



# ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСЛОЙНЫХ АЛЮМИНИЕВО-ТИТАНОВЫХ ФОЛГ

**В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. И. ШВЕЦ**, кандидаты техн. наук,

**А. Г. САХАЦКИЙ**, **А. А. НАКОНЕЧНЫЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности и перспективы применения контактной сварки алюминидов титана. Показано, что использование нанослойных фольг системы Ti–Al в качестве закладных элементов позволяет обеспечить однородность нагрева изделия, улучшить формирование и свойства соединений.

*Ключевые слова:* контактная сварка сопротивлением, алюминид титана, наноструктурная фольга, микроструктура, высококонцентрированный нагрев, зона термического влияния, околошовная зона

Интерметаллидные сплавы способны сочетать в себе уникальные свойства металлических материалов и химических соединений, что в последнее время используется в работах по разработке новых конструкционных материалов, обеспечивающих работоспособность изделий в экстремальных условиях. Наибольшее количество работ посвящено созданию интерметаллидных сплавов на основе алюминидов титана, которые в температурном интервале 650...850 °С превосходят применяемые жаропрочные материалы на основе титана, железа, никеля по удельной жаропрочности, удельному модулю упругости, характеризуются высокой жаростойкостью и склонностью к возгоранию (таблица). Эти сплавы эффективно используются как материал для деталей газотурбинных двигателей, обшивки летательных аппаратов, деталей силового набора изделий авиакосмической и других отраслей техники [1].

Основным недостатком алюминидов титана является хрупкость при комнатных температурах и связанные с этим трудности его обработки.

Перспективы использования интерметаллидных сплавов на основе алюминидов титана ограничены отсутствием надежных способов соединения между собой и другими конструкционными материалами.

Диффузионной сваркой в температурном интервале 1000...1100 °С с выдержкой около 3 ч под давлением 20...40 МПа получены бездефектные соединения, однако прочностные характеристики их значительно уступают таковым основного металла [2]. Соединения, полученные электронно-лучевой сваркой, склонны к растрескиванию, развивающемуся от линии сплавления [3].

При прессовой сварке [4] в вакуумной камере и температуре 750...850 °С прочность крайне низкая из-за строчечных выделений по линии соединения. При использовании в качестве прослойки фольги алюминия в шве возникают дефекты в виде микропустот и трещин, которые также резко снижают прочность. Фольга титана позволяет получать бездефектные соединения высокой прочности, однако при этом в шве формируется слой фазы  $\alpha_2$ (TiAl), который не отвечает требованиям жаропрочности.

В отличие от прессовой контактная стыковая сварка сопротивлением обеспечивает локальное высокоскоростное введение тепла и локальную деформацию [5]. Этот способ сварки представляется перспективным для соединения тугоплавких материалов с низкой пластичностью, таких как сплавы на основе алюминидов титана. Учитывая опыт предыдущих разработок по контактной стыковой сварке алюминиевых сплавов с использованием в качестве закладных элементов нанослойных фольг системы Al–Cu и Al–Ni [6], сварку сплавов на основе алюминидов титана предложено проводить с помощью нанослойных фольг.

Наноструктурные фольги разработаны и изготавливаются в ИЭС им. Е. О. Патона способом электронно-лучевого испарения и последующей конденсации компонентов. В данной работе использовали фольги, представляющие собой мно-

Свойства алюминидов титана

Интерметаллид	$E$ , ГПа	$\delta_{20}$ , %	$T_{пл}$ , °С	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T_p$ , °С
Ti <sub>3</sub> Al	141	2...5	1600	4,20	815
TiAl	180	1...2	1460	3,91	1040
Ti <sub>2</sub> NbAl	130	3...5	—	6,90	800

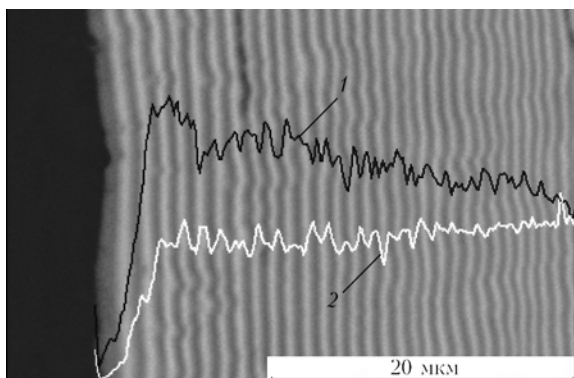


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 2000$ ) и микрораспределение титана (1) и алюминия (2) в фольге системы Ti–Al. Колебания содержания Al, мас. %: 44,23...54,99; Ti, мас. %: 45,01...52,84

гослойную композицию из алюминия и титана, средний состав которых соответствует стехиометрическому составу  $\gamma$ -TiAl фазы системы Ti–Al. Микроструктура и распределение титана и алюминия в фольге представлены на рис. 1. Нагрев такой фольги до температуры примерно 300 °C приводит к взаимодействию титана с алюминием с образованием интерметаллида [7]. Реакция взаимодействия развивается с большой скоростью и сопровождается выделением тепла: фольга разогревается до «красного каления».

В экспериментах по сварке использовали сплав Ti–47Al–1,5Cr–2Nb (ат. %), изготовленный электронно-лучевой плавкой в ИЭС им. Е. О. Патона.

Сварку проводили на специализированной стыкосварочной машине K-766 (рис. 2). Особенность этой установки заключается в отсутствии общего массивного корпуса и сбалансированности подвижной колонны, усилие смещения которой составляет 0,5...0,7 Н. Это обеспечивает эффективную работу механизма передачи давления, что особенно важно на стадии нагрева сопротивлением с использованием фольг.

Металлографические исследования и анализ химической неоднородности соединений проводили на оптическом микроскопе «Неофот-32» и растровом электронном микроскопе JSM-840 с микроанализатором Link-systems.

Прочностные свойства соединений оценивали по анализу распределения микротвердости, измеряемой на твердомере фирмы «LECO», и по механическим испытаниям на растяжение.

Исследования проводили на модельных образцах размером 15×15×110 мм. Параметры предварительно подобранного режима сварки следующие: давление при нагреве 1,6...2,0 МПа, давление при

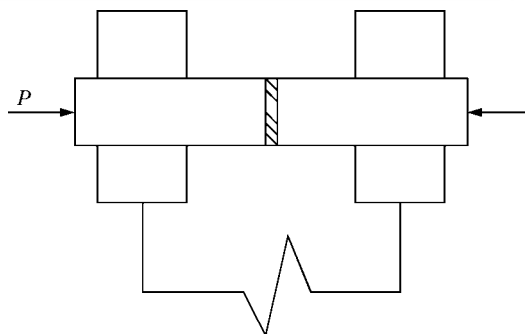


Рис. 2. Схема контактной стыковой сварки сопротивлением интерметаллидного сплава Ti–47Al–1,5Cr–2Nb с использованием фольги (заштрихованная часть)

осадке 40,0...45,0 МПа, время сварки 2,0...2,5 с. Выполнена как прямая сварка образцов, так и через фольгу толщиной 100 и 160 мкм.

В начале провели контактную сварку интерметаллида без использования наноструктурных фольг по классической технологии. Исследование макроструктуры полученных сварных соединений показало наличие микро- и макротрещин в шве, металле ЗТВ и в прилегающем к ней основном металле (рис. 3, б). Механическая обработка этих сварных соединений при изготовлении образцов для механических испытаний привела к их разрушению.

При контактной сварке с использованием нанослойных фольг наблюдается интенсивное выделение тепла в зоне контакта, благодаря чему время сварки уменьшается в среднем на 0,5...0,7 с по сравнению с обычной сваркой. Лучшие результаты получены при использовании фольги толщиной 60...100 мкм.

Металлографические исследования показали, что соединения, полученные с применением фольг, имеют стабильную макроструктуру (рис. 3, а).

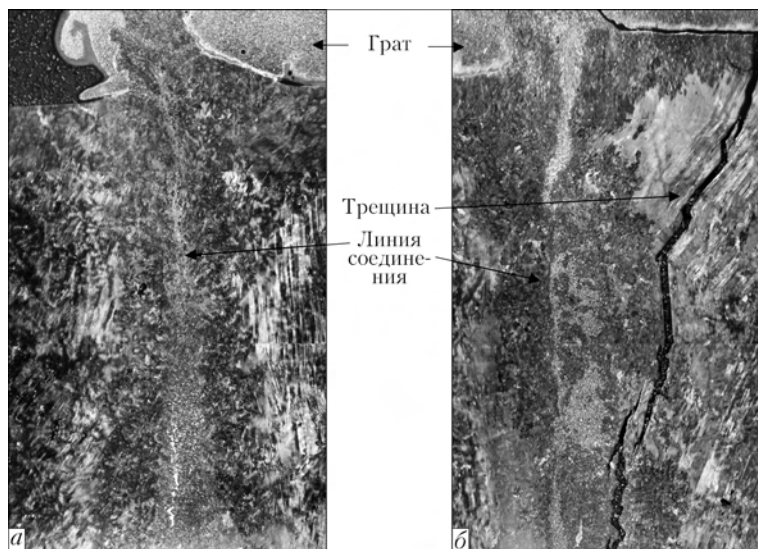


Рис. 3. Макроструктура ( $\times 25$ ) соединений интерметаллидного сплава Ti–47Al–1,5Cr–2Nb, полученных контактной стыковой сваркой с использованием фольги системы Ti–Al (а) и без использования нанослойной фольги (б)

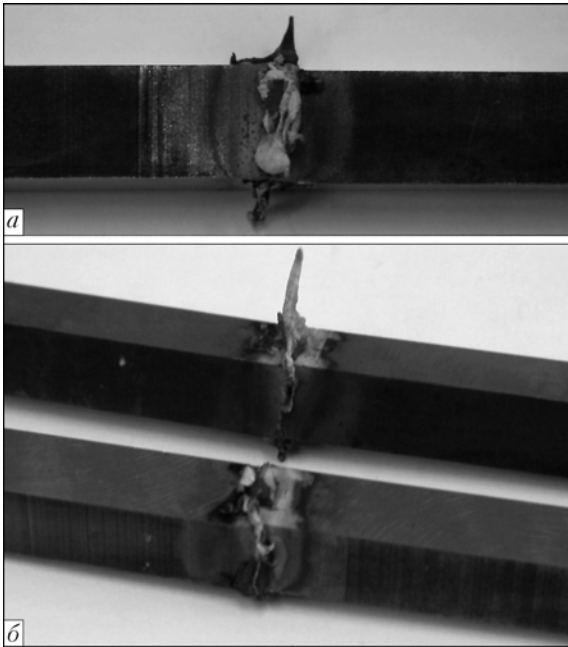


Рис. 4. Образцы соединений интерметаллидного сплава Ti-47Al-1,5Cr-2Nb, полученных контактной стыковой сваркой без использования фольги (а) и с использованием нанослойной фольги системы Ti-Al (б)

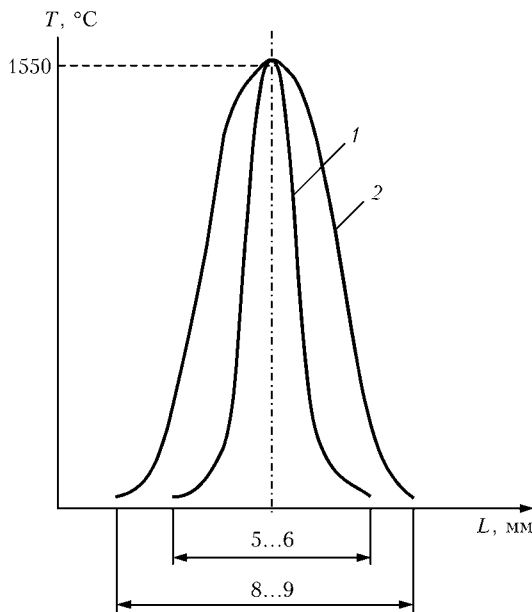


Рис. 5. Распределение температур при контактной стыковой сварке интерметаллидного сплава Ti-47Al-1,5Cr-2Nb с фольгой (1) и без фольги (2)

Визуальный контроль образцов (рис. 4) показал, что при сварке с использованием фольги ЗТВ и объем грата уменьшаются. Из анализа макроструктуры получено представление о распределении температур при сварке. Как видно из рис. 5, использование фольги обеспечивает более высококонцентрированный нагрев.

Сплав Ti-47Al-1,5Cr-2Nb имеет преимущественно ламелярную структуру, представляющую

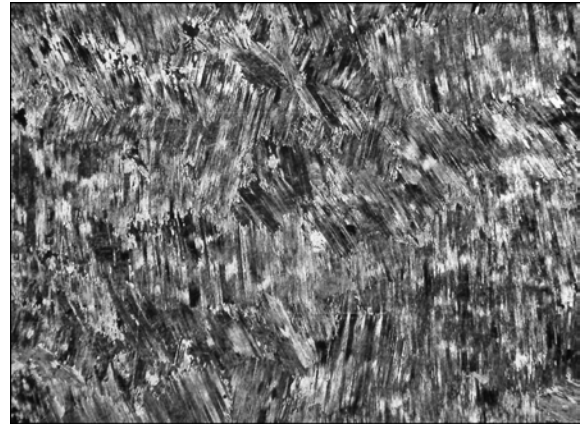


Рис. 6. Микроструктура (X100) интерметаллидного сплава Ti-47Al-1,5Cr-2Nb

собой чередующиеся пластины  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al фаз (рис. 6). Встречаются глобулярные зерна  $\gamma$ -фазы размером 100...150 мкм.

Сварное соединение, полученное с использованием фольги, отличается четко выраженным строением ЗТВ (см. рис. 3, а). На границе с основным металлом ламелярная структура становится более светлой (рис. 7, участок 1). По-видимому, это вызвано частичным растворением темнотравящейся  $\alpha_2$ -фазы. Далее следует слой с измельченной ламелярной структурой (рис. 7, участок 2). По линии соединения формируется полоса с измельченной равноосной структурой: зерна  $\gamma$ -фазы, окантованные выделениями  $\alpha_2$ -фазы (рис. 7, участок 3).

Продукты реакции взаимодействия в фольге оптически обнаружены не были. ЗТВ прямого соединения включает те же структурные составляющие, однако расположение их бессистемно (см. рис. 3, б). Очевидно, это связано с температурными условиями сварки — неоднородностью температурного поля по длине соединения. Термические напряжения, возникающие при этом, могут быть причиной образования трещин в металле ЗТВ.

Анализ распределения твердости в соединении, полученном с использованием фольги (рис. 7), показал, что на участке с измельченной ламелярной структурой микротвердость возрастает по сравнению с микротвердостью интерметаллидного сплава от HV 0,5-2500 МПа до HV 0,5-3500...4500 МПа. На участке с измельченной равноосной структурой твердость снижается и составляет примерно HV 0,5-3000 МПа.

Механические испытания соединений на растяжение проводили на цилиндрических образцах МИ-12 при комнатной температуре. Прочность на разрыв составила 295...310 МПа. Разрушение образцов происходило по основному металлу.

При использовании наноструктурной фольги толщиной 160 мкм экзотермическая реакция проходит не полностью, поэтому в шве присутствуют

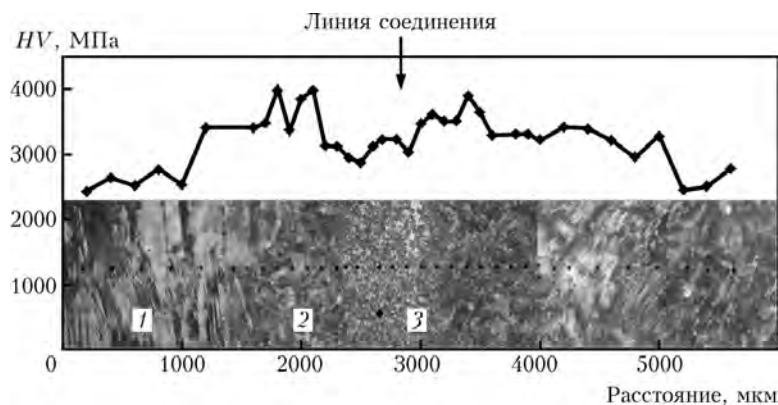


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 100$ ) и распределение микротвердости (нагрузка 4,9 Н) в металле соединения интерметаллидного сплава Ti-47Al-1,5Cr-2Nb, полученного контактной стыковой сваркой сопротивлением с использованием фольги системы Ti-Al: 1 — ламелярная структура основного металла; 2 — измельченная ламелярная структура; 3 — равноосные зерна  $\alpha$ -фазы, окантованные выделениями  $\gamma_2$ -фазы

остатки фольги. Разрушение таких сварных соединений при механических испытаниях на разрыв происходит по околошовной зоне ( $\sigma_{в\ max} = 270...280$  МПа).

### Выводы

1. Контактная стыковая сварка сопротивлением характеризуется локальным высокоскоростным введением тепла и соответственно локальной деформацией, что определяет ее перспективность для получения соединений тугоплавких материалов с низкой пластичностью (сплавы на основе алюминидов титана).

2. Использование нанослойных фольг системы Ti-Al толщиной 60...100 мкм в качестве закладных элементов при контактной стыковой сварке сопротивлением улучшает формирование и свойства соединений сплавов на основе алюминидов титана благодаря обеспечению однородности нагрева изделия.

3. При использовании нанослойных Ti-Al фольг толщиной более 150 мкм необходимо применить более жесткие режимы сварки.

1. Поварова К. Б., Банных О. А. Структура и свойства сплавов на основе алюминидов титана // *Металловедение и технология легких сплавов*. — М.: ВИЛС, 2001.
2. Gam G., Bohm K. N., Kocak M. Diffusionsschweißen fein gegossener Titanaluminide // *Schweißen und Schneiden*. — 1999. — № 8. — S. 470–475.
3. Titanium aluminide: electron beam weldability / R. A. Patterson, P. L. Martin, B. K. Damkroger, L. Christodoulou // *Weld. Res. Supplement*. — 1990. — № 1. — P. 39–44
4. Сварка давлением интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl / А. Н. Юштин, В. Н. Замков, В. К. Сабокарь, П. Н. Четвертко // *Автомат. сварка*. — 2001. — № 1. — С. 33–37.
5. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
6. Особенности контактной сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминиево-никелевых и алюминиево-медных фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швец, А. Г. Сахацкий, А. Г. Наконечный // *Сварочн. пр-во*. — 2007. — № 9. — С. 12–14.
7. Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Ti-Al, полученных методом электроннолучевого осаждения / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко, А. Е. Шишкин // *Совр. электрометаллургия*. — 2008. — № 2. — С. 21–28.

Peculiarities and prospects of application of resistance welding of titanium aluminides are considered. It is shown that nano-layer foils of the Ti-Al systems used as embedded elements provide uniform heating of workpiece and improve formation and properties of the joints.

Поступила в редакцию 03.10.2008