



ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА γ -TiAl СО СТАЛЬЮ 12X18H10T

Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, **А. И. УСТИНОВ**, д-р физ.-мат. наук, **Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук,
Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ, инж., **С. Г. ГРИГОРЕНКО**, **В. А. КОСТИН**, кандидаты техн. наук,
В. П. ГУРИЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана двухстадийная технология диффузионной сварки в вакууме интерметаллидного сплава γ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек. Показано, что использование нанослойной промежуточной прослойки системы Ti–Al со стороны интерметаллида и прослойки из никеля со стороны стали способствует равномерному распределению микротвердости в стыке.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме, интерметаллидный сплав γ -TiAl, сталь 12X18H10T, нанослойная прослойка, зона соединения, микроструктура, микротвердость

Сложность сварки интерметаллидов системы Ti–Al со сталью определяется малой взаимной растворимостью титана и железа, а образование карбидов, интерметаллидов и эвтектик в зоне соединения исключает возможность непосредственной сварки интерметаллида со сталью всеми известными способами сварки плавлением.

Как правило, соединения титана и его сплавов со сталью, выполненные способом диффузионной сварки, имеют низкие показатели ударной вязкости [1–3].

При сварке в твердой фазе титана со сталью для получения качественных соединений без образования в стыке хрупких интерметаллидных фаз [4, 5] применяют промежуточные прослойки, в частности, ниобий (или ванадий) и медь. Однако эти материалы отличаются друг от друга как температурой плавления, так и прочностными характеристиками (табл. 1). Медь применяют как материал, блокирующий диффузию углерода в ниобий (сильный карбидобразующий металл). Главный недостаток меди в данной композиции — это низкая температура плавления $T_{пл} = 1083$ °С.

Согласно данным работы [2] при сварке сплавов титана с нержавеющей сталью через промежуточные барьерные прослойки наименьшую прочность в зоне соединения имеет участок меди, по которому происходит разрушение.

Существуют немногочисленные работы по сварке интерметаллидов системы Ti–Al со сталью [6, 7]. При диффузионной сварке интерметаллида системы Ti–Al (Ti–48Al–2Cr–2Nb ат. %) со сталью без применения промежуточных прослоек ($T_{св} = 950$ °С, $P_{св} = 25$ МПа, $t_{св} = 6$ мин) в стыке

между γ -TiAl и сталью формируются переходные интерметаллидные слои $Ti_3Al + FeAl + FeAl_2/TiC$, приводящие к охрупчиванию сварного соединения [6].

Сварку интерметаллида с нержавеющей сталью с применением тонких прослоек в виде фольг из титана, ванадия, меди, препятствующих образованию хрупких интерметаллидов в стыке, исследовали в работе [7]. Интерметаллидный сплав (Ti–47,2Al–1,17Ni–0,56Cr–0,11Nb ат. %) сваривали со сталью. Сварку выполняли при температуре $T_{св} = 1000$ °С, давлении $P_{св} = 20$ МПа, длительности сварки $t_{св} = 60$ мин. При выборе температуры сварки авторы прежде всего ориентировались на физические свойства меди, поскольку при повышении температуры сварки выше 1083 °С происходит расплавление медной прослойки и выдавливание меди из стыка, а прочность сварных соединений резко снижается [6]. При оптимальном режиме сварки разрушение образцов в основном происходит по слою Ti_3Al –TiAl и частично по основному металлу (γ -TiAl).

Цель наших исследований заключалась в разработке технологии диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) интерметаллидного сплава γ -TiAl со

Таблица 1. Механические свойства применяемых материалов

Материал	$T_{пл}$, °С	δ , %	σ_b , МПа	E , МПа
12X18H10T	1455	40	510...860	198000
Медь	1083	60	216...235	128700
Никель	1453	35...40	390...490	201900
Ниобий	2468	30...40	345...491	89100
Титан	1668	40...55	245...345	108000
γ -TiAl	~ 1450	1,5	550...900	180000



Таблица 2. Состав и толщина применяемых при сварке прослоек

Тип прослойки	Состав прослойки	Толщина, мкм
Ti-Al	Ti-52Al ат. %	20
Титан	Титан	100
Ниобий	Ниобий	50
Медь	Медь	50
Никель	Никель	50

сталью 12X18H10T с более равномерным распределением прочности в стыке. Объектом исследований служили интерметаллидный сплав γ -TiAl (Ti-48Al-2Nb-2Cr ат. %) и сталь 12X18H10T.

При температуре сварки γ -TiAl, равной 1000 °С, в стыке вследствие большой твердости и малой пластичности материала образование физического контакта в полной мере не происходит [8]. В зоне соединения обнаружено значительное количество дефектов. Качественные сварные соединения γ -TiAl, по нашим результатам, можно получить при более высоких значениях температуры (примерно 1200 °С), что согласуется с данными работы [9].

Поскольку соединяются такие разные материалы, как интерметаллидный сплав и медная прослойка с отличающимися физико-химическими свойствами, то сварку интерметаллида γ -TiAl со сталью 12X18H10T осуществляли в две стадии. На первой при температуре 1200 °С к интерметаллиду приваривали прослойки из титана и ниобия, а на второй стадии при более низкой температуре (1000 °С) к сборке через медную прослойку присоединяли нержавеющую сталь.

Образцы размерами 15×15×5 мм вырезали на электроэрозионном станке. Характеристики применяемых при сварке прослоек приведены в табл. 2. Образцы сваривали в свободном состоянии.

Микроструктура сварного соединения, полученного ДСВ интерметаллидного сплава γ -TiAl со сталью 12X18H10T через прослойки из титана, ниобия и меди, представлена на рис. 1. Металлографические исследования показали, что в зоне соединения γ -TiAl/Ti/Nb+Cu/12X18H10T такие дефекты, как трещины и поры, отсутствуют. Как следует из рис. 1 и 2, в процессе сварки в зоне соединения происходят активные диффузионные процессы с образованием со стороны γ -TiAl широкой зоны объемного взаимодействия.

При исследовании распределения микротвердости в зоне соединения γ -TiAl+12X18H10T (рис. 3) определено, что на границе интерметаллида γ -TiAl-прослойка титана отмечено повышение микротвердости до 4050 МПа. В данной области

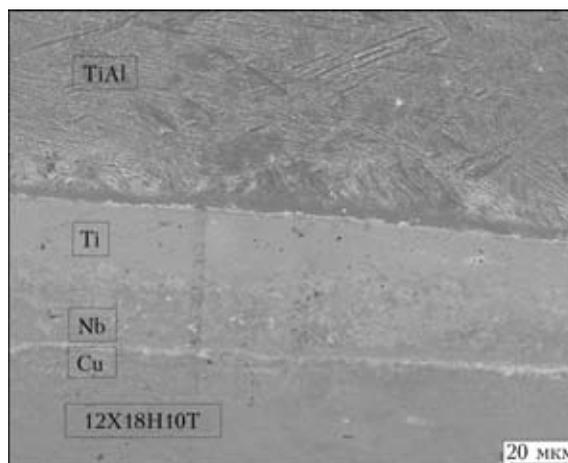


Рис. 1. Микроструктура ($\times 600$) зоны соединения γ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек сплошного сечения (титан, ниобий, медь)

фиксируется 8,95 ат. % Al за счет диффузии алюминия из интерметаллида в сторону титана.

Со стороны нержавеющей стали на границе с медной прослойкой обнаружено резкое снижение микротвердости (до 1100 МПа), что соответствует значению микротвердости меди. Очевидно, опасным местом с точки зрения работоспособности сварного соединения γ -TiAl/Ti/Nb+Cu/12X18H10T является участок размещения меди, где значения микротвердости в 2 раза ниже, чем в соседних участках.

Для выравнивания микротвердости в зоне соединения со стороны интерметаллида применяли

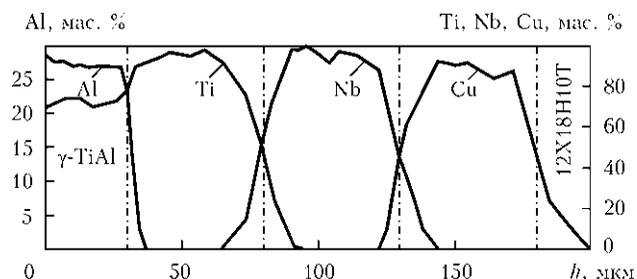


Рис. 2. Распределение элементов в зоне соединения γ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек сплошного сечения из титана, ниобия и меди (h — толщина прослойки)

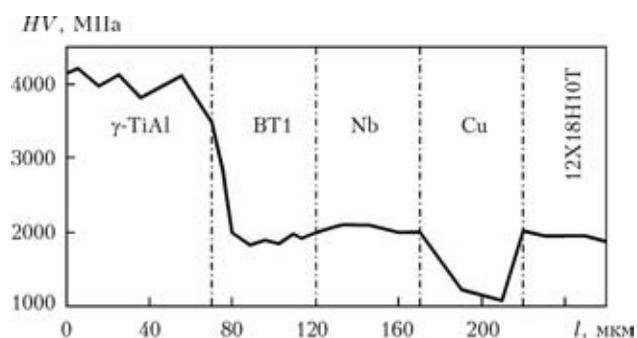


Рис. 3. Распределение значений микротвердости поперек зоны соединения γ -TiAl+12X18H10T, полученного с применением промежуточных прослоек из титана, ниобия, меди

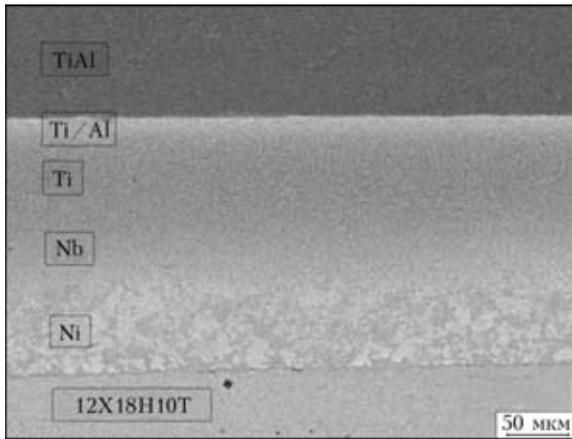


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослоек Ti/Al–Ti–Nb–Ni

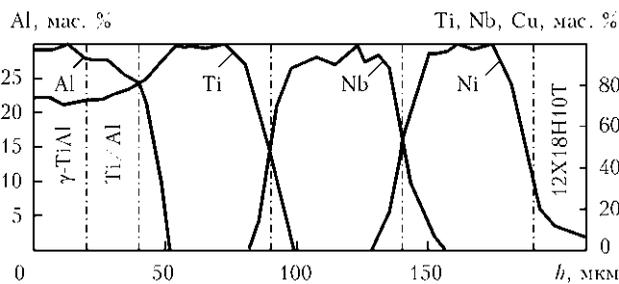


Рис. 5. Распределение элементов в зоне соединения TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослоек Ti/Al–Ti–Nb–Ni

нанослойную прослойку типа Ti–Al (см. табл. 2) общей толщиной 20 мкм и толщиной отдельных слоев алюминия и титана примерно 20 нм, что обеспечивает дополнительную активацию свариваемых поверхностей.

Необходимо также отметить, что при медленном нагреве нанослойных прослоек Ti/Al со скоростью 50 °C/мин, характерной для ДСВ, зафиксирована следующая последовательность фазовых превращений: $Al_3Ti_2 \rightarrow Al_5Ti_2 \rightarrow Al_2Ti \rightarrow AlTi$ [10]. В нанослойных прослойках дифракционные признаки формирования интерметаллида Ti_3Al отсутствуют. Образование в процессе сварки между интерметаллидным сплавом и прослойкой титана диффузионного слоя с составом Ti/Al, более пластичным, чем Ti_3Al , может существенно влиять на повышение качества сварных соединений [6].

Прослойку типа Ti/Al размещали между интерметаллидом и прослойкой из титана. Между сталью и ниобием располагали прослойку из никеля, так как диффузионная подвижность его в железо и его прочностные характеристики выше, чем у меди (см. табл. 1).

В паре Nb–Ni при образовании интерметаллида существует латентный период. Так, при температуре 1000 °C время образования интерметаллида толщиной примерно 1,5 мкм составляет 11 мин [11].

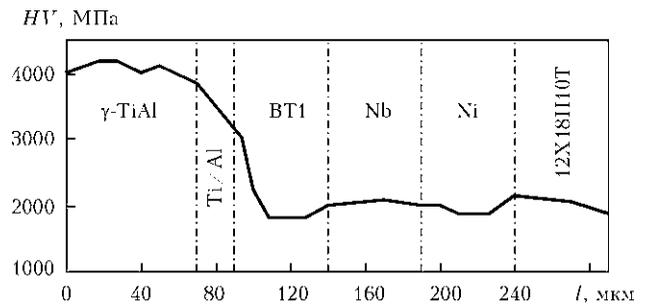


Рис. 6. Распределение микротвердости поперек зоны соединения γ -TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослойки Ti/Al–Ti–Nb–Ni

Сварку проводили в две стадии: соединяли интерметаллид с прослойками Ti/Al–Ti–Nb при $T_{св} = 1200$ °C, $P_{св} = 40$ МПа, $t_{св} = 20$ мин с последующей приваркой прослойки из никеля и стали 12X18H10T при $T_{св} = 1000$ °C, $P_{св} = 20$ МПа, $t_{св} = 10$ мин.

Металлографические исследования соединения показали, что в стыке дефекты сварки отсутствуют. Как видно из микроструктуры сварного соединения (рис. 4) и распределения элементов (рис. 5), в процессе сварки в стыке активно проходят диффузионные процессы, что приводит к образованию между интерметаллидом и титаном, а также ниобием и титаном зон объемного взаимодействия. Анализ значений микротвердости в зоне соединения γ -TiAl–Ti/Al–Ti–Nb–Ni–12X18H10T (рис. 6), полученного ДВС, показал, что характер распределения микротвердости более равномерный, чем при сварке с прослойками Ti–Nb–Cu.

Выводы

1. С учетом различий физико-химических свойств свариваемых материалов предложена двухстадийная схема сварки γ -TiAl со сталью 12X18H10T.
2. В соединениях, полученных ДВС, интерметаллидного сплава γ -TiAl со сталью 12X18H10T через промежуточные прослойки Ti–Nb–Cu отмечается резкое снижение значений микротвердости на медной прослойке.
3. Применение никеля вместо медной прослойки при сварке γ -TiAl со сталью 12X18H10T позволяет получать бездефектные сварные соединения при равномерном распределении микротвердости в стыке.

1. *Биметаллические соединения* / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров, Н. Ф. Казаков. — М.: Металлургия, 1970. — 280 с.
2. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
3. *Чарухина К. Е., Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме разнородных металлов.* — Л.: ЛДНТП, 1964. — 24 с.



4. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
5. Шмаков В. М., Измирлиева А. Н. Диффузионная сварка разнородных металлов // Сварка новых высокопрочных материалов. — Куйбыш. кн. изд-во, 1967. — С. 82–86.
6. *Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of TiAl base alloy to steel* / P. He, J. C. Feng, B. G. Zang, Y. Y. Qian // *Materials Characterization*. — 2002. — № 48. — P. 401–406.
7. *A new technology for diffusion intermetallic TiAl to steel with composite barrier layers* / P. He, J. C. Feng, B. G. Zang, Y. Y. Qian // *Ibid.* — 2003. — № 50. — P. 87–92.
8. *Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме* / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко и др. // *Автомат. сварка*. — 2009. — № 1. — С. 17–21.
9. *Yoshikuni Nakao, Kenji Shinozaki, Masahiko Hamada. Diffusion bonding of intermetallic compound TiAl* // *ISIJ Intern.* — 1991. — **31**, № 10. — P. 1260–1266.
10. *Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения* / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко и др. // *Современ. электротехнология*. — 2008. — № 2. — С. 21–28.
11. *Харченко Г. К., Шевчук Т. В., Игнатенко А. И. Исследование соединения ниобий–прослойка никеля–сталь, выполненого сваркой давлением* // *Автомат. сварка*. — 1976. — № 9. — С. 71–72.

A two-stage technology for vacuum diffusion bonding of intermetallic alloy γ -TiAl to steel 12Kh18N10T by using interlayers has been developed. It is shown that application of a nanolayered interlayer of the Ti–Al system on the side of intermetallic and nickel interlayer on the side of steel provides a uniform distribution of microhardness in the bond.

Поступила в редакцию 08.12.2011

12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ»

28.05–01.06.2012

г. Ялта, Украина

Тематика конференции:

- *научные основы инженерии поверхности:*
 - *материаловедение*
 - *физико-химическая механика материалов*
 - *физико-химия контактного взаимодействия*
 - *износо- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя*
 - *функциональные покрытия и поверхности*
 - *технологическое управление качеством деталей машин*
 - *вопросы трибологии в машиностроении*
- *технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей*
- *метрологическое обеспечение ремонтного производства*
- *экология ремонтно-восстановительных работ*

В рамках конференции будет проведен практический семинар «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горно-металлургической, машиностроительной промышленности и на транспорте».

Организаторы: Ассоциация технологов-машиностроителей Украины

Контакты: 04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2.

Тел./факс: +38044-430-85-00

www: atmu@ism.kiev.ua