

## СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНА СО СТАЛЬЮ (Обзор)

Л. С. КИРЕЕВ, В. Н. ЗАМКОВ, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен обзор литературы по сварке плавлением титана со сталью: электронно-лучевая, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом. Показано, что сваривать непосредственно титан со сталью не удастся из-за образования хрупких интерметаллидных фаз. Поэтому была предложена технология сварки через промежуточные барьерные вставки. Сварка титана со сталью в твердожидком состоянии возможна без применения промежуточных вставок. Такое соединение образуется с помощью рельефной контактной сварки с программируемым конечным внутренним выплеском и последующей проковкой зоны соединения.

*Ключевые слова:* сварка плавлением, электронно-лучевая сварка, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом, рельефная контактная сварка, сварка в твердожидком состоянии, титан, сталь, интерметаллидные фазы, промежуточные барьерные вставки, карбиды ванадия, граница раздела титан-сталь

Проблема создания титаностальных сварных конструкций привлекала внимание исследователей еще в конце 1950-х годов, когда началось промышленное использование титана в различных областях техники. Интерес был обусловлен, с одной стороны, уникальными свойствами титана и сплавов на его основе, а с другой, — высокой стоимостью титановых полуфабрикатов. Предполагалось, что использование элементов из титана (где это необходимо по условиям работы изделия) и стали в одной сварной конструкции позволит повысить как ее эксплуатационные характеристики, так и экономическую эффективность. Однако все попытки непосредственной сварки плавлением титана со сталью не давали положительных результатов [1, 2]: в швах возникали трещины. Исследования показали, что причина их появления обусловлена образованием хрупких интерметаллидных фаз при сплавлении титана с железом и большинством легирующих элементов сталей [3], а сварка титана со сталью возможна лишь с применением промежуточных вставок, которые хорошо свариваются с обоими металлами. Обоснование выбора материалов для промежуточных вставок было впервые дано в работе [4].

Титан образует непрерывные твердые растворы с цирконием, гафнием, ванадием, ниобием, молибденом, танталом и благодаря этому удовлетворительно сваривается с данными металлами [4–7]. В свою очередь из металлов этой группы непосредственно со сталью удается сварить только ванадий. Однако пластичность и вязкость металла таких швов зависят от соотношения в них количества ванадия, железа и легирующих элементов стали. Это прежде всего вызвано тем, что в системе Fe–V при массовой доле ванадия в пределах от 22 до 65 % в металле образуется хрупкая  $\sigma$ -фаза [7]. Отрицательное влияние на пластичность швов ванадия со сталью оказывают углерод (в связи с образованием карбида ванадия) [8] и легирующие элементы стали, например, никель, марганец, крем-

ний и др., если их массовая доля в шве превышает соответственно 18, 2,8 и 1,6 % [9]. Чтобы швы титана с ванадием имели удовлетворительные свойства, в них должно быть определенное соотношение титана и ванадия, при котором в металле образуется однофазная термически стабильная  $\beta$ -структура.

Следует еще раз подчеркнуть, что ванадий — это единственный металл, который можно соединять непосредственно со сталью способом сварки плавлением. Во всех других случаях промежуточная вставка между титаном и сталью состоит из двух металлов, например, из тантала или ниобия и меди или сплавов на ее основе [4].

В настоящее время для изготовления титаностальных конструкций способом сварки плавлением используют две технологические схемы. В соответствии с первой сварка осуществляется с использованием многослойных вставок, заранее изготовленных с применением сварки давлением (взрывом, совместной прокаткой и т. п.). Крайними металлами таких многослойных вставок являются, с одной стороны, титан, а с другой, — сталь. В этом случае с помощью сварки плавлением соединяются однородные металлы (титан с титаном и сталь со сталью). По другой схеме соединение осуществляется с использованием одного (ванадия) или нескольких промежуточных металлов-вставок, которые последовательно свариваются плавлением друг с другом [1].

**Электронно-лучевая сварка (ЭЛС).** Технология ЭЛС титанового сплава ОТ4-1 со сталями марок ВНС2, 12Х18Н12Т, ЭП56, ферритными хромистыми сталями и железом рассмотрена в работах [8–12]. Сварку выполняли с применением вставки из сплава ванадия марки ВВ8. Прочные и достаточно пластичные швы ванадия со сталью были получены при сварке со смещением пучка на сталь на расстояние 1,1...1,3 мм от стыка. При сварке сплава ОТ4-1 с ванадием пучок смещали на титан на расстояние 0,5 мм от стыка. Сварку выполняли на скорости  $v = 45$  м/ч при ускоряющем напряжении  $U = 20$  кВ. Ток фокусировки составлял  $I_{\phi} = 118$  мкА, а ток пучка — 59 и 63 мкА соответственно для швов ВВ8 + ВНС2 и ВНС2 + ОТ4-1. При сварке на указанном режиме массовая доля ванадия в шве ВВ8 + ВНС2 не превышает 15 %, а основной структурной составляющей металла шва является ле-



гированный ванадием пластинчатый феррит [11]. Металл шва с такой структурой отличается относительно высокой пластичностью, а прочность сварного соединения не уступает прочности сплава ВВ8. Аналогичные результаты были получены при сварке титана со сталями марок 12Х18Н12Т и ЭП56.

При сварке титана с железом, низкоуглеродистой или ферритной хромистой сталью металл шва необходимо дополнительно легировать 2...16 мас. % никеля в зависимости от концентрации углерода в металле шва. Такое легирование обеспечивает вязкое разрушение швов, содержащих до 0,06 мас. % углерода. При большей его концентрации (независимо от содержания никеля) зафиксировано хрупкое разрушение по зоне сплавления ванадий-швов [8].

**Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом.** При дуговой сварке титана со сталью с использованием промежуточной вставки из сплава ванадия основная проблема состоит в том же, что и при ЭЛС. Необходимо получить швы определенного химического состава [12]. В шве сталь-ванадий массовая доля последнего не должна превышать 15 %, а в шве титан-ванадий — 25...30 %, что обеспечивает однофазную термически стабильную  $\beta$ -структуру. Для этого сварку обоих швов осуществляли со смещением электрода относительно стыка на 0,8...1,0 мм. Скорость сварки не должна быть менее 30 м/ч. Следует отметить, что сварные соединения титана со сталью, полученные через вставку из ванадия, могут достаточно надежно работать и при повышенных температурах в интервале 200...300 °С [13], и в агрессивной среде [14]. При более высоких значениях температуры (500...600 °С) соединения быстро теряют пластичность вследствие выделения  $\sigma$ -фазы и образования карбидов ванадия [8, 13].

**Сварка титана со сталью в твердожидком состоянии.** В работах [15–23] сформулирована и экспериментально подтверждена принципиальная возможность получения соединений титана со сталью без промежуточных вставок. Такое соединение образуется с помощью рельефной контактной

сварки с программируемым конечным внутренним выплеском и последующей проковкой зоны соединения.

Как следует из работы [16], при рельефной контактной сварке соединение образуется вначале в жидкой фазе в результате плавления свариваемых заготовок под действием тепла, выделяющегося в зоне стыка при прохождении тока, а после выплеска и проковки — в твердожидкой фазе. В зависимости от физико-химических свойств свариваемых материалов и параметров сварки (тока, формы рельефа, усилия сжатия) соотношение жидкой и твердой фаз может изменяться. В случае сварки титана со сталью желательно, чтобы в результате выплеска и проковки из зоны сварки было удалено максимальное количество жидкого металла ядра, и соединение сформировалось преимущественно в твердой фазе. В результате исследований, представленных в работе [17], были сформулированы необходимые условия образования таких соединений титана со сталью, определены требования к форме рельефов на титановых и стальных деталях, к форме электродов и режимам сварки, создана математическая модель для расчета температурно-временных процессов [19], разработано соответствующее оборудование для практического использования этой технологии.

Экспериментально при сварке сталей толщиной 10 мм марок Ст3, 12Х13, 10Х18Н10Т с титановыми сплавами толщиной 2 мм марок ВТ1-0, ОТ4-1, ВТ5-1 и ВТ20 установлено, что (при прочих равных условиях) прочность сварной точки на отрыв и работа разрушения при ударном изгибе снижаются с увеличением легирования стали [18]. Все соединения имеют в переходной зоне диффузионную прослойку толщиной 1...8 мкм. При равной толщине прослойки прочность точки зависит от ее химического состава и площади контакта. Алюминий, который попадает в шов из титанового сплава, во всех случаях снижает его прочность. Хром, а в большей степени хром и никель, несколько повышает прочностные характеристики (таблица). Сварные соединения обычно разрушаются из-за хрупкого скола. Очагом зарождения начальных микротрещин, как правило, является канал, по которому происходит внутренний выплеск, и разрушение сопровождается частичным вырывом приповерхностных слоев титана.

Таким образом, работоспособность сварных соединений титана со сталью, выполненных рельефной сваркой, зависит от химического состава зоны соединения, а также от формы и количества остатков литого ядра, т. е. факторов, определяемых полнотой реализации выплеска, и характера физико-химических процессов на границе раздела титан-сталь. Этот технологический процесс и оборудование для его осуществления [22] главным образом предназначены для облицовки стальных емкостей титановым листом.

Анализ литературы показал, что сварка плавлением титана со сталью возможна только с применением промежуточных барьерных слоев. Такие соединения характеризуются удовлетворительными механическими свойствами, однако имеют весь-

Марка стали	Марка титана	Усилие отрыва, кН	Работа разрушения при изгибе, Дж	Угол загиба, град
Ст3	ВТ1-0	4,0	20,0*	60
	ОТ4-1	2,8	2,7	11
	ВТ5-1	2,7	2,7	10
	ВТ20	2,6	1,5	8
12Х13	ВТ1-0	4,2	20,0*	60
	ОТ4-1	3,6	7,5	26
	ВТ5-1	3,2	—	—
	ВТ20	3,1	—	—
10Х18Н10Т	ВТ1-0	5,9	20,0*	60
	ОТ4-1	4,9	20,0*	60
	ВТ5-1	4,7	13,1	35
	ВТ20	3,5	6,9	24

\* Образцы не разрушились.

ма низкую коррозионную стойкость и недостаточно надежны в процессе эксплуатации, особенно при повышенных температурах.

Что касается сварки титана со сталью в твердодожидком состоянии, то этот способ имеет весьма ограниченное применение.

1. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов // Под ред. С. М. Гуревича. — Киев: Наук. думка, 1979. — 300 с.
2. Metzger G., Lison R. Electron beam welding of dissimilar metals // *Welding J.* — 1976. — 55, № 8. — P. 230–240.
3. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // *Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы.* — 1965. — 1, № 1. — С. 29–36.
4. Гуревич С. М., Замков В. Н. Сварка титана со сталью // *Автомат. сварка.* — 1962. — № 8. — С. 21–26.
5. Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М. Сварка разнородных металлов. — Киев: Техніка, 1975. — 205 с.
6. *Сварка разнородных металлов и сплавов* / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. — М.: Машиностроение, 1984. — 239 с.
7. Лариков Л. Н., Рябов В. Р., Фальченко В. М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М.: Машиностроение, 1975. — 189 с.
8. Гонсеровский Ф. Г. Влияние углерода на ударную вязкость сварных соединений ванадия с железом и ферритными сталями // *Свароч. пр-во.* — 1972. — № 11. — С. 7–8.
9. Гонсеровский Ф. Г. Влияние легирующих элементов на ударную вязкость сварных соединений ванадия с нержавеющей сталью // *Автомат. сварка.* — 1972. — № 10. — С. 17–20.
10. *Электроннолучевая* сварка титанового сплава ОТ4-1 со сталью ВНС-2 / В. Р. Петренко, Ф. Н. Рыжков, А. В. Башкатов и др. // *Свароч. пр-во.* — 1974. — № 10. — С. 19–20.
11. Гонсеровский Ф. Г. Особенности получения пластичных сварных соединений ванадия со сталью // Там же. — 1972. — № 12. — С. 10–12.
12. Стрижевская Л. Г., Старова Л. Л., Куликов Ф. Р. Свариваемость и свойства сварных соединений титана со сталью, выполненных с применением ванадиевого сплава: Лекции по сварке разнородных металлов. — М.: О-во «Знание», 1973. — Ч. 2. — С. 46–51.
13. Стрижевская Л. Г., Куликов Ф. Р., Курочко Р. С. Высокоресурсные сварные соединения титана со сталью // *Материалы 8-го всеююз. совещ. по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 30–33.
14. Гуревич С. М., Куликов Ф. Р., Дружинина И. П. Коррозионная стойкость сварных соединений титана со сталью // *Материалы 8-го всеююз. совещ. по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 33–35.
15. Быковский О. Г. Плакирование титаном стальных аппаратов для химического производства // *Свароч. пр-во.* — 1984. — № 11. — С. 34–35.
16. О роли выплеска при рельефной сварке титана со сталью / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // Там же. — 1988. — № 7. — С. 4–5.
17. Выбор параметров режима рельефной сварки титана со сталью / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // *Автомат. сварка.* — 1988. — № 11. — С. 61–64.
18. Влияние состава исходных материалов на формирование и свойства точечных сварных соединений сплавов титана со сталью и никелем / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло и др. // *Свароч. пр-во.* — 1988. — № 11. — С. 15–17.
19. Быковский О. Г., Горбунов А. Д. Математическое моделирование теплового состояния металла при контактной точечной сварке // Там же. — 1990. — № 7. — С. 36–38.
20. Быковский О. Г., Пиньковский И. В., Рябов В. Р. Фрактнографическое исследование разрушения сварных титано-стальных соединений // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 8. — С. 5–8.
21. Особенности контактной сварки титана ВТ1-0 с низкоуглеродистой сталью / И. В. Пиньковский, О. Г. Быковский, И. В. Ткаченко, В. Р. Рябов // *Свароч. пр-во.* — 1987. — № 5. — С. 11–12.
22. Точечная рельефная сварка титана со сталью в монтажных условиях / О. Г. Быковский, И. В. Пиньковский, С. Н. Миняйло, В. Р. Рябов // Там же. — 1988. — № 12. — С. 4–5.
23. Свариваемость титана и стали сплавами системы Ti-Fe при сварке плавлением / В. Р. Рябов, О. Г. Быковский, В. Е. Самойлов, И. В. Ткаченко // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 11. — С. 10–13.

Review of literature on titanium-steel fusion welding is presented: electron beam and argon-arc tungsten electrode welding. It is shown that it is difficult to weld titanium with steel directly due to formation of brittle intermetallic phases. In this connection the technology of welding was suggested using intermediate barrier inserts. Titanium-steel welding in a solid-liquid state is possible without use of intermediate inserts. This joint is made using a projection resistance welding with a programmed final inner splash and subsequent forging of the joint zone.

Поступила в редакцию 25.09.2001,  
в окончательном варианте 16.10.2001