokovoltnoy elektrorazryadnoy obrabotke metallicheskih poroshkov [Analysis of physical and technical processes during high-voltage electrical discharge processing of metallic powders]. *Vestnik Ukrainskoho materialovedcheskoho obshchestva – Bulletin of the Ukrainian Materials Science Society*, 8, 10–21.
13. Trehub, V. A., Sizonenko, O. N., Zinchenko, D. A., & Solodkyi, E. V. (2016). Vliianie kontsentratsii smesi poroshkov Ti–TiC–C, poluchennoi vysokovoltnym elektrorazriadnym sintezom, na svoistva epoksidnogo olihomera [Effect of Ti–TiC–C powder mixture concentration obtained by high-voltage electrical discharge synthesis on the properties of epoxy oligomer]. *Materialy dlia roboty v ekstremalnykh umovakh [Materials for Work in Extreme Conditions]*. (pp. 54–58). Kyiv. [in Russian].
14. Yas, D. S., Podmokov, V. B., & Dyadenko, N. S. (1971). *Ispytaniia na trenie i iznos. Metody i oborudovanie [Friction and wear tests. Methods and equipment]*. Kyiv: Tekhnika.