

## ОСОБЛИВОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ СТАЛЕВОГО ДРОТУ НА ТИТАНОВУ ПЛАСТИНУ З НАПИЛЕНИМ ПРОШАРКОМ

В.М. Коржик<sup>1</sup>, А.А. Гринюк<sup>1</sup>, А.А. Чайка<sup>1</sup>, Д.В. Строгонов<sup>1</sup>,  
І.І. Тимофєєва<sup>2</sup>, М.А. Васильківська<sup>2</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>ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: post@ipms.kiev.ua

Розглянуто можливість отримання з'єднання сталь–титан, що утворюється при комплексному напиленні на титан шару оксиду алюмінію і шару залізного порошку ПЖ-1 та наступним наплавленням плавким електродом або плазмою шару сталі з використанням присадного дроту Св-08Г2С. Розроблено новий комбінований спосіб з'єднання сталь–титан з нанесенням на титан захисних шарів  $Al_2O_3$  та залізного порошку ПЖ-1 з подальшим наплавленням плазмою шару присадного дроту Св-08Г2С. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* плазово-дугове напилення; наплавлення; сталь; титан; оксид алюмінію; міжфазна взаємодія; фазовий склад

Розвиток сучасних технологій в машинобудуванні викликає необхідність застосування композиційних матеріалів зі збереженням індивідуальності властивостей кожного окремого елемента і з об'єднуючим комплексом властивостей, що забезпечують високу міцність, стійкість до корозії, теплопровідність, жароміцність, зносостійкість. Одним з таких металевих матеріалів є біметал сталь–титан, що має високу корозійну стійкість титану з високими характеристиками міцності і технологічними властивостями сталей [1–4].

Стримуючим фактором отримання біметалічного з'єднання сталь–титан є складність отримання якісного нероз'ємного з'єднання між титаном і сталлю. Отримання біметалевих з'єднань титану і його сплавів зі сталями пов'язане з труднощами у зв'язку з великими відмінностями в кристалохімічних характеристиках і фізичних властивостях, обмеженням процесів взаємної дифузії, появою крихких проміжних інтерметалідних фаз, що знижують механічні властивості таких сполук. Тому важливим завданням в розробці технологій отримання біметалевих з'єднань сталь–титан є розробка процесів, що забезпечують відсутність або мінімальну кількість в з'єднаннях крихких інтерметалідних фаз з підвищеною твердістю. Як випливає з діаграми стану, титан і залізо дають хімічні сполуки  $Ti_2Fe$ ,  $TiFe$ ,  $TiFe_2$ , які різко знижують пластичні властивості матеріалу, і три евтектики:  $\beta + TiFe$ ,  $TiFe + TiFe_2$ ,  $TiFe_2 + \alpha$ , що кристалізуються при температурах 1100, 1280, 1298 °С і містять 32, 62,5 та 82,5 % Fe відповідно (рис. 1) [5, 6].

Використовуються такі композити у виробництві хімічної, нафтохімічної, машинобудівної продукції. Одна з ефективних областей використання

їх в нафтохімічній промисловості — це виготовлення стійких до корозії магістральних трубопроводів, робочі поверхні яких здатні сприймати як механічні навантаження, так і схильні до корозійного руйнування. Внутрішню поверхню трубопроводів з високоміцної сталі, якими транспортують нафтогазову продукцію, покривають корозійностійким матеріалом з титану або титанових сплавів.

Відомі технологічні прийоми не вирішують проблему отримання біметалевих труб з високоміцної сталі і тонким внутрішнім шаром з титану. Основною технологічною проблемою при використанні методів отримання плавленням біметалу сталь–титан є обмеження рівня погонної енергії при плавленні, так як підвищені значення погонної енергії можуть бути причиною утворення інтерметалідних фаз на межі титанового і сталевго шарів біметалу. Таке завдання вимагає комбінова-

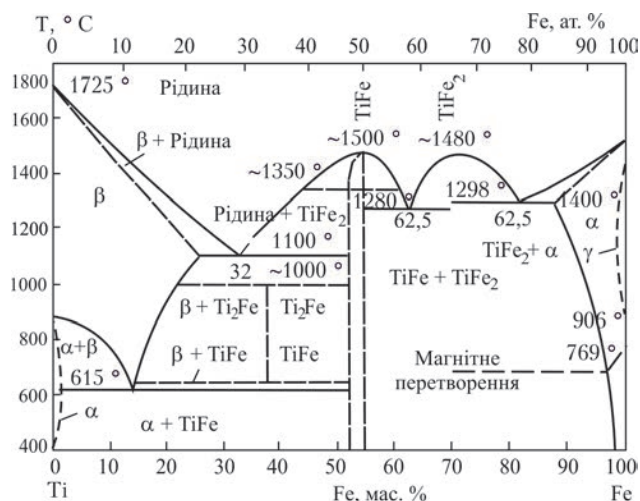


Рис. 1. Діаграма стану залізо–титан

В.М. Коржик — <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, А.А. Гринюк — <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>

© В.М. Коржик, А.А. Гринюк, А.А. Чайка, Д.В. Строгонов, І.І. Тимофєєва, М.А. Васильківська, 2020

Таблиця 1. Режими високошвидкісного плазмово-дугового напилення порошків оксиду алюмінію та заліза

Порошок	$I$ , А	$U$ , В	Тиск газу ( $P$ ), бар	$V$ , м/хв.	$D$ , мм	Витрата газу ( $Q$ ), л/хв	Витрата порошку, г/хв	Пропан
$Al_2O_3$	300	300	2,0	8	150	45	30...40	+
ПЖ-1	120	280	2,5	—	—	—	—	—

ного підходу з почерговим з'єднанням титанового шару, наплавленням або напиленням захисних шарів, далі основного шару з високоміцної сталі. При цьому повинні бути виконані вимоги захисту утворення інтерметалідів в зоні з'єднання. Вирішення таких завдань вимагає застосування нових технологій біметалічного з'єднання зі зниженими значеннями погонної енергії і технологій нанесення захисних шарів (плазмова наплавка, високошвидкісне плазмове напилення).

Мета даної роботи — дослідити процеси металургійної взаємодії при наплавленні сталевого присадного дроту Св-08Г2С на титанову пластину з використанням проміжного комбінованого прошарку з тонкого термобар'єрного шару  $Al_2O_3$  з подальшим напиленням шару залізного порошку ПЖ-1 методом високошвидкісного плазмово-дугового напилення. Наплавлення шару сталі присадним дротом Св-08Г2С виконували плавким електродом або плазмою.

**Технології, матеріали та методики дослідження.** Для з'єднання сталь-титан з боку титану нанесено захисний двошаровий прошарок методом високошвидкісного плазмово-дугового напилення. В ході проведення експериментів спочатку напилювали порошок оксиду алюмінію, а потім поверх нього — другий шар з порошку заліза ПЖ-1, який близький за хімічним складом сталі. Хімічний склад порошку марки ПЖ-1 наступний, мас. %, не більше: вуглець — 0,03; кремній — 0,1; марганець — 0,1; сірка — 0,02; фосфор — 0,02; кисень — 0,2; залізо — решта. Фракція становить менше 50 мкм, вологість не повинна перевищувати 0,2 %.

Для підвищення міцності зчеплення покриттів, які напилюються, з пластинами з титану, виконували поверхневе «рване» фрезерування. Це робилося замість звичайної дробоструминної обробки для усунення загрози введення в поверхневий шар абразивних частинок.

В роботі високошвидкісне плазмово-дугове напилення порошками оксиду алюмінію і заліза ПЖ-1 виконували за допомогою установки PLAZER 180-PL-S (див. технічні характеристики). Дана технологія реалізує процес високошвидкісного плазмового напилення порошку [7, 8]. В якості плазмоутворюючого газу використовується повітря з невеликими добавками горючого газу пропан-бутану. Це обладнання забезпечує реалізацію високошвидкісного плазмового процесу без застосування дорогих і дефіцитних газів. Витрату

повітря для високошвидкісного напилення (наприклад, на рівні 50 м<sup>3</sup>/год) забезпечує серійний компресор. Високоентальпійна плазма повітря з пропаном дозволяє повністю розплавити в ній практично всі тугоплавкі матеріали.

**Технічні характеристики установки PLAZER 180-PL-S для високошвидкісного повітряно-газового плазмового напилення захисного прошарку**

Плазмоутворюючий газ	повітря, повітря + пропан-бутан (метан) 5 %
Температура плазми, К	3500...7000
Швидкість плазмового струменя, м/с	1500...3000
Швидкість частинок, що напилюються, м/с	400...800
Продуктивність напилення кг/год:	
металеві порошки	до 50
керамічні порошки (оксиди)	до 25
Електрична потужність, кВт	40...180
Коефіцієнт використання матеріалу	до 0,75...0,85

Напилення на титанову пластину двошарового прошарку виконували високошвидкісним плазмово-дуговим напиленням на режимах, наведених в табл. 1.

Наплавлення сталевого дроту на титан з двошаровим прошарком, отримане високошвидкісним плазмово-дуговим напиленням, виконували за двома технологіями. В якості захисного газу використовували Ar, а в якості присадного електродного матеріалу — сталевий дріт Св08Г2С, до складу якого входить, %: 0,05...0,11 С; 1,8...2,1 Mn; 0,70...0,95 Si; < 0,025 S; < 0,03 P; < 0,25 Cu; < 0,25 Ni; < 0,2 Cr (ГОСТ 2246–70).

Отримано з'єднання титан-сталь двох типів:

перший — з'єднання при комплексному наплавленні на титанову пластину завтовшки 2 мм шару оксиду алюмінію (товщина напилення 150 мкм) і шару залізного порошку ПЖ-1 (товщина шару 450 мкм) з використанням установки PLAZER 180-PL-S і з подальшим імпульсним MIG наплавленням шару сталі дротом Св-08Г2С (діаметр 1 мм);

другий — з'єднання при комплексному наплавленні на титанову пластину завтовшки 2 мм шару оксиду алюмінію (товщина напилення 80 мкм) і шару залізного порошку ПЖ-1 (товщина шару 240 мкм) з використанням установки PLAZER 180-PL-S і з подальшим наплавленням плазмою з використанням струмопровідного присадного дроту Св 08Г2С (діаметр 1 мм) шару сталі. Режими наплавлення зразків наведені в табл. 2.

Дослідження структури покриттів виконували методами металографії (мікроскоп «Неофот-32»),

Таблиця 2. Режими наплавлення сталевого дроту на титанові пластини

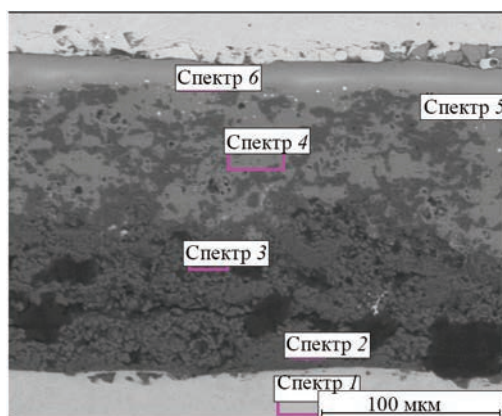
Тип наплавки	I, А	U, В	Газ	Витрата газу, л/хв				Швидкість			Амплітуда коливання, мм
				плазموутворюючого	захисного	чобітка	піддуву	зварювання, мм/хв	подачі дроту, м/хв	коливань, мм/с	
Перший	52	14,5	Ar + 18 % CO <sub>2</sub>	–	25 Ar + 18 % CO <sub>2</sub>	–	30 (Ar)	200	2,2	40	3,6
Другий	50	23,6	Ar	0,4	–	30	–	–	0,75	–	7

рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) (мікроаналізатор «САМЕВАХ»). Дослідження фазового складу отриманих сполук проводили методом рентгенівської зйомки на приладі ДРОН-3 в монохроматичному Cu-Kα випромінюванні з цифровою реєстрацією відображень. Досліджували фазовий склад з'єднань на поперечному перерізі наплавлених зразків і на межах розділу. Мікротвердість зразків вимірювали на мікротвердомірі фірми «LECO» при навантаженні на індентор 0,20 Н.

**Експерименти і обговорення результатів.** У роботі використовували технологічну схему отри-

мання з'єднання сталі і титану, в якій за рахунок попереднього напилення проміжного подвійного шару на титан вдалося мінімізувати появу крихкого інтерметаліду титан–залізо, який утворюється при традиційному зварюванні плавленням титану зі сталлю.

Аналіз результатів металографічних досліджень з'єднання, отриманого при імпульсному MIG наплавленні, показав, що мікроструктура перехідного шару неоднорідна (рис. 2, 3), являє собою налиплі одну на одну частинки, що призводить до утворення шаруватої, пухкої і пористої структури, з'являються мікропорожнини. В ре-



Спектр	Хімічний склад, мас. %					Всього
	O	Al	Ti	Mn	Fe	
1	–	0,49	99,51	–	–	100
2	49,0	50,07	0,36	–	0,58	→→
3	47,73	50,13	–	–	1,58	→→
4	40,15	32,87	–	1,15	5,15	→→
5	40,06	26,93	–	6,86	24,76	→→
6	44,28	13,50	16,10	1,55	12,57	→→

Рис. 2. Вміст елементів в окремих ділянках перехідної зони з'єднання Ti–Fe першого типу, визначений методом РСМА

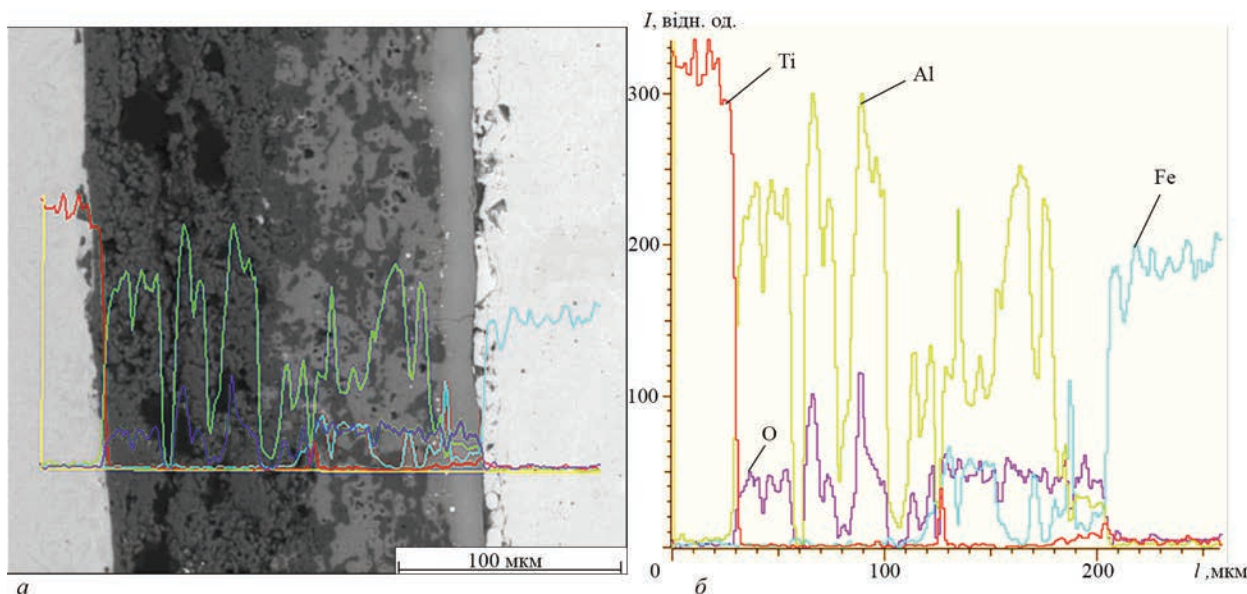


Рис. 3. Мікроструктура зони з'єднання Ti–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe першого типу (а) і розподіл компонентів (б) (електронно-зондовий аналіз CamScan-4)

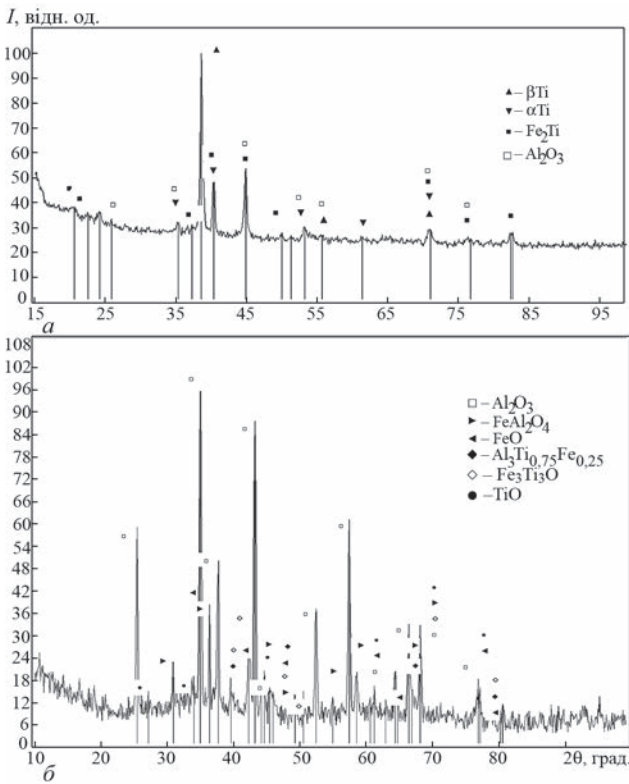


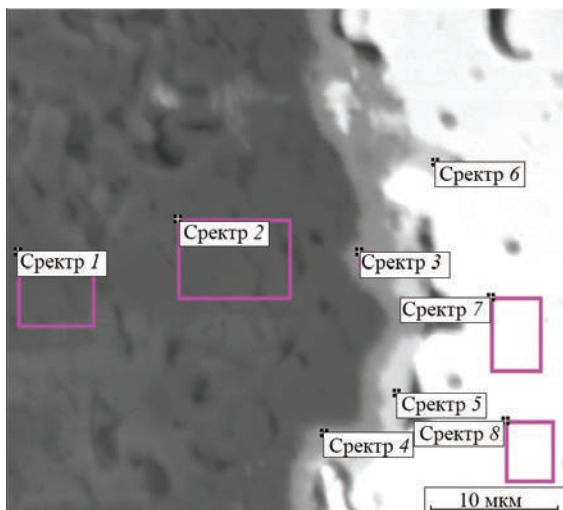
Рис. 4. Рентгенограми перехідної зони з'єднання Ti–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe: а — поперечний переріз зразка; б — межа розділу (перехідна зона) імпульсна MIG наплавка

зульгаті перемішування матеріалу відбувається формування перехідного шару, що складається з фаз оксиду алюмінію і з'єднань Ti–Al та Fe–Al з однієї й іншої сторони відповідно і з'єднання на основі Fe–Al–O. Спостерігається суцільний крихкий прошарок на межі з боку заліза товщиною до 15...20 мкм, по якому відбувається руйнування з'єднання сталь–титан. Хімічний склад прошарку відповідає інтерметаліду Al<sub>3</sub>Ti<sub>0,75</sub>Fe<sub>0,25</sub> з твердістю 5300 ± 300 МПа. Середні значення мікротвердості з боку титану і напавленого шару сталевих дроту становлять 1905 та 2033 МПа відповідно.

Вміст елементів в окремих ділянках перехідної зони визначено методом РСМА (рис. 2). На рис. 4 представлені результати аналізу фазового складу перехідної зони методом рентгенофазового аналізу.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) отриманих сполук показав, що основними зареєстрованими фазами на поперечному перерізі зразка, отриманого при імпульсному MIG напавленні, є високотемпературна β-модифікація титану, стійка від 882,5 °C і до температури плавлення; далі присутні приблизно в рівних кількостях (до 30 %) інтерметалідна фаза Fe<sub>2</sub>Ti і низькотемпературна α-модифікація титану, існуюча до 882,5 °C. Зберігся частково вихідний Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4, а). За результатами основною фазою, яка реєструється в з'єднанні, на межі розділу наплавка–підкладка, отриманому при імпульсному MIG напавленні дротом Св-08Г2С, є фаза Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4, б). Також присутнє залізо в стані окислення до FeO. Згідно з отриманими даними другою фазою по інтенсивності є складний оксид герциніт FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, де Al частково заміщується Fe<sup>3+</sup>. Герциніт утворюється по прямій реакції між FeO та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температурі нижче 1580 °C.

Встановлено, що в поверхневих шарах при імпульсному MIG напавленні дроту Св-08Г2С через слабе окислювальне середовище сповільнюється процес утворення шпінелі FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, де Al частково заміщується Fe. Особливістю взаємодії на межі розділу наплавка–підкладка є утворення прошарку крихкого інтерметаліду, про що свідчить відколонування напавленого металу при охолодженні внаслідок різниці температурних коефіцієнтів лінійного розширення підкладки і напавленого шару. Відбувається розрив високотемпературного хімічного зв'язку Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з подальшим утворенням інтерметалідного з'єднання заліза з алюмінієм і титаном (потрійного з'єднання Al<sub>3</sub>Ti<sub>0,75</sub>Fe<sub>0,25</sub>), яке є аналогом інтерметаліду Al<sub>3</sub>Ti, де частина атомів



Спектр	Хімічний склад, мас. %			
	O	Al	Fe	Всього
1	50,25	49,75		100
2	48,42	50,96	0,62	—»
3	33,92	27,98	38,11	—»
4	33,05	30,51	36,44	—»
5	19,09	0,92	79,99	—»
6	20,07	—	79,93	—»
7	—	—	100	—»
8	—	—	100	—»

Рис. 5. Вміст елементів в окремих ділянках перехідної зони Ti–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe другого типу, визначений методом РСМА; спектри 3 та 4 — з'єднання Al–Fe–O

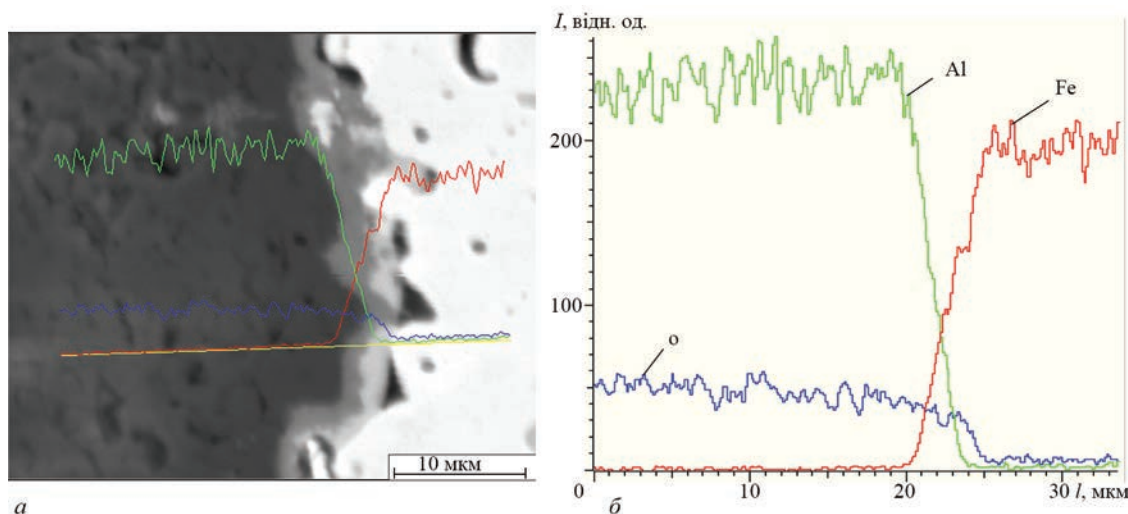


Рис. 6. Мікроструктура перехідної зони з'єднання Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> другого типу (а) і розподіл компонентів в зоні з'єднання (б) (електронно-зондовий аналіз CamScan-4)

титану заміщена залізом, так як дифузія Fe в Ti набагато швидша, ніж Ti в Fe.

При плазмовому наплавленні дроту Св-08Г2С значна частина тепла витрачається на плавлення присадного дроту, що проходить через плазмовий струмінь, і оплавлення двох шарів з залізного порошку та оксиду алюмінію. Структура основи відчуває невеликий термічний вплив. Мікроструктура перехідного шару з'єднання безпориста (рис. 5, 6). Перехідний шар з боку заліза містить нерівномірну багатофазну область з мікротвердістю 2006 ±

± 30 та 1722 ± 80 МПа з боку шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Середнє значення мікротвердості підкладки з боку титану становить 1815 МПа. На межі розділу зона взаємної дифузії становить приблизно 5 мкм.

Рентгенофазовий аналіз зразків показав, що основними зареєстрованими фазами на поперечному перерізі зразка, отриманого при наплавленні плазмою з присадним дротом Св-08Г2С (рис. 7, а), є стійка α-модифікація титану, утворилася незначна кількість оксиду титану TiO<sub>2</sub> і мінімальна кількість інтерметаліду Fe<sub>2</sub>Ti. За даними РФА перехідний шар на межі розділу наплавка-підкладка (рис. 7, б) складається, в основному, з алюмошпінелі FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, де Al частково заміщується Fe. При швидкій кристалізації утворилася високотемпературна γ-фаза Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Залізо виявлено в стані окислення до Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в кількості до 30 %. Як впливає з діаграми стану залізо-кисень (рис. 8), нижче 600 °C FeO нестійкий і переходить в Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; Розпадається FeO при повільному охолодженні по реакції: FeO ↔ α-Fe + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Ця фаза стійка у всьому діапазоні температур — від кімнатної до температури плавлення (1538 °C), має значну стійкість і високу абразивну здатність.

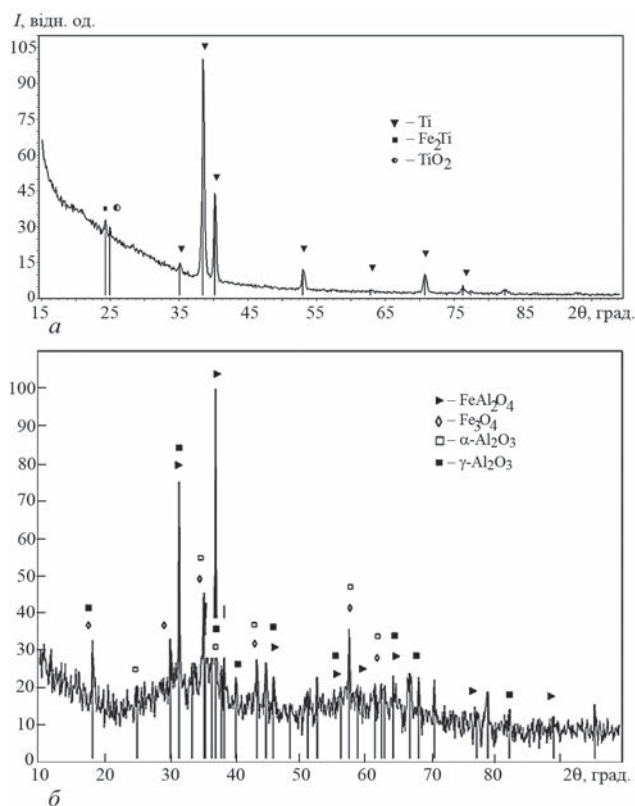


Рис. 7. Рентгенограми перехідної зони з'єднання Ti-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe: а — поперечний переріз зразка; б — межа розділу (перехідна зона), наплавка плазмою

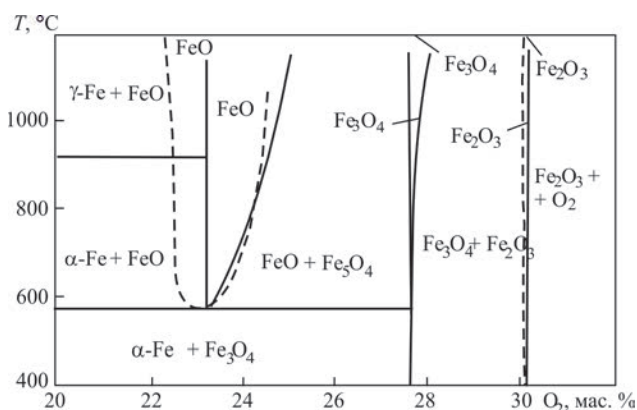


Рис. 8. Діаграма стану залізо-кисень

В даному з'єднанні існують як міжмолекулярний, так і внутрішньомолекулярний зв'язки (адгезія і хімічна взаємодія).

Таким чином, тільки при наплавленні плазмою і швидкому охолодженні можливо обмежити змішування і дифузійність компонентів заліза, алюмінію та титану і уникнути утворення крихкого металевого прошарку. Потрійний інтерметалід не утворюється.

## Висновки

1. Проаналізовано два комбінованих способи отримання сполук сталь–титан за допомогою нанесення захисного двошарового комплексного прошарку, що обмежує взаємодію титану та сталі, із застосуванням плазмового наплавлення струмопровідним присадним дротом і з використанням імпульсного MIG наплавлення.

2. Встановлено, що при імпульсному MIG наплавленні шару присадним дротом Св-08Г2С утворюється безперервний крихкий інтерметалідний прошарок  $Al_3Ti_{0,75}Fe_{0,25}$  на межі з боку заліза товщиною до 15...20 мкм, твердістю  $5300 \pm \pm 300$  МПа, по якому відбувається руйнування з'єднання. Це робить його непридатним для подальшого використання.

3. У разі наплавлення плазмою шару присадного дроту Св-08Г2С утворюється приблизно рівномірне з'єднання сталь–титан з двофазною областю товщиною 2,0...2,5 мкм з боку сталі. Твердість шару  $Al_2O_3$  становить  $1722 \pm 30$  МПа, з боку сталі і титану — 2006 та 1815 МПа відповідно. При цьому утворюється термодинамічно і хімічно стійка шпінель  $FeAl_2O_4$  без утворення крихких інтерметалідів.

4. Розроблено новий комбінований спосіб з'єднання сталь–титан з нанесенням на титан захисних шарів  $Al_2O_3$  і залізного порошку ПЖ-1 з подальшим наплавленням плазмою шару присадного дроту Св-08Г2С.

## Список літератури

1. Рабкин Д.М., Рябов В.Р., Гуревич С.М. (1975) *Сварка разнородных металлов*. Москва, Техника.

2. Скляр В.О. (2014) *Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии: учебное пособие*. Донецк, ДонНТУ.
3. Чепурко М.И., Остренко В.Я., Глускин Н.Я. и др. (1984) *Биметаллические материалы*. Ленинград, Судостроение.
4. Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. (2015) Применение биметаллических материалов в машиностроении. Ч. 1. *Современные проблемы науки и образования*, 2.
5. Гуревич С.М. (1990) *Справочник по сварке цветных металлов*. Замков В.Н. (ред.). 2-е изд., перераб. и доп. Киев, Наукова думка.
6. Баранов А.В., Вайнерман А.Е., Чумакова И.В., Чернобаев С.П. (2004) Получение соединений сталей со сплавами титана сваркой плавлением. *Вопросы материаловедения*, 2, 108–125.
7. Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2013) Технологии PLAZER в инженерии поверхности и плазменной обработке материалов. *Сварщик*, 1, 1–8.
8. Коржик В.Н. (2017) Особенности получения покрытий сверхзвуковым электродуговым напылением. *Первый независимый научный вестник*, 20, 21–31.

## References

1. Rabkin, D.M., Ryabov, V.R., Gurevich, S.M. (1975) *Welding of dissimilar metals*. Moscow, Tekhnika [in Russian].
2. Sklyar, V.O. (2014) *Innovative and resource-saving technologies in metallurgy: Manual*. Donetsk, DonNTU [in Russian].
3. Chepurko, M.I., Ostrenko, V.Ya., Gluskin, N.Ya. et al. (1984) *Bimetallic materials*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
4. Sirotenko, L.D., Shlykov, E.S., Ablyaz, T.R. (2015) Application of bimetallic materials in mechanical engineering. Pt 1. *Modern problems of science and education*, 2 [in Russian].
5. Gurevich, S.M. (1990) *Reference book on welding of non-ferrous metals*. Ed. by V.N. Zamkov, 2<sup>nd</sup> ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Baranov, A.V., Vajnerman, A.E., Chumakova, I.V., Chernobaev, S.P. (2004) Producing of joints of steels with titanium alloys by fusion welding. *Voprosy Materialovedeniya*, 2, 108–125 [in Russian].
7. Korzhik, V.N., Korob, M.F. (2013) PLAZER technologies in surface engineering and plasma treatment of materials. *Svarshchik*, 1, 1–8 [in Russian].
8. Korzhik, V.N. (2017) Peculiarities of producing of coatings by supersonic electric arc spraying. *Pervyi Nezavisimyi Nauchnyi Vestnik*, 20, 21–31 [in Russian].

## FEATURES OF METALLURGICAL INTERACTION AT SURFACING A TITANIUM PLATE WITH A SPRAY-DEPOSITED LAYER BY STEEL WIRE

V.N. Korzhik<sup>1</sup>, A.A. Grinyuk<sup>1</sup>, A.A. Chaika<sup>1</sup>, D.V. Strogonov<sup>1</sup>, I.I. Tymofeeva<sup>2</sup>, M.A. Vasilkivska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>I.M. Frantsevich IPM of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanivskogo Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: post@ipms.kiev.ua

The possibility is considered of producing a steel-titanium joint which forms at complex spray-deposition of a layer of aluminium oxide and a layer of iron powder PZh-1 on titanium with subsequent deposition by a consumable electrode or plasma of a layer of steel using filler wire Zv-08G2S. A new combined method was developed for joining steel to titanium with deposition of protective layers of  $Al_2O_3$  and iron powder PZH-1 on titanium, with further deposition of a layer of filler wire Zv-08G2S by the plasma process. Ref. 8, Tabl. 2, Fig. 8.

*Key words:* plasma-arc spraying; surfacing; steel; titanium; aluminium oxide; interphase interaction; phase composition

Надійшла до редакції 21.07.2020