



УДК 621.791.4

# ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ $\gamma$ -TiAl С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСЛОЙНОЙ ПРОСЛОЙКИ Ti/Al СПОСОБОМ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ

**А. И. УСТИНОВ**, д-р физ.-мат. наук, **Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук,  
чл.-кор. НАН Украины **А. Я. ИЩЕНКО**, **Г. К. ХАРЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, **А. Н. МУРАВЕЙНИК**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучена возможность получения сварных соединений сплава на основе  $\gamma$ -TiAl с помощью нанослойной прослойки Ti/Al. Показано, что применение нанослойной промежуточной прослойки при диффузионной сварке в вакууме позволяет формировать качественные соединения. Изучены особенности структуры зоны соединения.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме, алюминид титана, структура, зона соединения, нанослойная прослойка

Сплавы на основе  $\gamma$ -TiAl рассматриваются как перспективные материалы для изготовления конструктивных элементов узлов авиакосмической техники, работающих при повышенной температуре. Преимуществами таких сплавов по сравнению с другими жаропрочными материалами являются главным образом их низкая ( $3,8...4,0 \text{ г/см}^3$ ) плотность и высокая жаростойкость [1].

Перспектива использования сплавов  $\gamma$ -TiAl при создании конструктивных элементов стимулировала исследования и разработки в области развития технологии получения неразъемных соединений этих сплавов. Была рассмотрена возможность получения неразъемных соединений плавлением [2] и диффузионной сваркой [3–7].

Применение традиционных способов сварки, основанных на локальном плавлении материала в зоне соединения, показало, что качество полученного сварного соединения существенно зависит от фазовых превращений в зоне термического влияния (ЗТВ). При отклонении режима сварки от оптимального в зоне соединения происходят фазовые превращения, сопровождающиеся объемными эффектами, что приводит к возникновению напряжений в ЗТВ и, как результат, вблизи нее образуются трещины [2]. Во избежание этого сварку необходимо выполнять на строго регламентированных режимах.

Перспективным представляется использование диффузионной сварки в вакууме. Возможные технологические варианты этого способа сварки применительно к сварке алюминидов титана рас-

смотрены в [3–7]. В работе [3] представлены результаты диффузионной сварки в вакууме сплава  $\gamma$ -TiAl (49 % Ti, 47 % Al и по 4 % Cr, Mn, Nb, Si, V), полученного способом прецизионного литья и горячего прессования с последующим гомогенизирующим отжигом на следующем режиме: температура сварки  $T = 950...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , время сварки  $\tau = 1...3 \text{ ч}$ , давление  $P = 20...40 \text{ МПа}$ , термообработка при  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , 30 мин. Авторы определили оптимальный режим сварки:  $T = 1000...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3 \text{ ч}$ ,  $P = 20...40 \text{ МПа}$ ; термообработка обеспечивает формирование ламельной структуры в области сварного шва. В работе [4] исследована возможность сварки давлением сплава Ti–Al–Nb на основе  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al ( $T = 900, 1000 \text{ и } 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 4...5 \text{ мин}$ ,  $P = 200...300 \text{ МПа}$ ). Соединения, полученные при  $T = 1000...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , равноценны по прочности с основным металлом ( $\sigma_b = 800...820 \text{ МПа}$ ).

Известно, что дополнительную активацию свариваемых поверхностей можно осуществить при использовании прослоек пластичных либо состоящих из двух фольг на основе различных элементов, в которых при повышении температуры развиваются процессы контактного плавления. Так, в работе [5] изучена возможность использования при сварке давлением сплава  $\gamma$ -TiAl (60,947 % Ti, 31,152 % Al, 4,65 % Nb, 2,73 % Mn, 0,31 % V) прослоек алюминия и титана толщиной соответственно 0,15 и 0,20 мм. Сварку выполняли на режиме  $750...850 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 10...20 \text{ мин}$ ,  $P = 100 \text{ и } 300 \text{ МПа}$  с последующим стабилизирующим отжигом при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 50 ч. Авторы отмечают, что использование алюминиевых прослоек приводит к образованию в зоне соединения дефектов —



микропустот и трещин. В случае использования титановых прослоек формируется зона соединения, отличающаяся высокой прочностью, в ней имеет место значительная химическая и фазовая неоднородность.

В работах [6, 7] показано, что осаждение тонких нанослойных покрытий Ti/Al на соединяемые поверхности образцов из сплава  $\gamma$ -TiAl обеспечивает при диффузионной сварке в вакууме ( $T = 1100^\circ\text{C}$ ) получение в зоне соединения однородной структуры. Авторы пришли к заключению, что формирование прочного сварного соединения при  $700\dots 1100^\circ\text{C}$  связано с динамической рекристаллизацией сплава  $\gamma$ -TiAl, что способствует измельчению его структуры и прохождению пластической деформации.

Вместе с тем процесс осаждения таких покрытий на соединяемые поверхности деталей в ряде случаев имеет определенные технологические трудности. Технология получения неразъемных соединений упрощается при использовании нанослойных материалов в виде фольги. Такой подход, например, реализован нами при сварке композитных материалов на основе Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью нанослойной фольги Ni/Al [8]. Метод электронно-лучевого осаждения позволяет получать нанослойную фольгу за достаточно короткий период времени благодаря высокой (до 100 нм/с) скорости процесса осаждения. Проведены исследования условий формирования неразъемных соединений с помощью нанослойных фольг Ti/Al, используемых в качестве промежуточных прослоек.

Нанослойную фольгу Ti/Al получали путем послойного электронно-лучевого осаждения элементов на горизонтально вращающуюся подложку по методике, описанной в ряде работ (см., например, [9]). Схема процесса формирования фольги представлена в работе [10]. Для осуществления послойного осаждения элементов вакуумную ка-

меру разделяли вертикально расположенным сплошным экраном на две равные части, в каждой из которых были установлены медные водоохлаждаемые тигли, в одном находился слиток титана, в другом — алюминия. Подложку закрепляли на вертикальном валу, размещенном над разделительным экраном. Электронно-лучевой пушкой осуществляли нагрев подложки до заданной температуры, которую контролировали в процессе осаждения с помощью термопары. Предварительно на подложку был нанесен слой CaF<sub>2</sub>, что способствовало отделению прослойки от подложки. Затем с помощью электронно-лучевых пушек на поверхностях слитков создавали расплавленную ванну, из которой происходило испарение элементов. Вращение подложки и наличие разделительного экрана позволяли осуществлять последовательное осаждение слоев металла. Соотношение толщины этих слоев определялось соотношением интенсивности испарения слитков, а их суммарная толщина варьировалась в зависимости от скорости вращения подложки. Общая толщина прослойки при заданной интенсивности испарения элементов зависела от длительности процесса осаждения.

Объектом исследований был выбран сплав Ti-48 ат. % Al с добавками ниобия и марганца. Этот сплав относится к группе титановых интерметаллидов, имеющих двухфазное состояние ( $\alpha_2 + \gamma$ ), где  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al и  $\gamma$ -TiAl (далее TiAl).

Сварку TiAl выполняли в вакуумной камере, снабженной системой статического нагружения образцов и их нагрева (рис. 1). В качестве источника нагрева использовали электронно-лучевую пушку. Параметры процесса сварки варьировали в следующих пределах:  $T = 900\dots 1200^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 5\dots 25$  мин,  $P = 10\dots 70$  МПа. Давление в рабочей камере поддерживали на уровне  $1,33 \cdot 10^{-3}$  МПа.

Поверхности образцов перед сваркой шлифовали на алмазном круге, а затем обезжиривали. Подготовленные образцы размером  $10 \times 10 \times 4$  мм вместе с промежуточной прослойкой помещали в вакуумную камеру. Равномерный нагрев обеспечивали благодаря электронно-лучевой пушке кольцевой формы, установленной на уровне стыка, корректировку нагрева в процессе сварки осуществляли путем перемещения нагревателя вдоль сборки свариваемых образцов. Температуру сварки контролировали с помощью термопары.

Для проведения металлографического анализа образцы сварных соединений готовили по стандартной методике на шлифовально-полировальном станке «Abramin» (фирма «Struers»). Структуру и химический состав конденсатов анализировали с помощью оптического микроскопа «Nephrot» и сканирующего микроскопа «CamScan», оснащенного энергодисперсионной системой ло-

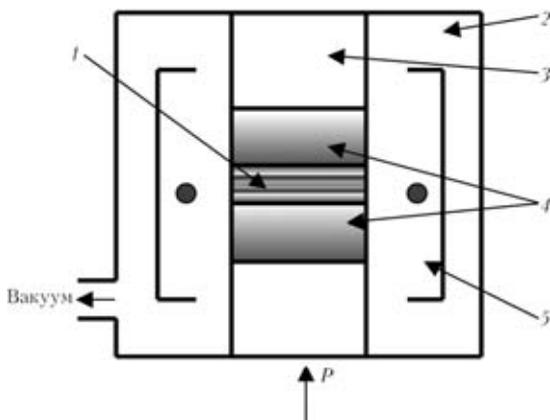


Рис. 1. Схема установки для диффузионной сварки в вакууме: 1 — нанослойная прослойка; 2 — вакуумная камера; 3 — прижимной шток; 4 — свариваемые образцы; 5 — электронно-лучевая пушка

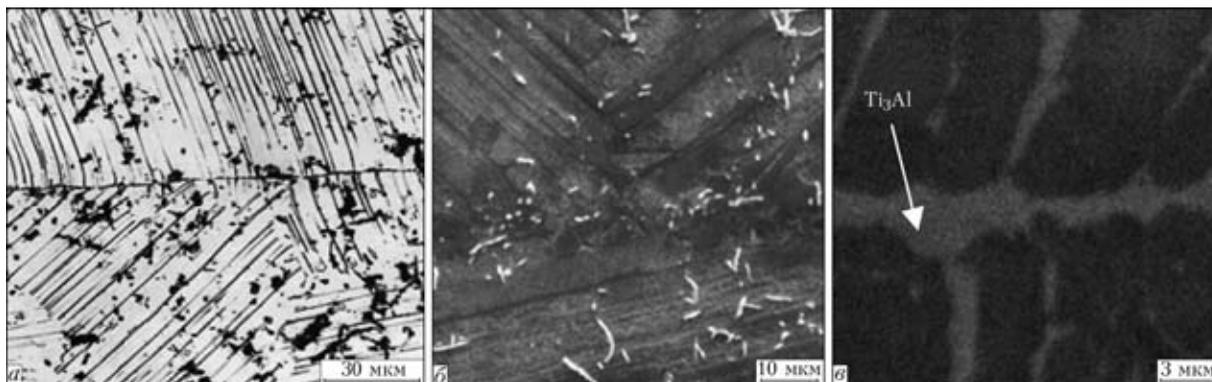


Рис. 2. Микроструктура зоны соединения TiAl, полученного диффузионной сваркой в вакууме без прослойки: а-в — см. в тексте

кального анализа «Energy 200». Для выявления структуры металла сварного шва проводили химическое травление образцов. Измерения микротвердости конденсатов осуществляли микротвердомерной приставкой к оптическому микроскопу «Polyvar-Met» при нагрузке 0,098...0,196 Н по методу Виккерса. Структуру нанослойной фольги на поперечных срезах анализировали с помощью просвечивающего электронного микроскопа «Hitachi Н-800» при ускоряющем напряжении 200 кВ. Поперечное сечение тонкой фольги сначала подготавливали способом механического утонения, а затем полировали на установке «Gatan 656» с последующим утонением и бомбардировкой поверхности под углом 3° ионами аргона с энергией 5 кэВ при токе ионной пушки 20 мкА на установке PIPS 691.

Соединения TiAl получены диффузионной сваркой в вакууме без прослойки при  $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 70\text{ МПа}$  с последующей выдержкой в течение 20 мин. Микроструктура зоны соединения представлена на рис. 2. На рисунке видно, что в указанной зоне выявлена граница раздела (рис. 2, а), при этом поры в соединении отсутствуют (рис. 2, б). При анализе структуры в режиме фазового контраста обнаружено, что граница раздела представляет собой прослойку интерметаллида, состав которого, по данным локального химического анализа, близок к составу интерметаллида  $\text{Ti}_3\text{Al}$ . Наличие хрупкой интерметаллидной прослойки снижает прочность сварного соединения, что приводит к деградации его эксплуатационных характеристик.

Для диффузионной сварки образцов интерметаллида TiAl в работе использовали нанослойную фольгу Ti-52 ат. % Al толщиной 20 мкм с периодом чередования слоев (титана и алюминия) 50 нм. На микроструктуре ее поперечного сечения (рис. 3) видно, что она разбита на отдельные зерна. В пределах одного зерна наблюдается полосчатый контраст, который соответствует чередованию слоев титана и алюминия. Для определения характеристик слоистой структуры зерен проведены электронно-микроскопические исследова-

ния на просвет. На рис. 4 представлены микроструктура и микродифракционная картина поперечного сечения нанослойной фольги Ti/Al. Об отсутствии перемешивания элементов свидетельствует микродифракция электронов исследуемого участка (рис. 4, б). Между слоями имеют место определенные ориентационные соотношения, характерные для слоистых материалов. Из светловых изображений (рис. 4, а) видно, что период чередования слоев титана и алюминия составляет 50 нм.

Закономерности диффузионных процессов, проходящих в нанослойной фольге при ее нагреве, проанализированы в работе [9]. Установлено, что нагрев способствует их интенсивному развитию, что приводит к формированию гетерофазной структуры, состоящей из смеси интерметаллидов TiAl и  $\text{Ti}_3\text{Al}$ . На этом основании предположили, что в процессе диффузионной сварки титановых интерметаллидов в фольге будут проходить фазовые превращения, которые обеспечат формирование в зоне соединения структуры, подобной основному металлу.

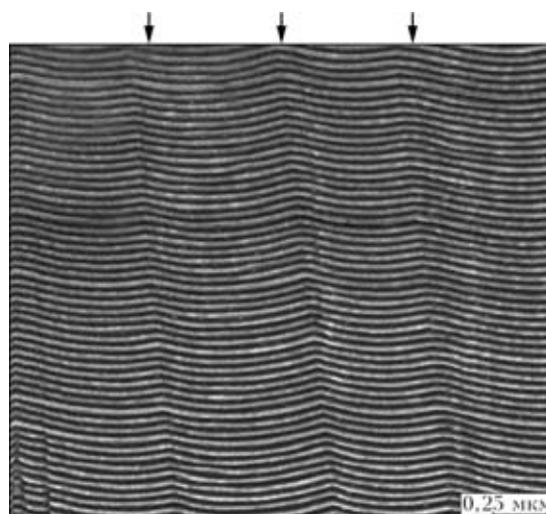


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения нанослойной фольги в исходном состоянии: светлые слои соответствуют титану, темные — алюминию; стрелками указаны границы зерен

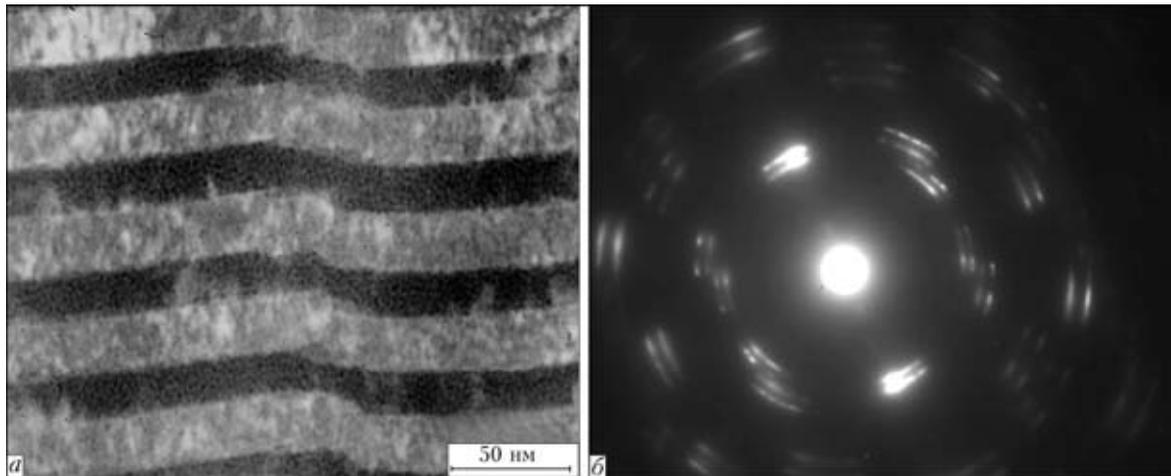


Рис. 4. Микроструктура (а) и микродифракционная картина (б) поперечного сечения нанослойной прослойки

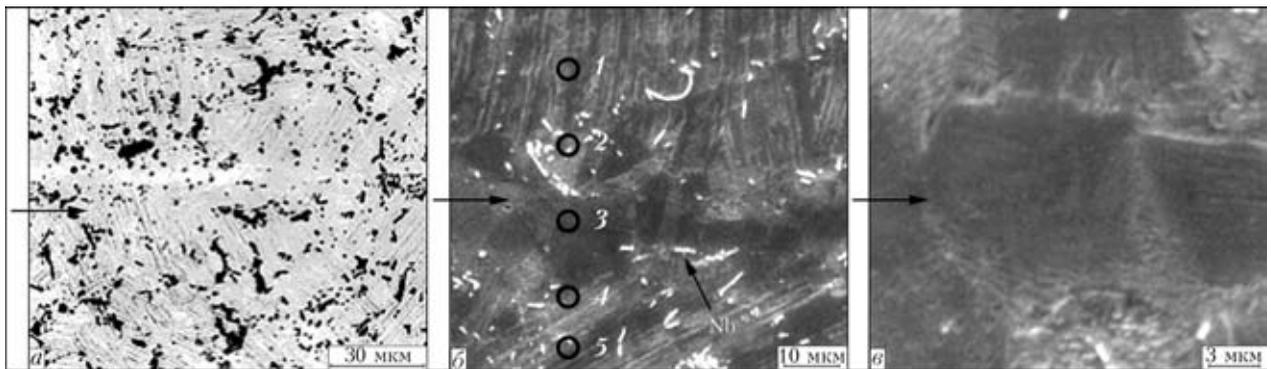


Рис. 5. Микроструктура зоны соединения образцов интерметаллида TiAl, полученного диффузионной сваркой в вакууме с использованием нанослойной фольги Ti/Al: а–в — см. в тексте; стрелками указано место сварки; цифрами — точки, в которых проведены исследования локального химического состава и микротвердости; результаты этих измерений представлены в таблице

Для определения условий формирования соединений с использованием нанослойных фольг проведены исследования влияния параметров режима диффузионной сварки (давления, температуры нагрева и времени выдержки) на качество сварных соединений. Выявлено, что при уменьшении температуры сварки (менее 1000 °С) в зоне соединения возникают несплошности, которые значительно снижают его механическую прочность. Микроструктура зоны сварного соединения, полученного на оптимальном режиме сварки ( $T = 1200\text{ °C}$ ,  $\tau = 20\text{ мин}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ), представлена на рис. 5. На рис. 5, а видно, что в зоне соединения присутствует слаборазличимая прослойка, состав которой (49,4 Al; 49,8 Ti; 0,8 Mn), по данным локального химического анализа, близок к исходному интерметаллиду.

Прослойка имеет однородную структуру (рис. 5, б) и состоит из равноосных зерен размером до 10 мкм (рис. 5, в), в которых различима ламельная структура, характерная для исходного интерметаллида. Отсутствие пор и трещин как в зоне соединения, так и на границе со свариваемыми образцами свидетельствует о высоком качестве полученного сварного соединения. Следует

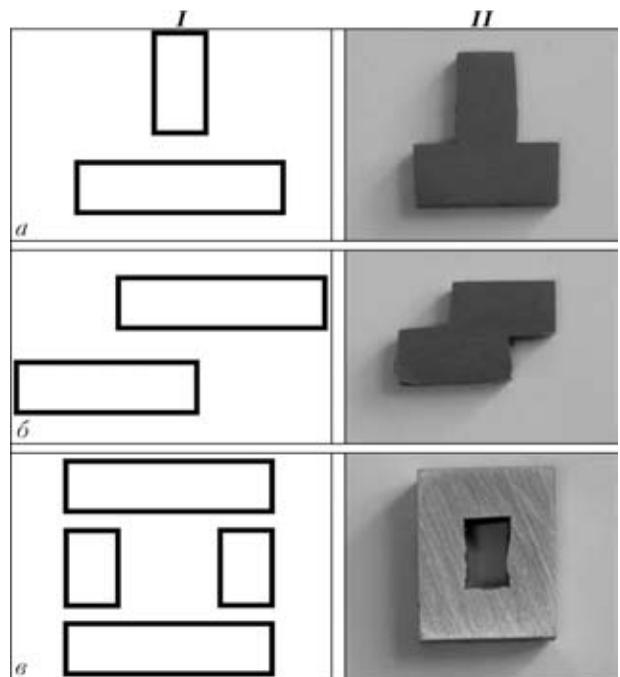


Рис. 6. Схема сборки образцов I и общий вид II сварных соединений сплава TiAl таврового (а), нахлесточного (б) и коробчатого типов (в), полученных с использованием нанослойной прослойки Ti/Al



**Химический состав (ат. %) и микротвердость HV различных участков зоны сварного соединения**

Исследуемые точки зоны соединения (см. рис. 5, б)	Al	Ti	Mn	Nb	HV, ГПа
1	43,9	52,9	1,3	1,9	4,6
2	47,3	50,1	0,9	1,7	4,8
3	49,4	49,8	0,8	—	4,0
4	47,4	49,9	1,0	1,7	4,3
5	44,1	52,6	1,5	1,8	4,4

отметить, что при указанном выше режиме сварки деградация структуры свариваемого интерметаллида не происходит. Распределение элементов в зоне соединения и микротвердость разных участков зоны сварки приведены в таблице. Из рис. 5, б и таблицы видно, что в точке 3 присутствует марганец и отсутствует ниобий. Согласно металлографическому и локальному химическому анализу, частицы ниобия скапливаются на границе прослойка–интерметаллид. Присутствие марганца в прослойке свидетельствует о протекании диффузионных процессов в зоне соединения при прохождении реакции твердофазного синтеза, инициированной в нанослойной прослойке при сварке.

Интенсивное развитие диффузионных процессов в зоне соединения вследствие применения нанослойных прослоек способствует получению качественных сварных соединений. На рис. 6 для примера представлен общий вид образцов сварного соединения таврового, нахлесточного и коробчатого типов.

Таким образом, в процессе диффузионной сварки образцов интерметаллида с использованием нанослойной прослойки Ti/Al в зоне соединения формируется интерметаллид, состав

которого соответствуют исходному интерметаллиду TiAl (таблица). Такие изменения состава и структуры металла в зоне соединения свидетельствуют о высокой диффузионной подвижности компонентов и могут быть обусловлены процессами тепловыделения, сопровождающими твердофазные реакции, инициированные в нанослойной фольге нагревом [9].

1. *Lasalmonie A.* Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines? // *Intermetallics*. — 2006. — **14**. — P. 1123–1129.
2. *Chaturvedi M. C., Xu Q., Richards N. L.* Development of crack-free welds in a TiAl-based alloy // *J. Materials of Processing Techn.* — 2001. — **118**. — P. 174–178.
3. *Cam G., Bohm K.-H., Kocak M.* Diffusionschweissen feingegossener Titanaluminide // *Schweissen und Schneiden*. — 1999. — № 8. — S. 470–475.
4. *Особенности структурных изменений жаропрочного сплава на основе Ti<sub>3</sub>Al при сварке давлением / В. Н. Замков, Л. И. Маркашова, Л. С. Киреев, И. К. Тяпко // Автомат. сварка.* — 1992. — № 9/10. — С. 13–16.
5. *Сварка давлением интерметаллидного сплава γ-TiAl / А. Н. Юштин, В. Н. Замков, В. К. Сабокарь, П. Н. Чвертко // Там же.* — 2001. — № 1. — С. 33–37.
6. *Solid-state diffusion bonding of γ-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers / L. I. Duarte, A. S. Ramos, M. F. Vieira et al. // Intermetallics.* — 2006. — № 14. — P. 1151–1156.
7. *Nanometric multilayers: A new approach for joining TiAl / A. S. Ramos, M. F. Vieira, L. I. Duarte et al. // Ibid.* — 2006. — № 14. — P. 1157–1162.
8. *Диффузионная сварка микродисперсного композита AlMg5 + 27 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автомат. сварка.* — 2007. — № 7. — С. 5–9.
9. *Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко, А. Е. Шишкин // Соврем. электрометаллургия.* — 2008. — № 2. — С. 21–28.
10. *Нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов сварных изделий для аэрокосмической техники // Автомат. сварка.* — 2008. — № 12. — С. 5–12.

The possibility of producing diffusion bonds on the γ-TiAl-based alloy by using the nanolayered Ti/Al foil has been studied. It is shown that utilisation of the nanolayered foil as an intermediate element allows formation of sound bonds on the Ti/Al-based alloys in heating to a temperature of about 1000...1200 °C and pressure of 10 MPa. Peculiarities of microstructure of the bond zone have been studied.

Поступила в редакцию 17.06.2008