

УДК 621.791: 621.384.6

Авагян В. Ш.

ДИФФУЗИОННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТИТАНА СО СТАЛЬЮ

При создании изделий криогенной и ускорительной техники весьма актуальной является задача получения с помощью биметаллических переходных элементов надежных соединений элементов конструкций машин и установок из нержавеющей стали и титана, работоспособных в широком диапазоне изменения температур и силовых нагрузок. Существующие способы соединения нержавеющей стали с титаном далеко не всегда обеспечивают получение переходных элементов, отвечающих экстремальным условиям эксплуатации: глубокий вакуум, высокое давление, циклическое изменение температур в интервале от 4,2 до 293 К, повышенная вибрация и др. Объясняется это тем, что сварка или пайка разнородных материалов связана с большими трудностями из-за возможности образования при их взаимодействии хрупких соединений.

Титан с основными элементами нержавеющей стали (железом, хромом, никелем) обладает ограниченной взаимной растворимостью, образует интерметаллиды и низкотемпературные эвтектики. Так, температура образования эвтектик титан-железо и титан-никель составляет соответственно 1325...1358 и 1228 К. Кроме того, при выборе способа и технологии сварки титана со сталью следует также учитывать, что титан является сильным карбидообразователем [1].

Незначительная взаимная растворимость между титаном и железом, образование карбидов, интерметаллических соединений и эвтектики исключают возможность непосредственного соединения титана со сталью всеми известными способами сварки плавлением – сваренные швы становятся хрупкими. Задача сварки плавлением титана со сталью может быть решена лишь путем применения промежуточных вставок. Возможные варианты вставок выполнены в работе [2]. Исходя из требований, предъявляемых к таким вставкам и, в первую очередь, обеспечения хорошей свариваемости с титаном и со сталью, рассмотрен ряд металлов.

Титан удовлетворительно сваривается с очень ограниченным количеством металлов: цирконием, гафнием, ниобием, танталом, ванадием. Наиболее пластичные соединения удаётся получить при сварке титана с цирконием, ниобием и танталом. Сталь не рассматривается непосредственно ни с одним из перечисленных выше металлов, за исключением ванадия, который как с железом, так и с титаном образует твердые растворы.

В настоящее время для сварки плавлением титана со сталью имеется два способа. Согласно первому способу соединение осуществляется с помощью заранее подготовленных многослойных вставок, изготовленных обычной сваркой в твердом состоянии (диффузионная, трением и др.). Как правило, в этом случае плавлением свариваются однородные металлы (титан с титаном, а сталь со сталью). По второму способу соединение производится с применением одного или нескольких промежуточных металлов – вставок, полностью или частично осуществляемых в процессе сварки [1].

В литературе наиболее широко освещены вопросы соединения титана со сталью сваркой в твердой фазе, то есть без расплавления контактирующих металлов. Возможность соединения титана непосредственно с железом и сталью, то есть без прослоек, изучалась для случаев диффузионной сварки в вакууме [3], прессовой сварки на воздухе [4] или в вакууме [5], сварки взрывом [6], сварки трением [7] и др. Как правило, такого рода соединения при испытаниях стандартных образцов на растяжение имеют величину σ_b , близкую к уровню основного металла и разрушаются, в основном, в зоне контакта. Испытания на ударную вязкость или изгиб показывают очень низкую пластичность соединений вследствие наличия

в зоне контакта тонкого хрупкого слоя, содержащего карбиды титана и интерметаллиды. Установлено, что наблюдается блокирование гетеродиффузии титана слоем карбидов титана, что может привести к росту значения температуры, при которой между титаном и сталью образуется жидкая фаза [8].

Имеется также ряд публикаций, в которых рассмотрено изготовление трубчатых переходников прессованием в вакуумированных стальных оболочках. Соединение OT4 + X18N9T получали при температуре нагрева контейнера перед прессованием до 1073–1143 К [9]. Давление при прессовании заготовок изменялось в интервале 300–1100 МПа. При испытаниях на растяжение разрушение образцов происходило по стали.

Приведенные оценки показывают, что соотношения титана со сталью, полученные холодной стыковкой, не могут работать в узлах иной техники даже кратковременно при повышенных температурах. При температуре 1083 К, уже после 10–20 сек. ее действия, механические свойства соединения титана непосредственно с нержавеющей сталью сильно снижаются, и соединение становится неработоспособным [10].

В работе [11] сделано предположение о том, что выделенная энергия в микрообъектах, участвующих в процессе схватывания, вероятно, достаточна для образования зародышей роста интерметаллида в стыке титана со сталью, а низкую пластичность сварных соединений можно объяснить не только наклепом в зоне контакта, но и наличием в стыке титан-сталь включений фазы TiFe.

Наиболее перспективна сварка давлением титана со сталью с использованием промежуточных прослоек из других металлов. Использование одинарных прослоек обусловлено температурно-временными параметрами принятых способов сварки, конструкцией биметаллического узла или условиями его работы. В зависимости от назначения сварных узлов при сварке взрывом применяются одинарные прослойки из Ag, Ni, Cu, V, Nb, Fe и сплавов Fe с тугоплавкими металлами. С целью уменьшения возможности образования хрупких соединений на границе раздела предлагается слой железа выбирать с содержанием углерода не более 0,02 % [12].

Рассмотренные выше одинарные прослойки не решают задачу получения работоспособного сварного биметаллического узла при температурах выше 673 К, так как в зоне контакта происходит рост переходного хрупкого слоя, содержащего или карбиды, или интерметаллиды, или оба типа химических соединений одновременно.

Двухслойные прослойки ниобий-медь применяются при сварке взрывом [13] и диффузионной сварке [14]. Ниобий с медью обладают слабой взаимной растворимостью, не образуют интерметаллических соединений, и сварка этих металлов не вызывает серьезных затруднений. При прочих равных условиях соединение обладает высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью. При низких температурах (до 4,2 К) и при высоких температурах (до 1273 К) разрушение при испытаниях происходит по слою меди [15].

Однако прослойки ниобий – медь имеют также существенные недостатки. Слои ниобия, меди, а также стали и титана обладают очень различными величинами коэффициентов линейного расширения, что приводит к появлению трещин в слое меди при термоциклических режимах работы узлов, то есть необходимо снизить уровень напряжений за счет снижения разницы в значениях α_m соединяемых металлов.

При диффузионной сварке усложняется выбор оптимальных режимов, так как слой ниобия непластичен при температурах около 1300 К, в то время как при этих температурах титан и медь имеют низкие показатели прочности и пластичности.

Если по условиям эксплуатации сварного изделия нельзя применять промежуточные прослойки из других металлов или требуется повышенная эксплуатационная надежность изделия, то разнородные металлы сваривают так, чтобы площадь их контакта была по возможности более обширной по сравнению с рабочим сечением детали. Имеется значительное число публикаций и патентов, в которых предлагается детали из твердого или мягкого металла

заострять на конце (угол при вершине составляет от 15 до 140 °) и затем впрессовывать друг в друга при определенной температуре (клинопрессовая сварка). Угол заточки (рекомендуется 15–20 °) и форма впрессованной детали оказывают большое влияние на пластическую деформацию приконтактных объемов соединяемых металлов [16, 17].

Результаты исследований, выполненных ИЭС им. Е. О. Патона, показывают, что применение слоев ванадия и меди оптимальных размеров позволяет получить сварные соединения сплавов титана с нержавеющей сталью, обладающие достаточной прочностью при удовлетворительной вязкости и пластичности как при комнатной, так и при повышенных температурах [18, 19]. Свойства сварных соединений зависят от относительной толщины мягкой прослойки c (отношение толщины слоя к диаметру образца), от степени компактности сечения и соотношения прочностных свойств металла прослойки и прилегающего более прочного (твердого) металла.

Экспериментальные данные и расчеты свидетельствуют о том, что при $c \leq 0,1$ для меди и $c \leq 0,2$ для ванадия прочность соединения близка к прочности нержавеющей стали при удовлетворительных пластичности и вязкости. Упрочнение мягких прослоек имеет место и при испытаниях при повышенных температурах. Так как разрушение обычно происходит по наиболее мягкому слою, наличие в нем дефектов снижает его способность к упрочнению.

Таким образом, наиболее перспективна сварка давлением титана со сталью с использованием двойных прослоек из других металлов. В настоящее время наиболее широко применяют слой ниобий-медь или ванадий-медь. Более предпочтительно использовать прослойки ванадий-медь, так как в этом случае снижается уровень напряжений в стыке за счет снижения различия в величинах коэффициентов термического расширения соединяемых металлов и показателей их пластичности.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что в настоящее время нет данных по закономерностям образования и роста интерметаллидов между сплавами титана и сталью, отсутствуют данные о микротвердости в зоне соединения. Несомненно, однако, что при выборе способа соединения конкретных узлов и разработке технологии необходимо учитывать в первую очередь температурно-временные условия как сварки, так и последующей эксплуатации этих узлов.

Целью настоящей работы является изучение микротвердости в зоне соединения переходных элементов титан-сталь, соединяемых различными методами.

При исследовании использованы следующие методы соединения:

- диффузионная сварка в вакууме с прослойкой ванадий-медь;
- фрикционная сварка;
- пайка в вакуумной печи припоями: L–Ni–2; L–CuSn 12; L–Ag 72.

Металлографические исследования концентрируются на постановке вопроса: по какой причине при отдельных способах соединений на зонах стыков образуются хрупкие внутриметаллические фазы, или при каком объеме такие фазы могут согласовать прочность соединения. Такие фазы возникают, когда титан со сталью или составная часть припоя реагирует на соответствующее соединение. Принимая во внимание титан и хром-никель-сталь, можно избежать таких реакций при способах соединений, при которых оба материала непосредственно друг с другом не контактируют, как, например, в способах 1,3. Но в способе 3 надо учитывать возможные реакции с материалом сварки. Другая возможность состоит в том, что смешиваемые области вытесняются из области зоны соединения, как при фрикционной сварке (способ 2).

Причинами отказов соединений между титаном и сталью являются, в большинстве случаев, хрупкие внутриметаллические фазы, близкие к стали, или недостаточная подготовка образца и, как следствие, связанная с этим усадочная раковина или окисление. Структуры

соответствующих зон соединений для отдельных способов изображены на рис. 1–5. Во всех способах надо учитывать, что подготовка соединяемой поверхности должна обеспечивать особую точность, принимая во внимание равную посадку и уменьшение окисления.

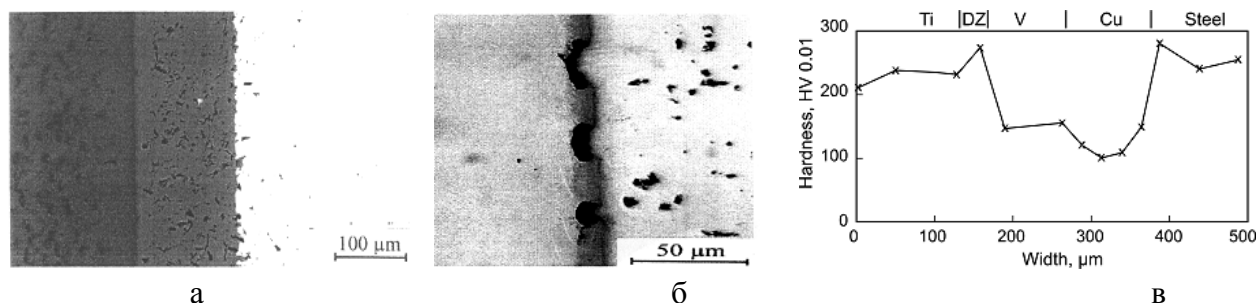


Рис. 1. Диффузионная сварка титана со сталью через прокладку ванадий – медь (T = 1000 °C, P = 5 МПа, τ = 15 мин):

а – структура в зоне соединения; б – поры в плоскости границ в результате недостаточной подготовки; в – распределение микротвердости в зоне соединения

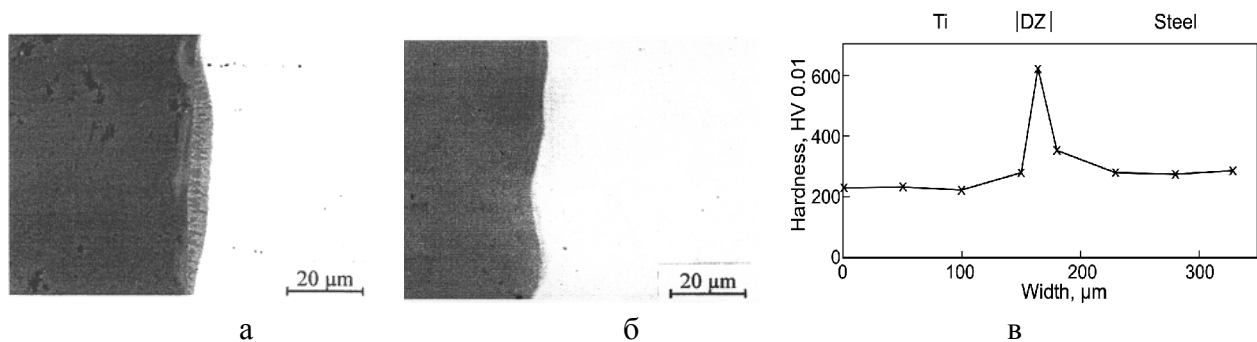


Рис. 2. Фрикционная сварка:

а – длительное фрикционное время (5,5 с); б – краткое фрикционное время (2,5 с); в – распределение микротвердости

Посредством прокладок из меди и ванадия, которые в применяемой последовательности в случае диффузионной сварки показывают несущественную реакцию друг с другом или с основными материалами – титаном и хром-никель-сталью, можно избежать нежелательных уплотнений и связанной с этим хрупкостью в зоне соединений (рис. 1). При соответствующем протекании уплотнения над зоной соединения можно достичь максимальной прочности, сопоставимой с прочностью чистой меди.

Только очень локальным расплавлением при фрикционной сварке можно ограничить смешение основных материалов и избежать образования хрупкой металлической фазы через короткое фрикционное время (рис. 2). В случае длительного фрикционного времени происходит смешение, но смешанная область в фазе сжатия из зоны соединения выжимается. Также быстрое охлаждение во время сжатия препятствует возникновению хрупкой внутриметаллической фазы.

В случае различных паяльных соединений решающую роль играет степень интенсивности реагирования основной части пайки с титаном. Такие реакции постоянно меняют состав расплавленных областей, которые затем твердеют: каждая соответственно концентрации и качеству внутриметаллической фазы. Существенные параметры реакции при этом определяются при помощи химии возможных соединений в основной части пайки титана, а также температурой процесса. В худшем случае наблюдаются последовательные переходы по тройной диаграмме состояния (Ti, Fe, Ni) к ожидаемой фазе.

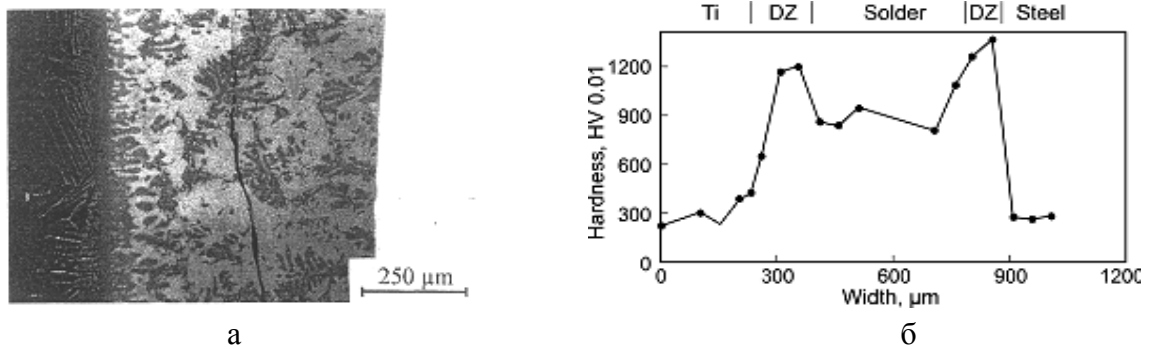


Рис. 3. Вакуумная пайка Ti + L – Ni2 + 316 L, T = 1080 °C:

а – структура в зоне соединения; б – распределение микротвердости в зоне соединения

Вследствие наличия высокой реактивности между никелем и титаном и связанным с этим образованием очень твердой и хрупкой фазы, в основном по отношению к хром-никель-стали, соединения с никелем являются проблематичными для дальнейших исследований (рис. 3). Реактивность между медью и титаном немного ниже, чем между никелем и титаном. Разумеется, диаграмма состояния системы медь-титан показывает эвтектику, чья сравнительно глубокая температура плавки способствует сильному смешению в жидком состоянии. Так же при использовании L–CuSn12 плавка твердеет вследствие внутриметаллической фазы в области шва, что в результате приводит к отклонению соединения (рис. 4).

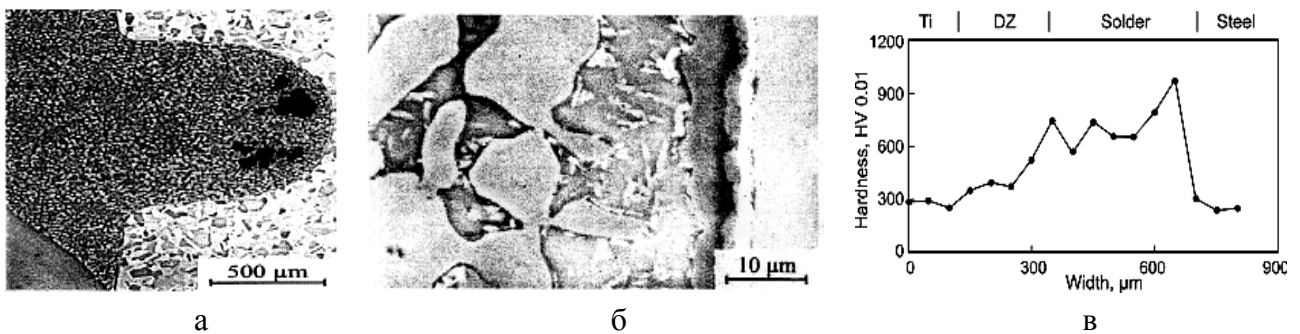


Рис. 4. Вакуумная пайка Ti + L – CuSn12 + 316L, T = 1040 °C:

а – образование жидкой фазы; б – переход припой-сталь; в – распределение микротвердости в зоне соединения

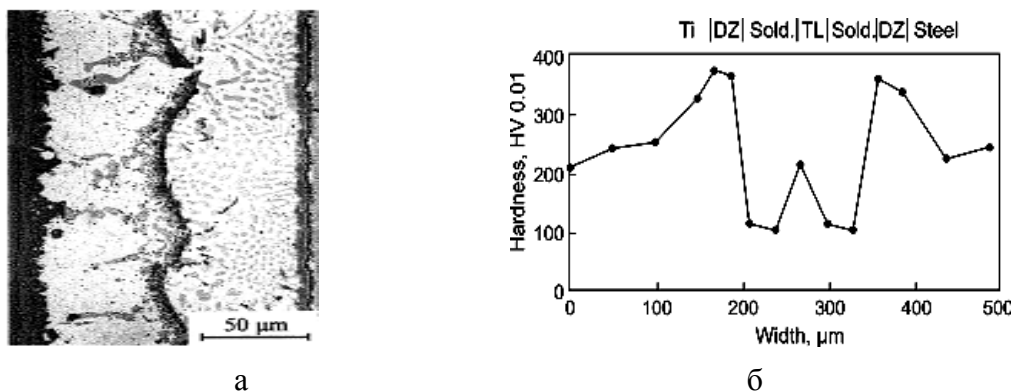


Рис. 5. Вакуумная пайка Ti + L – Ag – 72 + 316L, T = 820 °C:

а – структура зоны соединения; б – распределение микротвердости в зоне соединения

Температура плавления L–Ag 72 находится под воздействием эвтектической температуры меди с титаном. Следовательно, образование внутриметаллической фазы ограничено затвердением в очень узкой области на стыке с основным материалом (рис. 5).

ВЫВОДЫ

Из результатов исследований следует, что наибольшая пластичность в зоне соединения титана со сталью достигается посредством применения прокладки ванадий-медь. При испытании на разрыв разрушение происходит по меди. Вакуумные испытания при гелиевой температуре (4,2 К) показывают, что сварные образцы вакуумно герметичны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич С. М. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блацук. – 2-е изд., доп. и перераб. – К. : Наук. Думка, 1986. – 240 с.
2. Гуревич С. М. *Сварка титана со сталью* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков // *Автоматическая сварка*. – 1962. – № 8. – С. 21–26.
3. Чарухина К. Е. *Диффузионная сварка в вакууме разнородных металлов* / К. Е. Чарухина, Н. Ф. Казаков. – Л. : ЛДНТП, 1964. – 24 с.
4. Гриценко А. Ф. *Холодная сварка давлением разнородных металлов* / А. Ф. Гриценко, А. И. Шестаков, О. Е. Ермоленко // *Сварочное производство*. – 1963. – № 2. – С. 32–33.
5. *Причины снижения прочности сварных соединений титана со сталью* / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, В. Н. Замков и др. – *Автоматическая сварка*. – 1984. – № 4. – С. 17–20.
6. Бердичевский Г. И. *Исследование зоны соединения при сварке металла взрывом* / Г. И. Бердичевский, Т. М. Соболенко // *Автоматическая сварка*. – 1971. – № 9. – С. 19–21.
7. Потапов Ю. Д. *О возможности регулирования температуры при сварке трением разнородных материалов* / Ю. Д. Потапов, В. В. Трутнев, А. Ф. Якушин // *Сварочное производство*. – 1971. – № 2. – С. 1–3.
8. Криштал М. А. *Контактные явления и их влияние на прочность соединения титана со сталью* / Криштал М. А., Козлов В. Ф. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1979. – № 11. – С. 8–11.
9. Крянин И. П. *Титановые сплавы – новый конструкционный материал в энергомашиностроении* / И. П. Крянин, Р. П. Залетаева, Ю. П. Белолипецкий // *В кн. : «Титан для народного хозяйства»*. – М. : Наука, 1976. – С. 55–64.
10. Кочергин А. К. *Сварка давлением уплотненных поверхностей арматуры* / А. К. Кочергин, А. И. Шестаков, Г. К. Харченко. – Л. : ЛДНТП, 1972. – 16 с.
11. Харченко Г. К. *Холодная сварка титана со сталью* / Г. К. Харченко, П. И. Гурский, А. А. Гордонная // *Автоматическая сварка*. – 1965. – № 9. – С. 39–41.
12. А. с. 364372 (СССР). *Заготовка для пластического деформирования биметаллических стальтитановых изделий* / А. К. Куракин, Г. Г. Демченков, М. С. Гильдергори. – Оpubл. 1973, Бюл. № 5.
13. Белоусов В. П. *Механические свойства титаностальных соединений (с промежуточными слоями), сваренных взрывом* / В. П. Белоусов, Б. С. Седых, Ю. П. Трыков // *Сварочное производство*. – 1971. – № 9. – С. 19–21.
14. *Биметаллические соединения* / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров, Н. Ф. Казаков. – М. : *Металлургия*, 1970. – 280 с.
15. Кусков Ю. Н. *Влияние низких температур на работоспособность сваренных взрывом титаностальных соединений* / Ю. Н. Кусков, В. Д. Сапригин, В. С. Седых // *Сварочное производство*. – 1975. – № 11. – С. 20–21.
16. А. с. 306928 (СССР). *Способ клиновой сварки давлением разнородных металлов* / Л. А. Дударь, В. М. Воронов, И. С. Гришин и др. – Оpubл. 1971, № 20.
17. Колисниченко В. А. *Клино-прессовая сварка разнородных металлов, резко отличающихся и близких по твердости* / В. А. Колисниченко, Г. Д. Шнырев, В. П. Алехин // *Лекции по сварке разнородных и разноименных металлов*. Ч. 1. – М. : МДНТП, 1973. – С. 68–71.
18. Бакиш О. А. *О расчете оценки прочности сварных соединений с мягкой прослойкой* / О. А. Бакиш, Р. З. Шрон // *Сварочное производство*. – 1971. – № 3. – С. 3–5.
19. Харченко Г. К. *Прочность соединений с тонкой мягкой прослойкой* / Г. К. Харченко, А. И. Игнатенко // *Автоматическая сварка*. – 1968. – № 5. – С. 31–33.