

## РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.4

**Г.К. Харченко**, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**Ю.В. Фальченко**, д-р техн. наук

**Л.В. Петрушинець**, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ $\gamma$ -TiAl

**Г.К. Харченко**, д-р техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**Ю.В. Фальченко**, д-р техн. наук

**Л.В. Петрушинець**, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

### ОСОБЕННОСТИ ДИФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ $\gamma$ -TiAl

**H.K. Kharchenko**, Doctor of Technical Sciences

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

**Yu.V. Falchenko**, Doctor of Technical Sciences

**L.V. Petrushynets**, PhD in Technical Sciences

Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### FEATURES OF DIFFUSION WELDING IN VACUUM OF INTERMETALLIC ALLOY BASED ON $\gamma$ -TiAl

*Розглянуто особливості поведінки багатошарових фольг при використанні їх як проміжних прошарків при дифузійному зварюванні у вакуумі. Запропонована модель утворення зварного з'єднання з використанням проміжного прошарку з багатошарової фольги.*

**Ключові слова:** дифузійне зварювання у вакуумі, сплав на основі  $\gamma$ -TiAl, багатошарові фольги Ti/Al, модель утворення зварного з'єднання.

*Рассмотрено особенности поведения многослойных фольг при использовании их в качестве промежуточных прослоек при диффузионной сварке в вакууме. Предложена модель образования сварного соединения с использованием промежуточного слоя из многослойной фольги.*

**Ключевые слова:** диффузная сварка в вакууме, сплав на основе  $\gamma$ -TiAl, многослойные фольги Ti/Al, модель образования сварного соединения.

*Behavior of multilayer foils using like intermediate layers in diffusion welding in vacuum was considered. Model of formation welded joint with the intermediate layer of the multilayer foil was proposed.*

**Key words:** diffusion welding in vacuum, alloy based on  $\gamma$ -TiAl, multilayer foil Ti/Al, model of formation welded joint.

**Постановка проблеми.** Сплави на основі  $\gamma$ -TiAl мають низьку пластичність навіть при 1000 °С (не більше 2 %), що обумовлює ускладнення пластичної деформації при контактних об'ємів, тобто відсутні умови для утворення якісного зварного з'єднання у твердій фазі.

У роботі використовували багатошарові фольги (БФ) Ti/Al, отримані методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі [1]. У вихідному стані фольги складаються з наночарів титану та алюмінію, що чергуються (рис. 1). БФ Ti/Al характеризуються тим, що при нагріванні в них відбувається реакція високотемпературного синтезу, що самопоширюється (ВСС), з виділенням тепла і формуванням інтерметалідів системи Ti–Al. Реакція ВСС супроводжується підвищенням температури на фронті горіння фольги до 1200 °С. Після ВСС у фользі спостерігається фрагментація інтерметаліду, що утворився, з формуванням субзеренної структури, при цьому розміри зерен визначаються розмірами шарів у фользі.

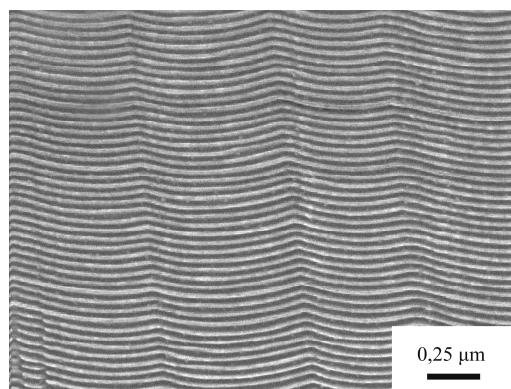


Рис. 1. Мікроструктура поперечного перерізу зразків фольги Ti/Al після осадження (темні смуги – Al, світлі – Ti)

У роботах [1-3] було запропоновано режим зварювання  $\gamma$ -TiAl: температура зварювання  $T_{зв} = 1200$  °С, тиск зварювання  $P_{зв} = 40$  МПа, час зварювання  $t_{зв} = 20$  хв з використанням проміжного прошарку у вигляді багатошарової фольги Ti/Al товщиною 20 мкм. Однак принципи вибору такого режиму, а також деформаційна поведінка БФ у процесі дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) в роботах [1-3] не розглядалась.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є вивчення особливостей формування зварних з'єднань сплаву на основі  $\gamma$ -TiAl при ДЗВ через багатошарові фольги Ti/Al.

**Виклад основного матеріалу.** Зразки, що зварювали, мали розміри 10x10x4 мм. Поверхні, що стикувалися, перед зварюванням шліфували на алмазному колі і знежирували ацетоном. На рис. 2 представлені графіки зміни міцності на зріз зварних з'єднань залежно від температури зварювання, часу зварювання і товщини проміжного прошарку. Металографічні дослідження та результати механічних випробувань показали, що оптимальним режимом є:  $T_{зв} = 1200$  °С,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв. У зоні зварювання утворюється прошарок інтерметаліду TiAl, що складається з дрібних зерен з середнім розміром 5-10 мкм. Згідно з [4] структура подібного роду володіє низькотемпературною надпластичністю, яка є результатом зсувного зміщення і розвороту зерен у процесі деформування прошарку з БФ. Таким чином, тільки локалізація пластичної деформації у прошарку з БФ може забезпечити утворення якісного зварного з'єднання  $\gamma$ -TiAl.



Рис. 2. Графіки впливу температури (а), часу зварювання (б) і товщини БФ Al/Ti на міцність зварних з'єднань

У роботі [5] встановлено, що в БФ Ti/Al при нагріванні в умовах розтягуючих навантажень, що постійно діють, відбувається пластична деформація. Спостерігаються низькотемпературний і високотемпературний інтервали інтенсивної пластичної деформації (рис. 3). Низькотемпературний інтервал пов'язують з трансформаційною надпластичністю, яка обумовлена фазовими перетвореннями з утворенням інтерметалідів. Високо-

температурний інтервал обумовлений значною зміною мікроструктури фольги, тобто утворенням мікрокристалічного інтерметаліду TiAl.

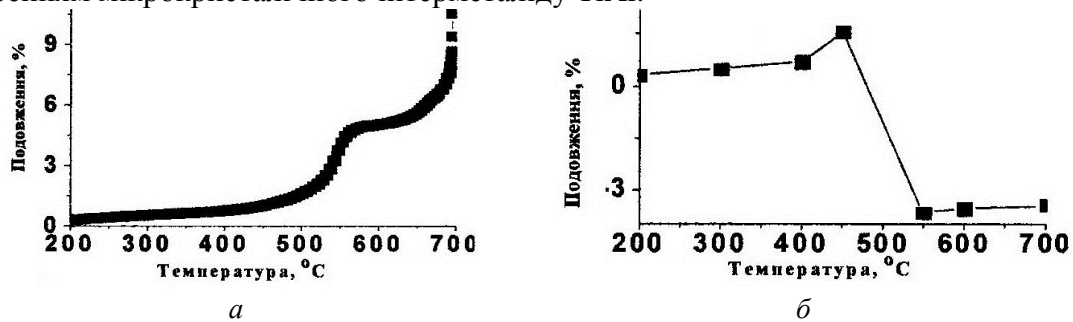


Рис. 3. Залежність ступеня деформації БФ Ti/Al в умовах постійно діючої розтягуючих навантажень від температури нагріву – експериментальні: Ti / Al (а), а також розраховані на основі об’ємних ефектів, що супроводжують фазові перетворення (б) [6]

Відомо, що інтенсивність видалення оксидних плівок з поверхонь, що стикаються, визначає можливість завершення першої стадії дифузійного зварювання, тобто утворення фізичного контакту між ними. Необхідно було вивчити вплив температури нагріву у вакуумі на відновлення оксидної плівки на поверхні  $\gamma$ -TiAl. Зразки алюмініду титану нагрівали у вакуумі до 800 °C протягом 5 хв, після чого їх окисляли на повітрі. Згідно з [6] оксидна плівка темно-сірого кольору на поверхні  $\gamma$ -TiAl складається з рутилу (TiO<sub>2</sub>) і  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Після окислення зразки в зістикованому вигляді нагрівали у вакуумній камері до температур 900, 1050 і 1200 °C протягом 20 хв. Зусилля стиснення становило 5 МПа. За допомогою енергодисперсійного аналізу встановили елементний склад на поверхні зразків. Показано, що нагрівання при 1200 °C зменшує вміст кисню у стику в 5 разів. Аналіз стану поверхні свідчить про те, що тільки після нагрівання до 1200 °C близько 90 % поверхні зразків займають ділянки схоплювання. Таким чином, при 1200 °C йде інтенсивне відновлення титаном оксидної плівки на  $\gamma$ -TiAl, що дає підстави вважати зазначену температуру як оптимальну для зварювання.

Структура БФ у вихідному складається зі стовпчастих кристалів. Поверхня БФ має куполоподібну будову (рис. 4). Висота куполів становить 5-10 нм при діаметрі зерна ~ 500 нм. Безсумнівно, що куполоподібний вихід зерен на поверхню багат шарових фольг дасть позитивний ефект при утворенні зварного з’єднання, оскільки на куполах при прикладанні зварювального тиску до БФ буде відбуватися локалізація пластичної деформації.

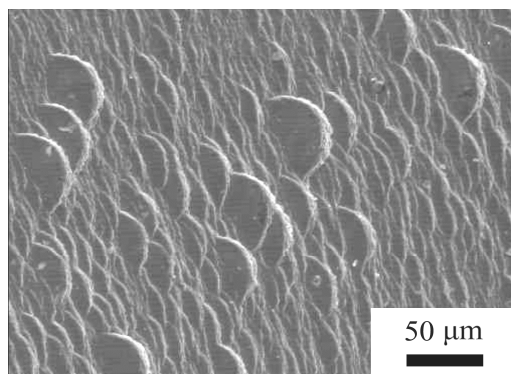


Рис. 4. Зовнішній вигляд поверхні фольги Ti/Al після витримки протягом 30 хвилин при температурі 600° C

Встановлено, що БФ змінює свої розміри у процесі нагрівання і зварювання. На початковій стадії ВСС у межах стовпчастих кристалів йде утворення протяжних пір (рис. 5). У процесі ВСС за рахунок утворення пір товщина БФ зростає на 30 % (рис. 6). При прикладанні тиску йде залякування пір і товщина фольги зменшується на 10 %

від початкової величини. Безумовно, що пористість багат шарової фольги обумовлює локалізацію пластичної деформації в зоні контакту, тобто розмір і структура БФ визначають величину деформації всього зварюваного вузла в цілому. Можна припустити, що при протіканні реакції ВСС у фользі Ti/Al подібно до прошарків з ультрадисперсних порошоків [7], відбувається підстроювання поверхні прошарку до мікрорельєфу матеріалів, які з'єднуються, що сприяє утворенню фізичного контакту.

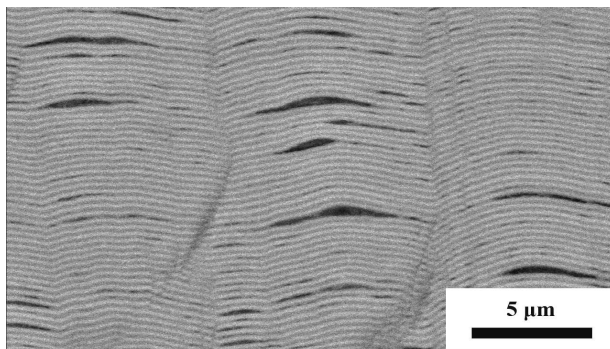


Рис. 5. Мікроструктура поперечного перерізу фольги Ti/Al після нагрівання до 300 °С

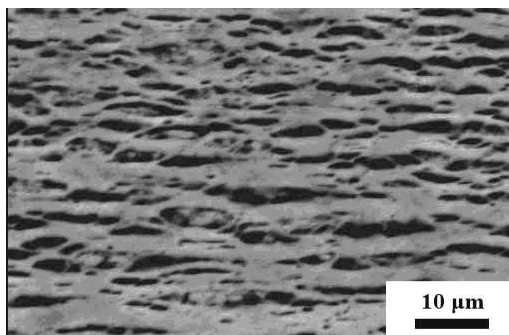


Рис. 6. Мікроструктура поперечного перерізу фольги Ti/Al після проходження реакції ВСС

Проведені дослідження дозволяють запропонувати модель утворення зварного з'єднання при використанні проміжної прошарку з БФ (рис. 7). У початковому стані БФ має шарувату структуру. При нагріванні до 150-350 °С,  $P = 4$  МПа в БФ проходять фазові перетворення з утворенням інтерметалідів. При нагріванні до 350-600 °С,  $P = 4$  МПа у БФ відбувається реакція ВСС з утворенням пористої структури і трансформацією шаруватої структури у дрібнокристалічну. На етапі нагрівання до 600-1200 °С при  $P = 40$  МПа у стику йде пластична деформація БФ, утворюється фізичний контакт, заліковуються пори, активізуються дифузійні процеси і рекристалізація з утворенням між БФ і  $\gamma$ -TiAl загальних зерен (рис. 8).

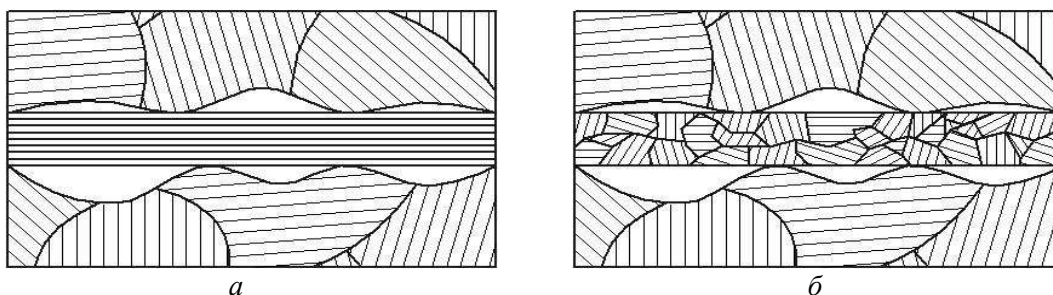


Рис. 7. Модель утворення зварного з'єднання із застосуванням БФ Ti/Al:  
 а – вихідний стан; б – етап фазових перетворень; в – етап проходження реакції ВСС у прошарку;  
 г – етап утворення зварного з'єднання

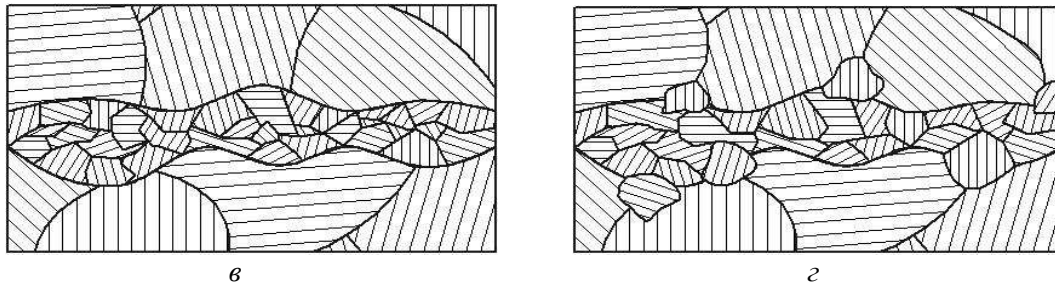
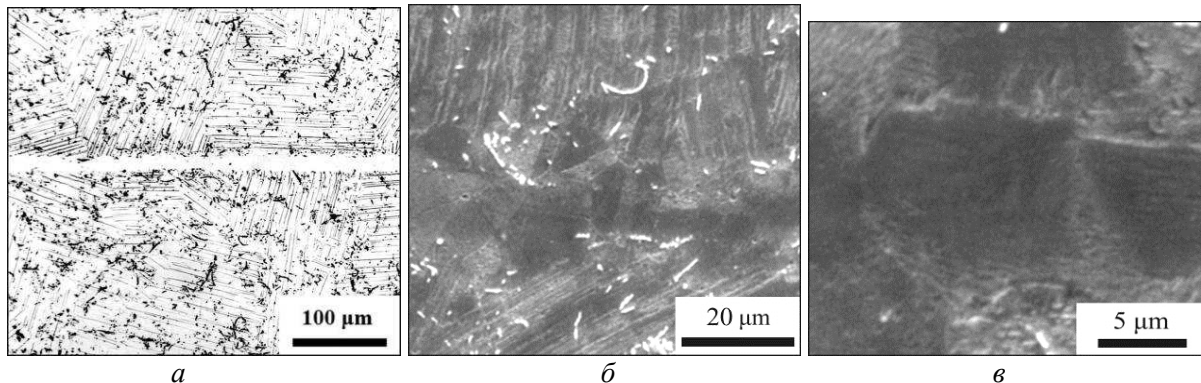


Рис. 7. Закінчення (див. також с. 144)

Рис. 8. Мікроструктура зони з'єднання  $\gamma$ -TiAl + БФ Al/Ti +  $\gamma$ -TiAl, отриманого на оптимальному режимі зварювання: а – оптична металографія; б, в – растрова електронна металографія

**Висновки.** Застосування БФ при дифузійному зварюванні матеріалів, що важко деформуються, дозволяє локалізувати пластичну деформацію у приконтактних об'ємах матеріалів, що з'єднуються.

#### Список використаних джерел

1. Многослойные фольги Ti/Al: методы получения, свойства и применение при сварке / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, Т. В. Мельниченко, Г. К. Харченко и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 1. – С. 30-37.
2. Получение неразъемных соединений сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко, Г. К. Харченко и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С. 17-21.
3. Диффузионная сварка в вакууме сплава на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием нанослойных прослоек / Г. К. Харченко, А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Н. Муравейник и др. // Автоматическая сварка. – 2011. – № 3. – С. 7-11.
4. Лутфулин Р. Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов / Р. Я. Лутфулин // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1. – С. 59-64.
5. Шишкін А. Є. Реакційна здатність багатошарових фольг та їхня деформаційна поведінка при нагріванні в умовах постійно діючих навантажень : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Є. Шишкін. – К. : ІМФ НАНУ, 2012. – 23 с.
6. Чуприна В. Г. Окисление интерметаллида TiAl / В. Г. Чуприна, И. М. Шаля // Порошковая металлургия. – 2007. – № 11/12. – С. 80-87.
7. Люшинский А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. В. Люшинский. – М. : Академия, 2006. – 208 с.