

## РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНА ОБРОБКА МОДИФІКАТОРА СИСТЕМИ Al–Ti–C

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, О.М. Сизоненко<sup>2</sup>, В.В. Головка<sup>1</sup>, П. Ташев<sup>3</sup>, Є.В. Липян<sup>2</sup>, М.С. Присташ<sup>2</sup>,  
А.С. Торпаков<sup>2</sup>, М.О. Пашин<sup>1</sup>, О.Л. Міходуй<sup>1</sup>, В.О. Щерецький<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. 54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43а.  
E-mail: dioo@iipr.com.ua

<sup>3</sup>Інститут металознавства, обладнання і технологій ім. академіка Балевські та Центр гідро- та аеродинаміки Болгарської академії наук. 1574, Болгарія, м. Софія, вул. Шипченський прохід, 67. E-mail: ptashev@ims.bas.bg

Представлено результати дослідження впливу модифікатора системи Al–Ti–C, отриманого шляхом високовольтної електророзрядної обробки у вуглеводневій рідині, на структуру та властивості литого сплаву АК7<sub>пч</sub> (А357). Показані перспективи застосування модифікатора, отриманого методом високовольтної електророзрядної обробки металевих порошків, для поліпшення структури литих сплавів та металу зварного шва. Бібліогр. 25, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова:* зварне з'єднання, метал зварного шва, високовольтний електричний розряд, модифікатор структури литих сплавів, металургія, диспергування, карбідизація

Введення в розплав модифікаторів є одним з традиційних прийомів отримання дрібнозернистих металевих структур, оскільки чим більше зародків в одиниці об'єму розплаву, тим більше кристалів утворюється і тим вони дрібніші, а отже кращі механічні властивості металу у ливарному виробництві та при зварюванні. Сучасними завданнями матеріалознавства та інженерної практики є дослідження ефективності наномодифікування у технологіях зварювання і наплавлення шляхом введення наночастинок тугоплавких хімічних сполук у зварювальну ванну [1]. При наплавленні жаростійкими сплавами на основі заліза, нікелю та хрому і вуглецевими сталями, які модифіковані наночастинами, підвищується стійкість наплавленого інструмента. Також наночастинами усуваються зони транскристалізації в наплавленому металі або зварному шві, різко зменшуються розміри дендритів, поліпшується морфологія і топографія зміцнюючих фаз. Це підвищує жаростійкість, структурну стабільність і довговічність зварних з'єднань [2, 3]. Ефективність модифікування литого металу наноструктурованими порошками підтверджено, наприклад, в умовах виробництва газових турбін при модифікації жаростійкого сплаву CM88Y [4]. Враховуючи особливості ливарного виробництва і зварювання плавленням в частині модифікування рідкого металу, концептуальні підходи до створення модифікаторів для даних технологій є досить близькими. Таким чином, позитивні результати застосування модифікаторів рідкого

металу в процесі лиття є базовими для створення технологій модифікування рідкого металу зварювальної ванни в умовах зварювання плавленням. Виходячи з наведеного вище, сучасний метод виготовлення модифікаторів для ливарного виробництва в перспективі може бути застосований також і у зварювальному виробництві.

Більшість модифікаторів виготовляють методами порошкової металургії, при цьому найбільш перспективними для використання є ультрадисперсні наноструктуровані порошкові суміші. Зараз основні напрямки розвитку методів отримання таких сумішей полягають у наступному [5–8]:

удосконалення наявної техніки та технологічних процесів, що базуються на широко поширених механічних способах подрібнення матеріалів; пошук принципово нових способів подрібнення, дослідження й розробка на їх основі ефективних видів техніки та технологій.

Перший напрямок має на меті підвищення коефіцієнта корисної дії руйнування і питомої продуктивності та зводиться до вдосконалення існуючих і створення нових машин (дробарок і млинів) підвищеної продуктивності [7, 8] і супроводжується підвищенням енерговитрат, металоемністю конструкцій, використанням дорогих високоякісних сталей і сплавів поряд з непропорційно малим зростанням техніко-економічних показників.

Другий напрямок має на меті пошук принципово нових способів подрібнення, зокрема, елек-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Сизоненко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8449-2481>,

Ташев П. – <https://orcid.org/0000-0002-7906-487X>, Липян Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9483-1793>,

Присташ М.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7617-6200>, Торпаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9805-3914>,

Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>,

Щерецький В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>

© Л.М. Лобанов, О.М. Сизоненко, В.В. Головка, П. Ташев, Є.В. Липян, М.С. Присташ, А.С. Торпаков, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, В.О. Щерецький

трофізичних [9–11]. Так, одним з ефективних електрофізичних методів є розрядно-імпульсна підготовка порошків шляхом використання високоевольтного електричного розряду (ВЕР) у дисперсній системі «рідина – порошок». Це циклічний процес, який характеризується виділенням енергії в каналі розряду впродовж мікросекунд та супроводжується дією хвиль стиснення (яка при певних умовах трансформується в ударну), потужних гідропотоків, кавітації, електромагнітних і термічних полів [9–11].

При циклічній дії ВЕР створюється можливість тонкого подрібнення хвилями тиску за рахунок створення великої кількості дефектів у порошок, що сприяє зниженню енергії руйнування кристалів та утворенню великої кількості активних центрів і полегшує хімічну взаємодію між елементами системи в умовах динамічного навантаження.

Використання вуглеводневої рідини в якості робочого середовища при ВЕР-обробці сумішей порошків дозволяє не тільки виключити їх окислення, але й створити термодинамічні умови для піролізу газу з утворенням твердофазного вуглецю, який здатен вступати в реакції карбідизації з частинками порошків, утворюючи наноструктурні зміцнюючі фази [12].

В роботі [13] на прикладі застосування модифікатора при литті показано, що введення 0,01 мас. % модифікатора  $Ti-TiC$ , синтезованого високоевольтною електророзрядною обробкою порошку  $Ti$  у газі та брикетованого за допомогою іскрового плазмового спікання, дозволило зменшити розмір зерна з 1...2 до 0,2...0,6 мм в усіх модифікованих зразках жароміцного сплаву СМ88У. При цьому межа міцності на розрив при температурі 900 °С складала 65...69 МПа, а довготривала міцність зросла у середньому на 20 %. Це свідчить про перспективність використання металевих порошків після обробки ВЕР для модифікації структури литих сплавів.

Але можливість використання металевих порошків після ВЕР-обробки для модифікації литої структури металу зварних швів ще не досліджено в достатній мірі. Для встановлення перспектив використання металевих порошків після ВЕР-обробки для модифікування структури зварних швів доцільно проаналізувати вплив модифікатора системи  $Ti-Al-C$  після ВЕР-синтезу для подрібнення структури та підвищення властивостей литого сплаву АК7<sub>пч</sub> (А357).

Мета роботи – для встановлення перспектив застосування при зварюванні плавленням металевих порошків після ВЕР-обробки для модифікування структури зварних швів доцільно дослідити вплив модифікатора системи  $Ti-Al-C$  після ВЕР для подрібнення структури та підвищення властивостей литого сплаву АК7<sub>пч</sub> (А357).

**Методика досліджень.** Модифікування алюмінієвих сплавів розглядалося на прикладі силумінів та передбачало отримання дрібнозернистого евтектичного кремнію в литій структурі. Така структура

евтектичного кремнію підвищує механічні властивості виливки, в тому числі, відносно подовження, а також, у багатьох випадках, ливарні властивості алюмінієвого розплаву. Як правило, модифікування силуміну проводять шляхом додавання малих кількостей натрію або стронцію [14–17].

У силумінах з вмістом кремнію більше 7 % евтектичний кремній займає більшу частину площі металографічного зразка. При вмісті кремнію від 7 до 13 % тип евтектичної структури (наприклад, зернистий або модифікований) значно впливає на механічні властивості матеріалу, зокрема, на пластичність, яка визначається як відносне подовження  $\delta$ . Тому, коли при випробуваннях зразка необхідно підвищити значення  $\delta$ , алюмінієві сплави з вмістом кремнію від 7 до 13 % піддають модифікації шляхом додавання приблизно 0,0040...0,0100 % натрію [18, 19].

У силумінах з вмістом кремнію близько 11 %, особливо для лиття при низькому тиску, в якості довготривалого модифікатора застосовують стронцій. Відмінність стронцію від натрію як модифікатора в тому, що він значно менше вигорає з розплаву, що особливо актуально при зварюванні плавленням. Стронцій додають в кількості 0,014...0,040 %.

Оскільки натрій вигорає з розплаву відносно швидко, подальше модифікування силумінів натрієм повинно проводитися через певні інтервали, що ускладнює його застосування при зварюванні, де процес введення модифікатора має бути безперервним. До того ж висока вартість і складність технології застосування натрію і стронцію створює необхідність пошуку дешевших і не менш ефективних модифікаторів зварного шва на базі досліджених у роботах [20–22].

Для дослідження впливу модифікатора на кристалізацію ливарного алюмінієвого сплаву АК7<sub>пч</sub> (А357) було використано модифікатор, отриманий шляхом ВЕР-обробки суміші порошків 15 % Al + 85 % Ti із середнім діаметром  $d_{cp} = 40$  мкм у газі освітлювальному. Дослідження виконувались на експериментальному стенді, докладно описаному в роботах [9, 10, 23].

Для оцінки ступеня впливу ВЕР в газі на морфологію та розміри частинок порошків, а також для вивчення структури зразків литого сплаву використовували наступне обладнання: мікроскоп оптичний БІОЛАМ-І з максимальним збільшенням  $\times 1350$ , растровий електронний мікроскоп JEOL JEM-2100F з діапазоном збільшень від 50 до 150000, цифрову фотокамеру Canon.

Рентгеноструктурний та рентгенофазовий аналіз виконували на дифрактометрі загального призначення Bruker D8 Discover (випромінювання  $CuK\alpha$ ), раманівську спектроскопію – за допомогою Renishaw InVia Micro Raman.

Для дослідження впливу обраного модифікатора на механічні характеристики сплаву АК7пч у шахт-

ній печі з використанням металевих тиглів було виплавлено три зразки: контрольний (масою 650 г) та два модифіковані зразки: модифікований 0,7 мас. % AlTiB (масою 170 г), який традиційно використовують для модифікування структури силумінів [3, 14, 16–18] та з вмістом 0,2 мас. % модифікатора, отриманого шляхом ВЕР-обробки суміші порошків складу 15 % Al + 85 % Ti (масою 630 г).

У контрольному зразку при температурі  $T_{пл} = 760$  °С було видалено шлак, а розплав перемішано міксером протягом 10 с. Після ізотермічної витримки протягом 10 хв розплав заливали у металевий кокіль, розігрітий до температури  $T_{к} = 280$  °С. Час охолодження до поверхневого затвердіння складав 30 с.

Модифікований зразок виготовляли за цією ж схемою, а модифікатор вводили перед перемішуванням у вигляді «дзвіночка» (порошок, загорнутий у алюмінієву фольгу).

Після охолодження зразки розрізали навпіл, шліфували та виявляли мікроструктуру за допомогою розчину 5 % HF у дистильованій воді. Для виявлення макроструктури окремих зразків використовували 15 %-ий розчин NaOH в дистильованій воді.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Всі діючі фактори при ВЕР можна розділити на дві групи – механічні, до яких відносяться хвиля стиснення, гідропотоки при пульсації парогазової порожнини і кавітація, та термічні, до яких відноситься низькотемпературна плазма в каналі розряду і мікроплазмових утвореннях між частинками, а також розрядний струм, що протікає через частки оброблюваного металу та призводить до електроерозійного руйнування частинок порошку [24]. При ВЕР створюються умови (тиск в каналі розряду досягає 1 ГПа а температура в каналі розряду може досягати 50 000 К) для піролізу гасу з утворенням твердофазного нановуглецю. Синтезовані наночастинки вуглецю різних алотропних модифікацій, зокрема  $C_{60}$  та  $C_{70}$ , здатні вступати в хімічну взаємодію з частинками титану, утворюючи наноструктурні зміцнюючі карбідні фази [9–13, 23, 24]. Тому ВЕР-обробка порошків системи Al–Ti в гасі, окрім подрібнення, дозволяє синтезувати

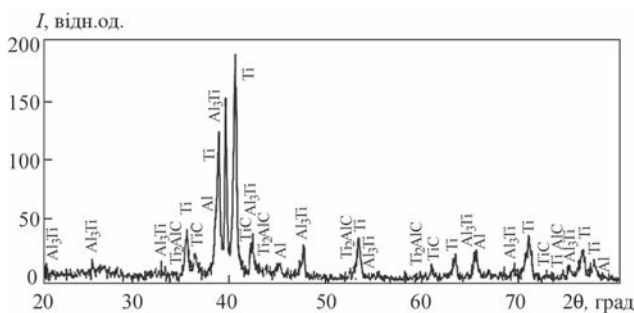


Рис. 1. Дифрактограми порошкової суміші початкового складу 85 % Ti + 15 % Al після ВЕР-обробки в гасі з використанням електродної системи типу «ЗВ–П» з питомою енергією 20 МДж/кг

карбід титану та фази  $Ti_3AlC$  і  $Ti_2AlC$  без додавання додаткового графіту.

Після ВЕР-обробки у режимі з енергією одиничного розряду  $W_1 = 1$  кДж та питомою енергією  $W_{шт} = 20$  МДж/кг з використанням електродної системи типу «тривістрійний анод – площа» шихта містить Al, Ti, TiC,  $Ti_3AlC$  +  $Ti_2AlC$  (рис. 1).

Порошкова суміш початкового складу 85 % Ti + 15 % Al після обробки має середній розмір частинок близько 10 мкм, з піковим значенням кількості частинок діаметром 5 мкм близько 37 % (рис. 2). Розподіл частинок за розміром має бімодальний вигляд, приблизно 30 % частинок суміші зберігають розміри, близькі до вихідних.

На рис. 3 наведено макроструктури контрольного зразка сплаву АК7<sub>пч</sub> та зразків сплаву, модифікованого 0,7 мас. % AlTiB та 0,2 мас. % ВЕР обробленої суміші Ti–Al.

Контрольний зразок має глибину усадочної раковини 4 мм. Зона стовпчастих зерен – близько 10 мм, їх ширина 2...6 мм. У центрі виливки переважають зерна розміром 2...8 мм (рис. 4, а). Зразок, модифікований 0,2 мас. % AlTiB має глибину усадочної раковини 3 мм. Зона стовпчастих зерен – близько 1,5 мм, їх ширина – до 1 мм. Макроструктура досить однорідна, розмір зерен від 1 мм до 2,5 мм (див. рис. 4, б). Виплавка, модифікована 0,2 мас. % ВЕР обробленою сумішшю, має усадкову раковину, яка досягає 3 мм, підусадочна рихлість практично відсутня, зона стовпчастих кристалів до 5 мм, ширина зерен від 1,5 до 2,0 мм, структура рівномірна, зерна мають розмір 1, 5...3,5 мм

На рис. 4 наведено мікроструктури контрольного (а, б, в, г), модифікованого 0,7 мас. % AlTiB (д, е, ж, з) та модифікованого 0,2 мас. % ВЕР обробленою сумішшю (и, і, к, л) сплаву АК7<sub>пч</sub>.

Металографічний аналіз контрольного зразка дозволив виявити дендрити  $\alpha$ -твердого розчину, розмір яких перевищує 1500 мкм і значну кількість евтектичного кремнію, який має округлу форму.

Модифікація розплаву 0,2 мас. % AlTiB призводить до незначного диспергування дендритів  $\alpha$ -твердого розчину, але одночасно з цим спостерігається зростання окремих  $\alpha$  зерен. Даний мо-

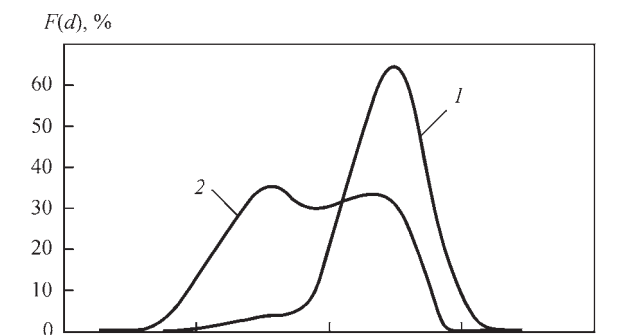


Рис. 2. Розподіл частинок використаного модифікатора системи Ti–Al за розміром: 1 – до ВЕР-обробки; 2 – після ВЕР-обробки



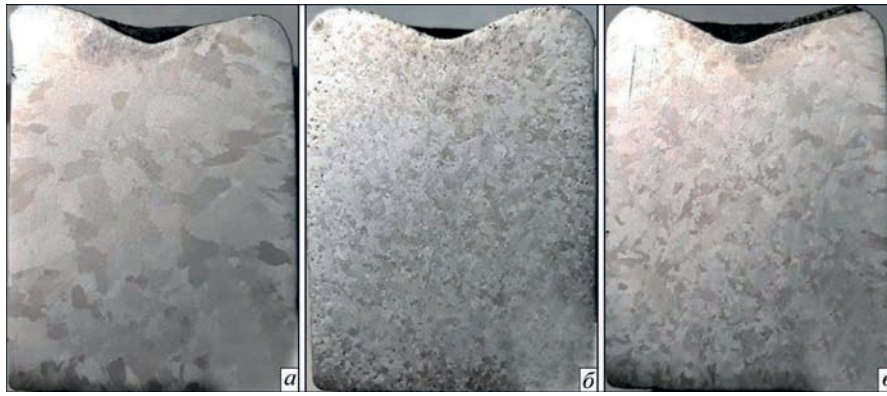


Рис. 3. Макроструктура сплаву АК7<sub>пч</sub> (А357): а – контрольний зразок; б – зразок, модифікований 0,7 мас. % AlTiB; в – зразок, модифікований 0,2 мас. % суміші Ti–Al–С, отриманої ВЕР-обробкою

дифікатор мав негативний ефект на евтектичний кремній, який отримав голчасту форму із розміром окремих голок до 80 мкм, що негативно впливає на втомну міцність модифікованого металу.

Модифікація зразка сплаву 0,2 мас. % ВЕР обробленою сумішшю порошоків 15 % Al + 85 % Ti призвела до значного зменшення розмірів дендритів  $\alpha$ -твердого розчину від 1500 до 300 мкм, зерна отримали округлу форму, також спостерігається значне модифікування евтектичного кремнію

(рис. 5, *u, i, k, l*). Отримана форма зерен позитивно впливає на втомну міцність металу, модифікованого із застосуванням суміші, обробленої ВЕР. Такі результати пов'язані із наявністю у складі порошкової суміші наночастинок вуглецю та наноструктурованих частинок тугоплавких сполук TiC, Ti<sub>3</sub>AlC + Ti<sub>2</sub>AlC, які виступають в якості додаткових центрів кристалізації.

Твердість контрольного зразка складала *НВ* 48, а для модифікованих AlTiB та ВЕР обробленою су-

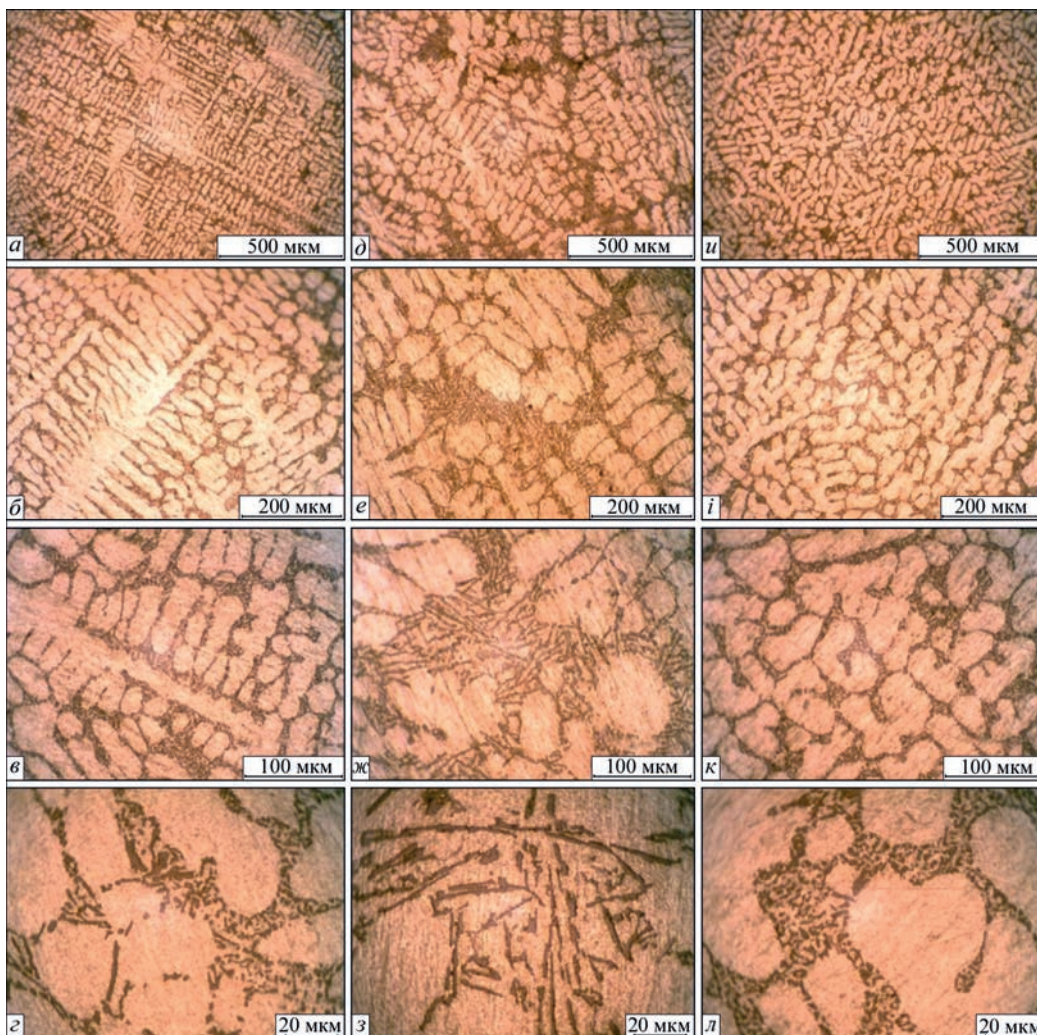


Рис. 4. Мікроструктури сплаву АК7<sub>пч</sub>: а, б, в, з – контрольний зразок; д, е, ж, з – зразок, модифікований 0,7 мас. % AlTiB; *u, i, k, л* – зразок, модифікований 0,2 мас. % суміші Ti–Al–С, отриманої ВЕР-обробкою

Властивості зразків сплаву АК7<sub>пц</sub>

Зразок	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	НВ
Контрольний зразок	148	62	48
	143	65	
Зразок, модифікований 0,7 мас. % AlTiB	133	62	36
	131	61	
Зразок, модифікований 0,2 мас. % сумішшю системи Al–Ti–C після ВЕР-обробки	145	66	48
	140	65	

мішшю вона становила НВ 36 та НВ 48 відповідно (таблиця).

Дослідження зміни межі міцності  $\sigma_b$  та межі плинності  $\sigma_{0,2}$  модифікованих зразків (див. таблицю) свідчать, що на відміну від модифікування 0,7 мас. % AlTiB, додавання 0,2 мас. % суміші системи Al–Ti–C після ВЕР-обробки не призводить до зниження цих характеристик порівняно із контрольним зразком.

Отримані результати у сукупності з результатами, наведеними у роботі [13], свідчать, що використання оброблених ВЕР у вуглеводневій рідині порошків системи Al–Ti–C у якості модифікатора призводить до значного зменшення структурних елементів кристалізованого сплаву. В свою чергу подрібнення структури зварних швів дозволяє підвищити жароміцність, структурну стабільність і втомну міцність та довговічність зварних з'єднань. Це дозволяє прогнозувати можливість використання оброблених ВЕР у вуглеводневій рідині частинок металевих порошків для модифікування структури зварних швів з метою підвищення експлуатаційних характеристик деталей та конструкцій, виготовлених різними методами зварювання плавленням.

## Висновки

1. Показана можливість використання оброблених ВЕР у вуглеводневій рідині частинок металевих порошків для модифікування структури зварних швів.

2. Показано, що введення отриманого шляхом ВЕР-обробки у гасі суміші порошків вихідного складу 15 % Al + 85 % Ti у якості модифікатора методом «дзвіночка» дозволяє впливати на структуру та властивості ливарного алюмінієвого сплаву АК7<sub>пц</sub> (А357).

3. Додавання у сплав АК7<sub>пц</sub> (А357) 0,2 мас. % обробленої ВЕР суміші порошків 15 % Al + 85 % Ti призвело до значної зміни розмірів дендритів  $\alpha$ -твердого розчину від 1500 до 300 мкм. Твердість модифікованих зразків становить НВ 48, а межа плинності знаходиться на рівні 66 МПа.

## Список літератури

1. Ташев П., Алексєв Н., Манолов В., Черепанов А.Н. (2017) Наномодифікування в процесах сварки та наплавки. *Космічні апарати та технології*, **1**, 19, 16–21.
2. Еремін Е.Н., Шалай В.В., Филиппов Ю.О., Сумленінов В.К. (2012) Применение модифицирования при электрошлаковой сварке жаропрочных сплавов. *Высокі технології в машинобудуванні*. Харків, НТУ «ХПІ», **22**, **1**, 115–120.

3. Еремін Е.Н., Филиппов Ю.О., Румянцев Г.П. (2011) Структурные изменения в жаропрочном никелевом сплаве при его модифицировании наночастицами тугоплавких соединений. *Там же*, **21**, **1**, 98–104.
4. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. (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. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>.
5. Сизоненко О.М., Присташ М.С., А.Д. Зайченко та ін. (2020) Використання висококонцентрованих потоків енергії в порошковій металургії для отримання карбідосталей. Київ, Наукова думка. ISBN 978-966-00-1756-6.
6. Сизоненко О.Н., Ивлиев А.И., Баглюк Г.А. (2014) *Перспективные процессы изготовления порошковых материалов*. Николаев, НУК. ISBN 978-966-321-292-0.
7. Сав'як М.П., Мельник О.Б., Уварова І.В. (2016) Кристаллографічні особливості формування нанодисперсного карбиду титану при помелі титану і вуглецю в планетарному млині. *Порошковая металлургия*, **5/6**, 3–12.
8. Hong, S.-M., Park, J.-J., Park, E.-K. et al. (2015) Fabrication of titanium carbide nano-powders by a very high speed planetary ball milling with a help of process control agents. *Powder Technology*, **274**, 393–401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.047>.
9. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (review). *International virtual journal for science, technics and innovations for the industry*, **12**, 41–44.
10. Sizonenko, O.N., Baglyuk, G.A., Raichenko, A.I. (2012) Variation in the particle size of Fe–Ti–B4C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **51**, **3-4**, 129–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9407-4>.
11. Sizonenko, O.N., Baglyuk, G.A., Raichenko, A.I. (2011) Effect of high-voltage discharge on the particle size of hard alloy powders. *Ibid.*, **49**, **11/12**, 630–636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-011-9280-6>.
12. Липян Е.В., Сизоненко О.Н., Торпаков А.С., Жданов А.А. (2015) Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe–Ti–углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Зб. наук. праць*. Харків, НТУ «ХПІ», **51** (1160), 59–65. ISSN 2079-0740.
13. 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. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>.
14. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. (1977) *Сплавы алюминия с кремнием*. Москва, Металлургия.
15. Crubes, U.G. (1983) Veredelung von Aluminium gublegierung mit Al–Sr 3,5- Vorlegierung in Drahtform. *Giesserei*, **70**, **8**, 257–258.
16. Абрамов А.А. (2012) О модифицировании силуминов. *Литейное производство*, **7**, 19.
17. Королев С.П., Немененко Б.М., Михайловский В.М. и др. (2005) Проблемы и практика модифицирования заэвтектических силуминов для поршневого сплава. *Литейщик России*, **10**, 19–22.
18. Стеценко В.Ю. (2008) О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов. *Литье и металлургия*, **1**, 149–150.
19. Xu, C.L., Jiang, Q.C., Yang, Y.F. et al. (2006) Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *J. of Alloys and Compounds*, **422**, **1-2**, 1–4.
20. Xu, C.L., Wang, H.Y., Yang, Y.F. (2006) Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the Al–P–Ti–TiCl<sub>4</sub>O<sub>3</sub> modifier on primary silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *Ibid.*, **421**(1), 128–132.
21. Стеценко В.Ю. (2008) О механизме модифицирования силуминов. *Металлургия машиностроения*, **1**, 20–23.
22. Попова М.В., Ружилов А.А. (2000) Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов. *Литейное производство*, **10**, 4–6.



23. Sizonenko, O., Prokhorenko, S., Torpakov, A. et al. (2018) The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes. *AIP Advances*. 085317. ISSN 2158-3226. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5031195>.
  24. Sizonenko, O.N., Grigoryev, E.G., Zaichenko, A.D. (2017) Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *High Temperature Materials and Processes*, 36, 9, 891–896. ISSN 0334-6455. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2016-0049>.
  25. Bethune, D.S., Meijer, G., Tang, W.C., Rosen, H.J. (1990) The vibrational Raman spectra of purified solid films of C60 and C70. *Chem. Phys. Lett.*, 174, 219–222. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(90\)85335-A](https://doi.org/10.1016/0009-2614(90)85335-A).
- References**
1. Tashev, P., Aleksiev, N., Manolov, V., Cherepanov, A.N. (2017) Nanomodification in welding and surfacing processes. *Kosmicheskie Apparaty i Tekhnologii*, 1(19), 16–21 [in Russian].
  2. Eremin, E.N., Shalal, V.V., Filippov, Yu.O., Sumleninov, V.K. (2012) Use of modification in electroslag welding of heat-resistant alloys. *Vysoki Tekhnologii v Mashynobuduvanni*, 22(1), 115–120 [in Russian].
  3. Eremin, E.N., Filippov, Yu.O., Rummyantsev, G.P. (2011) Structural changes in high-temperature nickel alloys at its modification by refractory joint nanoparticles. *Ibid.*, 21(1), 98–104 [in Russian].
  4. Syzonenko, O.M., Prokhorenko, S.V., Lypyan, E.V. (2020) Pulsed discharge preparation of a modifier of Ti–TiC system and its influence on the structure and properties of the metal. *Materials Sci.*, 56(2), 232–239. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>.
  5. Syzonenko, O.M., Prystash, M.S., Zaichenko, A.D. et al. (2020) *Application of high-concentrated energy flows in powder metallurgy for producing carbide-steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian]. ISBN 978-966-00-1756-6.
  6. Sizonenko, O.N., Ivliev, A.I., Baglyuk, G.A. (2014) *Advanced processes of manufacture of powder materials*. Nikolaev, NUK [in Russian]. ISBN 978-966-321-292-0.
  7. Savyak, M.P., Melnik, O.B., Uvarova, I.V. (2016) Crystallographic features of formation of nanodisperse titanium carbide during grinding of titanium and carbide in planetary milling. *Poroshk. Metallurgiya*, 5/6, 3–12 [in Ukrainian].
  8. Hong, S.-M., Park, J.-J., Park, E.-K. et al. (2015) Fabrication of titanium carbide nano-powders by a very high speed planetary ball milling with a help of process control agents. *Powder Technology*, 274, 393–401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.047>.
  9. Sizonenko, O., Vovchenko, A. (2014) Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of new materials (Review). *Int. Virtual J. for Science, Technics and Innovations for the Industry*, 12, 41–44.
  10. Sizonenko, O.N., Baglyuk, G.A., Raichenko, A.I. (2012) Variation in the particle size of Fe–Ti–B4C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51(3-4), 129–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9407-4>.
  11. Sizonenko, O.N., Baglyuk, G.A., Raichenko, A.I. (2011) Effect of high-voltage discharge on the particle size of hard alloy powders. *Ibid.*, 49(11/12), 630–636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-011-9280-6>.
  12. Lipyanyan, E.V., Sizonenko, O.N., Torpakov, A.S., Zhdanov, A.A. (2015) Thermodynamic analysis of heterogeneous chemical reactions in system “powder mixture Fe–Ti-hydrocarbon liquid” under action of high-voltage electric discharges. *Visnyk NTU KhPI. Series: Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokyykh Naprug*, 51 (1160) 59–65 [in Russian]. ISSN 2079-0740.
  13. 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. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00421-1>.
  14. Stroganov, G.B., Rotenberg, V.A., Gershman, G.B. (1977) *Alloys of aluminium with silicon*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
  15. Crubes, U.G. (1983) Veredelung von Aluminium gublegierung mit Al–Sr 3,5-Vorlegierung in Drahtform. *Giesserei*, 70(8), 257–258.
  16. Abramov, A.A. (2012) About modification of silumins. *Litejnoe Proizvodstvo*, 7, 19 [in Russian].
  17. Korolyov, S.P., Nemenenok, B.M., Mikhajlovsky, V.M. et al. (2005) Problems and practice of modification of hypereutectic silumins for piston alloy. *Litejshchik Rossii*, 10, 19–22 [in Russian].
  18. Stetsenko, V.Yu. (2008) On modification of hypoeutectic and eutectic silumins. *Litio i Metallurgiya*, 1, 149–150 [in Russian].
  19. Xu, C.L., Jiang, Q.C., Yang, Y.F. et al. (2006) Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *J. of Alloys and Compounds*, 422(1–2), 1–4.
  20. Xu, C.L., Wang, H.Y., Yang, Y.F. (2006) Effect of La2O3 in the Al–P–Ti–TiC La2O3 modifier on primary silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *Ibid.*, 421(1), 128–132.
  21. Stetsenko, V.Yu. (2008) On mechanism of modification of silumins. *Metallurgiya Mashinostroeniya*, 1, 20–23 [in Russian].
  22. Popova, M.V., Ruzhilo, A.A. (2000) Hereditary effect of batch and melt processing on thermal expansion of hypereutectic silumins. *Litejnoe Proizvodstvo*, 10, 4–6 [in Russian].
  23. Sizonenko, O., Prokhorenko, S., Torpakov, A. et al. (2018) The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes. *AIP Advances*. 085317. ISSN 2158-3226. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5031195>.
  24. Sizonenko, O.N., Grigoryev, E.G., Zaichenko, A.D. (2017) Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *High Temperature Materials and Processes*, 36(9), 891–896. ISSN 0334-6455. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2016-0049>.
  25. Bethune, D.S., Meijer, G., Tang, W.C., Rosen, H.J. (1990) The vibrational Raman spectra of purified solid films of C60 and C70. *Chem. Phys. Lett.*, 174, 219–222. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(90\)85335-A](https://doi.org/10.1016/0009-2614(90)85335-A).

## DISCHARGE-PULSE TREATMENT OF THE Al – Ti – C SYSTEM MODIFIER

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, O.M. Syzonenko<sup>2</sup>, V.V. Holovko<sup>1</sup>, P. Tashev<sup>3</sup>, Ye.V. Lypian<sup>2</sup>, M.S. Prystash<sup>2</sup>, A.S. Torpakov<sup>2</sup>,  
M.O. Pashchin<sup>1</sup>, O.L. Mikhodui<sup>1</sup>, V.O. Sheretskyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 54018, Mykolaiv, Bohoyavlenskyi Ave., 43-a. E-mail: [dioo@iipt.com.ua](mailto:dioo@iipt.com.ua)

<sup>3</sup>Institute of Metal Science, Equipment and Technologies «Acad. A. Balevsci» with Hydroaerodynamics centre of the BAS. 15474, Sofia, Bulgaria, Shipchenski Prohod blvd., 67, E-mail: [ptashev@ims.bas.bg](mailto:ptashev@ims.bas.bg)

The results of studying the influence of the modifier of the Al – Ti – C system, obtained by high-voltage electric discharge treatment in a hydrocarbon liquid, on the structure and properties of the cast AK7pch (A357) alloy are presented. The prospects for the use of a modifier produced by the method of a high-voltage electric discharge treatment of metal powders to improve the structure of cast alloys and weld metal are shown. 25 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

*Key words:* welded joint, weld metal, high-voltage electric discharge, modifier of the structure of cast alloys, metallurgy, dispersion, carbidization

Надійшла до редакції 08.04.2021