

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МОДИФІКАТОРІВ СИСТЕМИ Ti–TiC ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТИПУ 25X5ФМС

Л.М. Лобанов¹, О.М. Сизоненко², І.О. Рябцев¹, М.О. Пашин¹, А.А. Бабінець¹, І.П. Лентюгов¹,
А.С. Торпаков², О.Л. Міходуй¹, Т.Г. Соломійчук¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

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

Удосконалено технологію виготовлення модифікаторів системи Ti–TiC, що дозволило зменшити середній діаметр його частинок більше ніж у 6 разів. Використання запропонованої методики обробки дозволило отримати порошок Ti–TiC із не менш ніж 20 % TiC у його складі. Встановлено, що обробка у газі для досліджених режимів є більш ефективною з точки зору диспергування, аніж обробка у етанолі. Використання отриманого порошку в якості модифікатора при його вмісті в наплавленому металі 25X5ФМС на рівні 0,01 % призводить до значної зміни мікроструктури й перетворенню її зі стовпчастої в коміркову. Найбільш перспективно, з точки зору можливості керування структурою і властивостями наплавленого металу, виглядає використання модифікованих порошоків Ti–TiC типу H2 та H4, які одержані у результаті високовольтної обробки суміші відповідних порошоків у вуглеводневій рідині з використанням режиму об'ємно-розподіленого багатоіскрового розряду. Це дозволяє значним чином впливати на структуру наплавленого металу типу 25X5ФМС, але при цьому не призводить до утворення в наплавленому металі мікротріщин. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: модифікування, технологія виготовлення модифікаторів, високовольтна обробка, вуглеводнева рідина, дугове наплавлення, порошковий дріт, наплавлений метал, структура наплавленого металу, неметалеві включення

Вступ. Введення в розплав металів різних типів модифікаторів є досить поширеним прийомом подрібнення їх структури та підвищення механічних та службових властивостей. Модифікатори та мікролегуєчі елементи використовують також для подрібнення структури та запобігання спрямованості росту кристалітів при затвердінні зварювальної ванни у наплавлувальному та зварювальному виробництві [1–8]. У технічній літературі є дані про застосування модифікаторів, що містять бор або ітрій, для подрібнення структури та підвищення службових властивостей наплавленого металу [2, 3]. Однак модифікатори, що містять зазначені елементи, є дуже дорогими, що не завжди виправдовує їх використання з економічної точки зору.

В роботі [9] на прикладі застосування модифікатора Ti–TiC при литті показано, що його введення дозволило зменшити розмір зерна та підвищити механічні характеристики жароміцного сплаву СМ88У. Це свідчить про перспективність використання металевих порошоків Ti–TiC для модифікування та мікролегування наплавленого металу різних систем легування.

Технологію отримання модифікатора Ti–TiC розроблено в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України. За цією технологією для виготовлення модифікаторів Ti–TiC використовується обробка суміші відповідних порошоків високовольтним електричним розрядом (ВЕР) у вуглеводневій рідині.

ВЕР у рідині є унікальним комплексним методом впливу на різні дисперсні системи з метою їх диспергування, яке супроводжується зміною структури та фазового складу останніх. ВЕР характеризується миттєвим виділенням значної кількості енергії (одиниці, десятки або сотні кДж) у первісно невеликому об'ємі каналу розряду протягом мікросекунд. Висока концентрація енергії в плазмовому каналі розряду призводить до виникнення в об'ємі розрядної камери електромагнітних та термічних полів, інтенсивних хвиль тиску, гідропотоків, об'ємної мікрокавітації та електроерозійних процесів, які сприяють диспергуванню та еволюції структури дисперсних систем [10, 11].

У роботі досліджено можливість використання модифікатора Ti–TiC для подрібнення струк-

Лобанов Л.М. Scopus Author ID 6603876807, Пашин М.О. Scopus Author ID 7801572218

Міходуй О.Л. Scopus Author ID 36189953300, Сизоненко О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8449-2481>

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>,

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Торпаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9805-3914>

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© Л.М. Лобанов, О.М. Сизоненко, І.О. Рябцев, М.О. Пашин, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, А.С. Торпаков, О.Л. Міходуй, Т.Г. Соломійчук, 2023

тури металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, а також наведено результати вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC з використанням різних технологічних режимів та вуглеводневих рідких середовищ.

Таким чином, метою роботи є вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC, отриманого із застосуванням ВЕР, та дослідження його впливу на структуру наплавленого металу типу 25Х5ФМС.

Методики досліджень. Вдосконалення технології виготовлення модифікатора Ti–TiC з використанням ВЕР виконувалось на експериментальному стенді, схему якого наведено на рис. 1, а принцип роботи – у статті [11].

Дослідження ВЕР в дисперсній системі «рідкий діелектрик – порошок металу» виконували при напрузі зарядки конденсаторів $U = 50$ кВ, індуктивності розрядного контуру $L = 0,7$ мкГн та розрядному проміжку l_p , який обирався в залежності від робочої рідини і складав ~ 17 мм для гасу і ~ 24 мм для етанолу. Ємність накопичувача C складала $0,8$ мкФ, тому значення запасеної енергії одиничного розряду W_1 складало 1 кДж. Питома енергія обробки становила 20 МДж/кг. Згідно результатів, наведених у роботах [10, 11], саме такі значення параметрів ВЕР-обробки дозволяють досягнути балансу між подрібненням, кількістю синтезованого порошку карбиду титану та кількістю частинок вільного нановуглецю.

Використання гасу в якості робочого середовища при обробці сумішей порошків дозволяє синтезувати нановуглець різних алотропних модифікацій в результаті піролізу вуглеводневих ланцюгів плазмою каналу розряду. Активний нановуглець здатен вступати в реакції з порошком Ti, внаслідок чого можливий синтез карбиду титану [12]. За рахунок зміни складу вуглеводневої рі-

дини можливе керування кількістю синтезованого нановуглецю, тому у роботі в якості робочого середовища для реалізації ВЕР використовували гас та етанол. Співвідношення твердої та рідкої фази при дослідженнях складало $1:15$ (маса оброблюваного порошку складала 100 г, об'єм робочої рідини – $1,5$ дм³).

При кожній обробці виконували запис осцилограм розрядних струму та напруги через кожні 100 розрядів. Значення електричних та гідродинамічних характеристик для кожної із обробок усереднювали згідно результатам розрахунків для записаних осцилограм. Для кожного із наведених режимів виконували не менш, ніж три експерименти.

Виконували обробку ВЕР порошку Ti із застосуванням одновістрійної та тривістрійної електродних систем (ЕС) у середовищі гасу або етанолу. При використанні системи «одне вістря – площа» ВЕР розвивається за класичним механізмом іскрового розряду (ІР) у дисперсній системі, тоді як використання ЕС типу «три вістря – площа» дозволяє реалізувати режим об'ємно-розподіленого багатоіскрового розряду (ОБР). Отримані в результаті обробки модифікатори були позначені відповідно Н1 та Н2 (середовище гас) і Н3 та Н4 (середовище етанол) (таблиця).

Для оцінки ступеня впливу ВЕР у вуглеводневому середовищі на морфологію та розміри частинок порошків використовували оптичний мікроскоп БЮЛАМ-І з максимальним збільшенням $\times 1350$, растровий електронний мікроскоп РЕМ-МА-102 з діапазоном збільшень від 10 до $\times 250000$ та цифрову фотокамеру Canon. Проби порошку для оптичної мікроскопії відбирали відповідно до ГОСТ 23402-78.

Дослідження фазового складу порошків виконувалося методом рентгенофазового аналізу

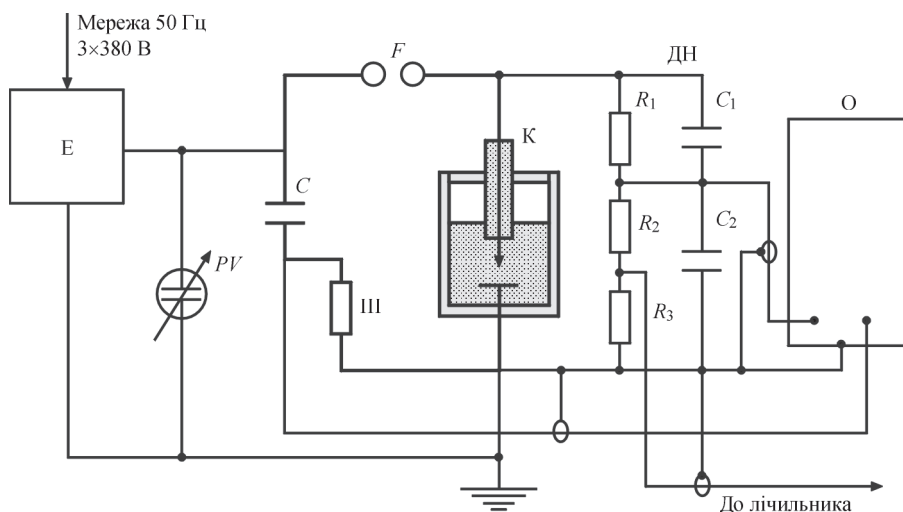


Рис. 1. Схема експериментального стенду для електророзрядної обробки порошків: Е – енергетична частина; PV – кіловольметр; С – ємнісний накопичувач; Ш – коаксіальний шунт; К – робоча камера; О – запам’ятовуючий осцилограф; F – повітряний розрядник; ДН – ділянка напруги; R1, R2, R3, C1, C2 – елементи ділянки напруги

за допомогою дифрактометру ДРОН-4-07 при $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. Ідентифікація фаз на дифрактограмах здійснювалася за базами POW_COD. Кількісний фазовий склад визначався за методикою оцінки інтенсивності з використанням корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio) із застосуванням програми QualX і повного профільного аналізу із застосуванням програми Maud.

Зразки для дослідження мікроструктури отримували шляхом дугового наплавлення порошковими дротами на пластини зі сталі 40X. Для наплавлення використовували порошковий дріт ПП-Нп-25X5ФМС, у шихту якого додавали порошок модифікаторів з таким розрахунком, щоб отримати вміст модифікатора в наплавленому металі на рівні 0,01 %. В якості еталону використовували зразки, наплавлені порошковим дротом ПП-Нп-25X5ФМС без модифікаторів. Діаметр всіх розроблених дротів – 1,8 мм, коефіцієнт заповнення – 25 %. Усього було виготовлено п'ять дослідних порошкових дротів (див. таблицю).

Наплавлення всіх зразків виконували під флюсом АН-26П на однаковому режимі: струм 220...230 А, напруга 36...37 В, швидкість наплавлення 25 м/год. З метою уникнення впливу переміщення основного металу, на кожному зразку наплавлення виконувалось у чотири шари. З метою уникнення кристалізаційних тріщин перед наплавленням зразки підігрівали до 200 °С, а після наплавлення охолоджували разом з піччю. Після повного остигання з наплавлених зразків вирізали поперечні заготовки для підготовки відповідних мікрошліфів і проведення металографічних досліджень.

Зразки для металографічних досліджень були підготовлені за стандартними методиками. Для виявлення мікроструктури зразки були протравлені електролітично в 20 %-му розчині хромової кислоти при напрузі 20 В.

Дослідження мікроструктури та неметалевих включень наплавленого металу проводили на мікроскопі НЕОРНОТ-32. Вимірювання твердості проводили на твердомірі М-400 фірми LECO при навантаженні 100 г та 1 кг. Фотографії мікроструктур отримані за допомогою фотокамери OLYMPUS C-500.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати дослідження зміни дисперсності порошку Ті після ВЕР-обробки на різних режимах наведено на рис. 2. Вихідний порошок титану мав моноmodalний розподіл частинок за розмірами, пік якого знаходився в точці, яка відповідає діаметрові ~ 30 мкм, при цьому 54 % частинок порошку мали розмір, менший за це значення (див. рис. 2, крива 1), а середній діаметр такого порошку складав 60 мкм.

Аналізуючи наведені на рис. 2 результати, слід зазначити, що ВЕР-обробка у всіх досліджених режимах дозволила значно зменшити середній діаметр частинок порошку та змінити характер його розподілу за розмірами. Так, ВЕР-обробка у гасі у режимі ІР дозволила отримати порошок системи Ті–ТіС із середнім діаметром 8,2 мкм. Розподіл такого порошку за розмірами мав біmodalний характер (крива 2) – один із піків був близьким до вихідного діапазону розмірів та становив 7,5 мкм (32 %), а інший знаходився у діапазоні розмірів менше за 1 мкм (0,6 мкм, 37 %).

Зміна режиму обробки на ОБР із збереженням гасу у якості робочого середовища дозволила збільшити ефективність диспергування – отриманий порошок системи Ті–ТіС мав середній діаметр 7,4 мкм. Він характеризувався майже моноmodalним розподілом (крива 3), основний пік якого знаходився у точці, яка відповідає діаметру 0,7 мкм (44 %). Саме такий режим був найбільш ефективним з точки зору диспергування частинок порошку.

Зміна робочого середовища з гасу на етанол при реалізації режиму ІР дозволила отримати порошок системи Ті–ТіС із середнім діаметром 12,1 мкм. Розподіл цього порошку за розмірами був біmodalним (крива 4) – на ньому спостерігались піки у точках 10 мкм (35 %) та 0,8 мкм (21 %).

Зміна режиму розряду на ОБР шляхом заміни електродної системи «одне вістря – площа» на електродну систему «три вістря – площа» із збереженням етанолу в якості робочого середовища ВЕР дозволила підвищити ефективність диспергування у етанолі. Отриманий порошок системи Ті–ТіС характеризувався середнім діаметром 10,2 мкм, а його розподіл за розмірами мав моноmodalний характер (крива 5) із піком у точці, яка відповідає діаметру 7,5 мкм (40 %).

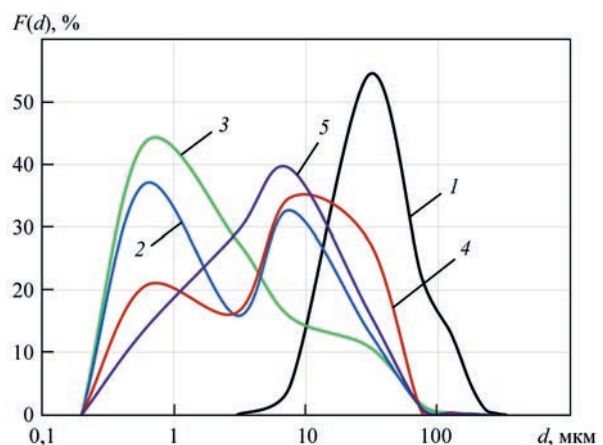


Рис. 2. Розподіл частинок порошку модифікаторів за розмірами d до та після ВЕР-обробки при різних режимах: 1 – вихідний порошок Ті; 2 – модифікатор Н1, середовище обробки – гас, режим ІР; 3 – модифікатор Н2, середовище обробки – гас, режим ОБР; 4 – модифікатор Н3, середовище обробки – етанол, режим ІР; 5 – модифікатор Н4, середовище обробки – етанол, режим ОБР

Таким чином, обробка порошку Ti у всіх розглянутих режимах дозволила знизити його середній діаметр більше ніж у 6 разів. Обробка із реалізацією ОБР дозволяє отримати практично моноmodalний розподіл частинок за розмірами та відрізняється більшою ефективністю диспергування. Обробка у гасі для досліджених режимів є більш ефективною з точки зору диспергування, аніж обробка у етанолі.

Отримані у результаті дослідження дифрактограми зразків оброблених порошків на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4 наведено на рис. 3. На всіх дифрактограмах окрім піків, характерних для Ti, з'являються також піки, які свідчать про синтез TiC в процесі ВЕР-обробки вихідного порошку титану.

Результати кількісного аналізу методом RIR свідчать, що кількість синтезованого карбіду титану для всіх досліджених режимів відрізняється у межах похибки (таблиця). Дещо кращі з точки зору ефективності карбідизації результати спостерігались при обробці у етанолі у режимі IP, але всі режими дозволили отримати не менш, ніж 20 % TiC у складі порошку після його обробки.

Ці результати підтверджують висновок, зроблений у роботах [8, 9], що на ефективність карбідизації порошку Ti у найбільшій мірі впливає питома енергія обробки, яка для всіх досліджених режимів була сталою та становила 20 МДж/кг.

Досліджували мікроструктуру металу, наплавленого п'ятьма дослідними порошковими дротами (рис. 4, а–д та рис. 5 а, б).

Мікроструктура зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС без додавання модифікатора (таблиця, рядок 1), складається зі стовпчастих кристалітів (рис. 4, а), які ростуть у напрямку тепловідводу. Ширина кристалітів перебуває у межах 30...60 мкм. У тілі кристалітів спостерігається голчаста мартенситна структура, по границях литих кристалітів спостерігаються світлі виділення, які відповідають залишковому аустеніту (рис. 4, а). Дуже рідко спостерігаються виділення округлої форми, які можуть являти собою складні карбіди. Твердість наплавленого металу складає $HV1 - 5920...6060$ МПа. Дефекти як в наплавленому металі, так і поблизу лінії сплавлення – відсутні.

Мікроструктура металу зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифіка-

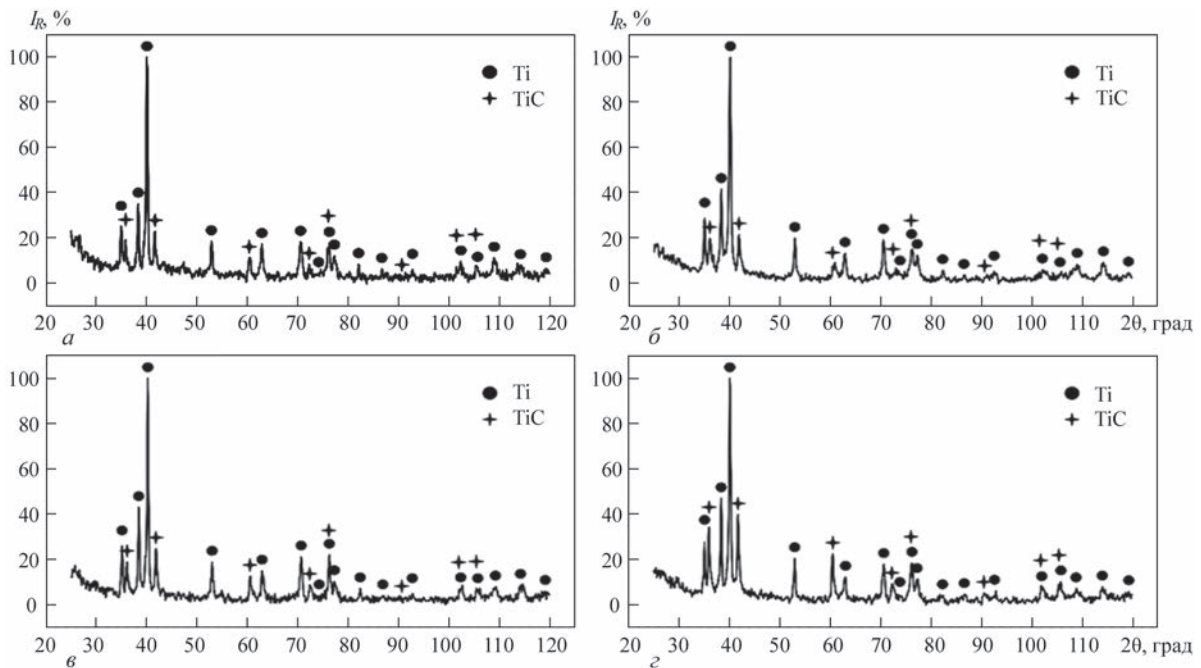


Рис. 3. Дифрактограми порошкової суміші системи Ti–TiC, отриманої шляхом ВЕР-обробки порошку титану: а – модифікатор Н1, середовище обробки – гас, режим IP; б – модифікатор Н2, середовище обробки – гас, режим ОБР; в – модифікатор Н3, середовище обробки – етанол, режим IP; з – модифікатор Н4, середовище обробки – етанол, режим ОБР

Характеристики металу, наплавленого порошковими дротами ПП-Нп-25Х5ФМС, що містять модифікатори Ti–TiC, які отримані з використанням ВЕР-обробки на різних режимах

Позначення модифікатора	Робоче середовище	Режим розряду	Вміст TiC у порошку після обробки, %	Розмір кристалітів ϵ_s , мкм/тип структури	Твердість наплавленого металу $HV1$, МПа
Без модифікатора	–	–	–	30...60/стовпчаста	5920...6060
Н1	Гас	IP	20	30...180/комірчаста	6410...6420
Н2	Гас	ОБР	23	20...80/комірчаста	5700...5800
Н3	Етанол	IP	20	35...170/комірчаста	6350...6600
Н4	Етанол	ОБР	23	30...100/комірчаста	5250...5330

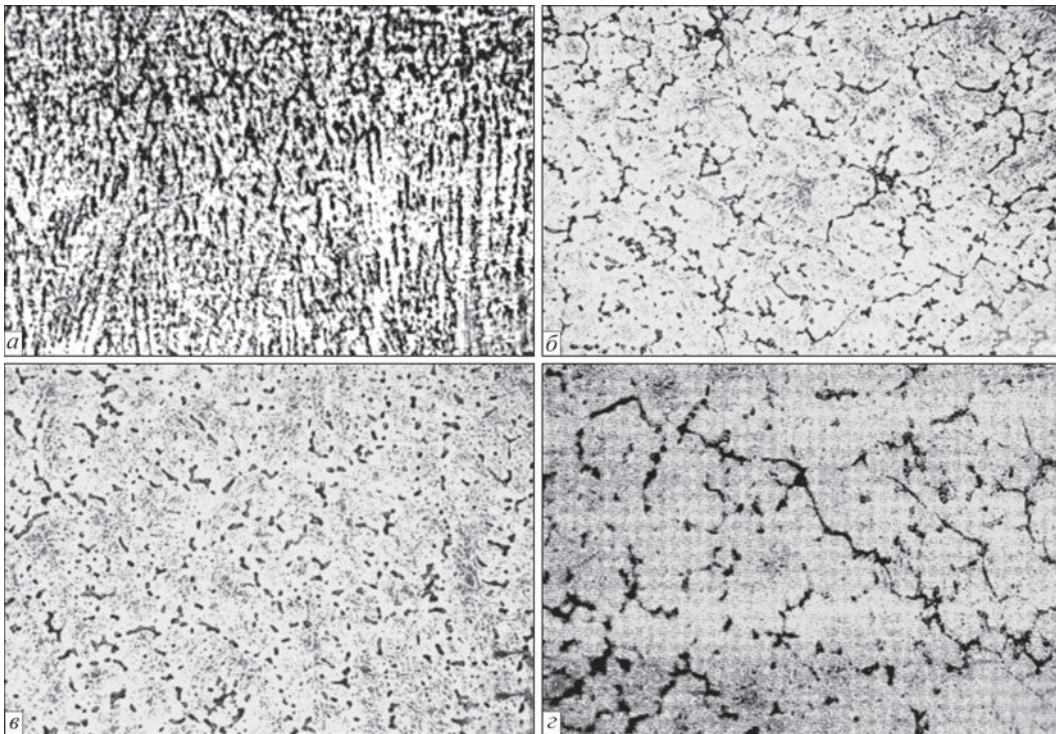


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 200$) металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС: *a* – без мікролегуючих добавок; *b* – із застосуванням модифікатора Н1; *c* – Н2; *d* – Н4

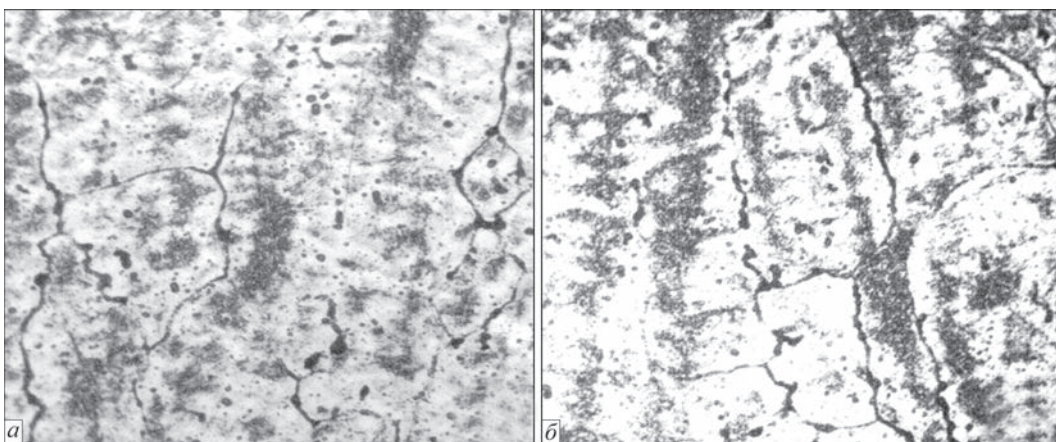
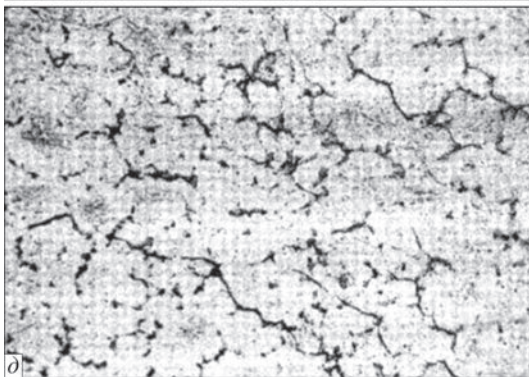


Рис. 5. Мікроструктура ($\times 600$) металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, з мікротріщинами: *a* – із застосуванням модифікатора Н1; *b* – Н3

тора Н1 зі складом 80 % Ti+20 % TiC (таблиця, рядок 2), подрібнилася (рис. 4, б). Подрібнилась також структура мартенситу. Розмір комірок перебуває в межах 30...180 мкм. По границях комірок спостерігається досить велика кількість темнотравної фази й округлих виділень, які вибудовуються в ланцюжки й, імовірно,

можуть являти собою карбіди. Крім того, у верхньому шарі наплавленого металу спостерігаються мікротріщини, що небажано (рис. 5, а). Твердість наплавленого металу складає $HV1 - 6410...6420$ МПа.

Мікроструктура металу зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифі-

катора Н2 зі складом 77 % Ti + 23 % TiC (таблиця, рядок 3), представляє литу комірчасту структуру (рис. 4, в). В тілі кристалітів спостерігається великогочаста мартенситна структура з твердістю $HV_{0,1} - 4900...5450$ МПа. По границях литих кристалітів спостерігається світлотравлена аустенітна структура з твердістю $HV_{0,1} - 5100$ МПа з небагатьма виділеннями карбідів та інтерметалідів. Інтегральна твердість цього зразка знаходиться в межах $HV1 - 700...5800$ МПа. Розмір комірок – 20...80 мкм. Мікротріщин у цьому зразку не виявлено.

Досліджували мікроструктуру зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифікатора Н3 зі складом 80 % Ti + 20 % TiC (таблиця, рядок 4; рис. 4, г). Вона представляє собою матрицю, що складається зі слаботравлених дисперсних голок мартенситу із виділеннями карбідів або інтерметалідів, або тих і тих по границях литих кристалітів у вигляді окремих або ланцюжкових включень (рис. 4, г). Твердість мартенситної матриці складає $HV_{0,1} - 5700...5750$ МПа, а інтегральна твердість знаходиться в межах $HV1 - 6350...6600$ МПа. Розмір комірок 35...170 мкм. У цьому зразку, як і зразку з модифікатором Н1, у верхніх шарах наплавленого металу виявлені мікротріщини (рис. 5, б).

Необхідно відмітити, що модифікатори Н1 та Н3 були виготовлені із застосуванням ВЕР-обробки у режимі ІР. На відміну від цього, модифікатори Н2 та Н4 виготовлялися із застосуванням ВЕР-обробки у режимі ОБР. Як було показано вище, обробка в режимі ОБР забезпечує отримання більшої кількості карбідів титану менших розмірів. Це, на нашу думку, і є однією з причин відсутності мікротріщин у наплавленому металі з модифікаторами Н2 та Н4.

Мікроструктура зразка, наплавленого дротом ПП-Нп-25Х5ФМС із вмістом модифікатора Н4 зі складом 77 % Ti + 23 % TiC (таблиця, рядок 5), також значно подрібнилася (рис. 4, д). По границях комірок спостерігаються темнотравні виділення, однак кількість цих виділень менше, ніж в аналогічній ділянці зразка з модифікатором Н1, крім того, вони не зливаються у довгі ланцюжки. Мікротріщин в цій зоні також не відмічено. Твердість наплавленого металу становить $HV1 - 5250...5330$ МПа.

Також відповідно до методики ГОСТ 1778-70 на полірованих нетравлених мікрошліфах визначали рівень забруднення неметалічними включеннями наплавленого металу. Із представлених зразків найсильніше забруднення неметалічними включеннями, в основному оксидами, наплавленого металу спостерігається в зразку без модифікаторів. Воно відповідає балу № 3а по таблиці

«Оксиди точкові» ГОСТ 1778-70. Зразки з модифікаторами Н1, Н2, Н3 суттєво чистіші по неметалічних включеннях у порівнянні зі зразком без модифікаторів і їх забруднення відповідає балу № 1а тієї ж таблиці. В зразку з модифікатором Н4 забруднення наплавленого металу неметалічними включеннями найменше й становить менше бала № 1а таблиці «Оксиди точкові».

Висновки

1. Метод ВЕР-обробки на різних режимах у вуглеводневій рідині порошку системи Ti–TiC дозволив зменшити середній діаметр його частинок більше ніж у 6 разів. В результаті було отримано порошок з практично мономодальним розподілом частинок за розмірами.

3. Використання отриманого порошку системи Ti–TiC в якості модифікатора при його вмісті в наплавленому металі типу 25Х5ФМС на рівні 0,01 % призводить до значної зміни мікроструктури й перетворенню її зі стовпчастої в коміркову.

3. Найбільш перспективно, з точки зору можливості керування структурою і властивостями наплавленого металу, виглядає використання у якості модифікаторів порошоків Ti–TiC типу Н2 та Н4, які дозволяють значним чином впливати на структуру наплавленого металу типу 25Х5ФМС, але, при цьому, не призводять до утворення в наплавленому металі мікротріщин за рахунок наявності у складі цих модифікаторів більшої кількості карбідів титану менших розмірів.

Список літератури

1. Бабінець А.А., Рябцев І.О. (2021) Вплив модифікування та мікролегування на структуру та властивості наплавленого металу (огляд). *Автоматичне зварювання*, **10**, 3–11.
2. Гладкий П.В., Микаелян Г.С. (1992) *Микролегирувание и модифицирование износостойкого наплавленного металла. Наплавленный металл. Состав, структура, свойства*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 33–36.
3. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентогов І.П., Богайчук І.П. (2022) Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. *Автоматичне зварювання*, **6**, 3–11.
4. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, **6**, 19–21.
5. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *Ibid*, **6-7**, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
6. Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *Ibid*, **11**, 10–16. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
7. Stepanov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *Ibid*, **8**, 10–12.
8. Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *Journal of alloys and compounds*, **692**, 351–358.
9. 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: 10.1007/s11003-020-00421-1
- 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. Харьков, НТУ «ХПІ»*, 51, 1160, 59–65.
 - Сизоненко О.Н., Трегуб В.А., Липян Е.В. (2015) Анализ физико-технических процессов при высоковольтной электро-разрядной обработке металлических порошков. *Вестник Украинского материаловедческого общества*, 8, 10–21.
 - Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Й. (1985) *Специальные стали*. Москва, Металлургия, 308–309.
 - Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *The Paton Welding J.*, 6-7, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
 - Kuznetsov, V.D., Stepanov, D.V. (2015) Structure and properties of weld metal modified by nanooxides. *The Paton Welding J.*, 11, 10–16. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.01>
 - Stepnov, K.K., Matvienko, V.N., Oldakovsky, A.I. (2011) Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding J.*, 8, 10–12.
 - Pu, J., Yu, Sh., Li, Yu. (2017) Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals. *J. of Alloys and Compounds*, 692, 351–358.
 - 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 Sci.*, 56, 2, 232–239. ISSN 1068-820X (Print), 1573-885X (Electronic). DOI: 10.1007/s11003-020-00421-1
 - Lypyan, E.V., Syzonenko, O.N., Torpakov, A.S., Zdanov, A.A. (2015) Thermodynamical analysis of heterogeneous chemical reactions in system “mixture of Fe-Ti powders – hydrocarbon liquid” under the action of high-voltage electric discharges. *Visnyk NTU KhPI. Seriya: Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokykh Naprug. Kharkiv*, 51, 1160, 59–65 [in Russian].
 - Syzonenko, O.N., Tregub, V.A., Lypyan, E.V. (2015) Analysis of physico-technical processes in high-voltage electric-discharge treatment of metal powders. *Vestnik Ukr. Mater. Obshchestva*, 8, 10–21 [in Russian].
 - Goldshstejn, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Yu.J. (1985) *Special steels*. Moscow, Metallurgiya, 308–309

References

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCING Ti-TiC MODIFIERS AND STUDYING THEIR IMPACT ON THE STRUCTURE OF DEPOSITED METAL OF TYPE 25Kh5FMS

L.M. Lobanov¹, O.M. Syzonenko², I.O. Ryabtsev¹, M.O. Pashchyn¹, A.A. Babinets¹, I.P. Lentyugov¹, A.S. Torpakov², O.L. Mikhoduj¹, T.G. Solomiichuk¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine. 43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolaiv,
E-mail: dioo@iippt.com.ua

The technology of producing Ti-TiC modifiers was improved, which reduced the average diameter of its particles by more than 6 times. The use of the proposed processing procedure made it possible to produce a Ti-TiC powder with at least 20 % of TiC in its composition. It was found that for the investigated modes, processing in kerosene is more effective in terms of dispersion than processing in ethanol. The use of the produced powder as a modifier at its content in a deposited metal 25Kh5FMS at the level of 0.01 %, leads to a significant change in the microstructure and its conversion from a columnar into a cellular one. In terms of the possibility to control the structure and properties of the deposited metal, the most promising is the use of modified Ti-TiC powders of H2 and H4 type, which were produced as a result of high-voltage processing of the mixture of corresponding powders in a hydrocarbon fluid using a voluminous-distributed multi-spark discharge mode. This provides a significant effect on the structure of the deposited metal of type 25Kh5FMS, but at the same time does not lead to the formation of microcracks in the deposited metal. 12 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: modification, technology of producing modifiers, high-voltage processing, hydrocarbon fluid, arc surfacing, flux-cored wire, deposited metal, structure of deposited metal, non-metallic inclusions

Надійшла до редакції 28.12.2022



VII Міжнародна конференція

«Пошкодження матеріалів під час експлуатації,
методи діагностування і прогнозування»

Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя

18–20 жовтня 2023 р.

<https://dmdp.tntu.edu.ua/>