

Изобретение относится к сварочным материалам, в частности, к присадочным порошковым проволокам, для сварки плавлением двухфазных ($\alpha + \beta$) сплавов титана, таких как:

- а) низколегированные системы Ti-6Al-4V (марок BT6, IMI 318, Grade 5)
- б) среднелегированные сплавы системы Ti-6Al-6V-2Sn (марки IMI 662).
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (марки IMI 646)
- в) высоколегированные сплавы системы Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr (марки BT 22)
Ti-4,5Al-2Mo-4,5V-0,6Fe-1Cr (марки BT 23)

и других, которые используются как в отожженном, так и в термоупрочненном состоянии для тяжело нагруженных конструкций.

Известна сварочная титановая проволока сплошного сечения, содержащая следующие элементы, мас. %: алюминий - 3,5 ... 4,5; ванадий - 2,5 ... 3,5; цирконий - 1,0 ... 2,0; титан - остальное (Авт. св. СССР №188277).

Недостатком проволоки этого состава является то, что она не обеспечивает прочности сварного шва выше 800 МПа и поэтому не может быть использована при сварке сплавов, имеющих предел прочности свыше 800 МПа.

Известны также проволоки, имеющие в своем составе олово при следующем соотношении компонентов, мас. %:

- а) алюминий - 6,0 ... 7,5; цирконий - 0,5 ... 2,0; олово - 0,5 ... 2,0; молибден - 1,5 ... 2,7; вольфрам - 0,2 ... 1,2; кремний - 0,1 ... 0,35; хром - 0,2 ... 0,5; рений - 0,05 ... 0,1; титан - остальное (Патент Франции №2213986).
- б) алюминий - до 10; олово - до 10; цирконий - до 10; ванадий - до 5; молибден - до 5; ниобий - до 5; титан - остальное (Патент ФРГ №1276333).

Недостатком проволок указанных составов является то, что они не обеспечивают в сварных соединениях необходимого комплекса механических свойств. В частности, при изменении содержания легирующих элементов по верхнему и нижнему пределам, снижается либо прочность, либо пластичность металла шва по сравнению с основным металлом, что не позволяет использовать эти проволоки для сварки ответственных изделий.

Известна проволока, выполненная на основе титанового сплава, выбранная в качестве прототипа, которая содержит следующие компоненты, мас. %: алюминий - 3,0 ... 5,5; молибден - 2,0 ... 3,5; ванадий - 1,5 ... 3,5; ниобий - 2,5 ... 4,5; цирконий - 1,0 ... 2,0; рений - 0,05 ... 0,5; титан - остальное (Авт. св. СССР №653844).

Недостатком проволоки этого состава является повышенная жесткость, из-за которой, даже при наличии правильного механизма, в процессе подачи проволоки в зону сварки наблюдается отклонение ее от оси дуги, и, как следствие, появляются несплавления.

Общим недостатком, присущим проволокам приведенных выше составов и прототипу являются низкие сварочно-технологические свойства, приводящие к появлению при многопроходной сварке межслойных несплавлений, макро- и микропористости. Такие дефекты снижают механические свойства при статических и, особенно, при динамических нагрузках.

Наличие указанных недостатков приводит к необходимости выполнять конструктивные утолщения в зоне сварного шва для того, чтобы обеспечить равнопрочность сварного шва и основного металла. Это в свою очередь влечет за собой значительное увеличение материалоемкости и стоимости сварных изделий.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствовать известный присадочный материал за счет изменения самой конструкции присадочного материала, введения титанового сплава в качестве металлической составляющей сердечника присадочного материала, введения в сердечник фторидов щелочноземельных и редкоземельных элементов, выбора соотношения между ними, нового количественного состава металлической составляющей сердечника и выбора материала оболочки, что позволяет повысить сварочно-технологические свойства присадочного материала и тем самым получить в шве такой же комплекс механических свойств, как и основного металла в состоянии после сварки и после упрочняющей термообработки.

Сущность изобретения заключается в том, что присадочный материал на основе титанового сплава, содержащего алюминий, молибден, ванадий, ниобий и цирконий выполнен в виде порошковой проволоки, при этом титановый сплав введен в качестве металлической составляющей сердечника, который дополнительно содержит фториды щелочноземельных и редкоземельных элементов, взятых в соотношении 2 : 1 в количестве 6 - 18 мас. %, а оболочка порошковой проволоки выполнена из титана при следующем соотношении элементов металлической составляющей сердечника, мас. %:

Алюминий	4,5 - 7,0
Ванадий	3,0 - 5,0
Молибден	3,0 - 5,0
Ниобий	5,0 - 6,0
Цирконий	2,0 - 3,0
Титан	Остальное

При этом коэффициент заполнения порошковой проволоки составляет 68 - 72%.

В качестве фторида щелочноземельного элемента может быть введен фторид кальция; в качестве фторида щелочноземельного элемента - фторид бария; в качестве фторида щелочноземельного элемента - фторид стронция; в качестве фторида редкоземельного элемента - фторид лантана; в качестве фторида редкоземельного элемента - фторид церия; в качестве фторида редкоземельного элемента - фторид иттрия.

Предложенный сварочный материал предназначен для выполнения сварных швов с прочностью от 900 до 1400 МПа (в зависимости от состава основного металла и термической обработки сварных соединений).

Введение фторидов группы щелочноземельных металлов, например, фторидов кальция, стронция, бария, устраняет пористость и улучшает отделимость шлака от металла шва, предотвращая появление шлаковых включений при многопроходной сварке. Фториды группы редкоземельных металлов, например, лантана, церия, иттрия, рафинируют расплавленный металл шва от примесей внедрения, повышая в итоге ударную вязкость металла шва.

Экспериментально было установлено оптимальное соотношение фторидов щелочноземельных элементов к фторидам редкоземельных элементов в количестве 2 : 1, при любом сочетании хотя бы одного из фторидов щелочноземельного элемента и хотя бы одного из фторидов редкоземельного элемента (из приведенного выше ряда) во флюсовой составляющей сердечника присадочного материала. Увеличение этого соотношения сохраняет способность флюсовой составляющей сердечника устранять поры и улучшать отделимость шлаковой корки, однако при этом резко падает ее рафинирующая способность. Если это соотношение менее 2 : 1, то снижается способность флюсовой составляющей сердечника предупреждать возникновение пор в сварных швах и улучшать отделимость шлаковой корки, т.е. ухудшаются сварочно-технологические свойства присадочного материала. При этом сохраняются рафинирующие свойства фторидов редкоземельных элементов.

Система легирования и содержание легирующих элементов в металлической составляющей сердечника позволяет исключить (как в процессе охлаждения после сварки, так и в последующей термообработке сварного соединения) возникновение в швах промежуточной охрупчивающей ω -фазы и получить благоприятное соотношение α - и β -фаз.

Алюминий введен как сильно упрочняющий α -стабилизатор. Молибден и ванадий введены для образования в металле шва определенного количества стабильной β -фазы и ее существенного упрочнения. Эти элементы по сравнению с другими не создают охрупчивающих фаз, возникающих в результате эвтектоидных и перетектоидных реакций. Ниобий введен для упрочнения β -фазы и, главным образом, повышения пластичности α -фазы. Цирконий введен для измельчения структуры металла шва как в отожженном, так и в термоупрочненном состоянии. При этом несколько повышается прочность без снижения пластичности. Помимо этого, цирконий несколько увеличивает параметр решетки α - и β -фаз и, в результате, снижает вредное влияние кислорода.

При выборе состава металлической составляющей сердечника присадочного материала учитывали содержание материала оболочки проволоки (как правило, низколегированного титанового сплава, например, BT1-00) при формировании состава металла шва. Содержание легирующих элементов в металле шва должно быть равным, или несколько превышать их содержание в шве при сварке с использованием прототипа. В табл.1 приведено содержание легирующих элементов в металлической составляющей сердечника и в наплавленном металле (с учетом материала оболочки проволоки).

Масса материала оболочки присадочного материала составляет 28 - 30% от общей массы.

Составы металлической составляющей сердечника 2, 3, 4 обеспечивают содержание легирующих элементов в металле шва, соответствующее содержанию этих элементов в проволоке-прототипе.

Состав 2 - проволока $\varnothing 2,5$ мм, масса оболочки составляет 32% от общей массы.

Состав 3 - проволока $\varnothing 2,7$ мм, масса оболочки составляет 30% от общей массы.

Состав 4 - проволока $\varnothing 3,0$ мм, масса оболочки составляет 28% от общей массы.

Состав 1 уменьшает количество легирующих элементов в шве по сравнению с прототипом.

Состав 5 увеличивает содержание легирующих элементов по сравнению с прототипом.

Исходя из экспериментальных данных 1 был выбран следующий состав сплава для металлической составляющей сердечника присадочного материала (порошковой проволоки), мас. %:

Алюминий	4,5 - 7,0
Ванадий	3,0 - 5,0
Молибден	3,0 - 5,0
Ниобий	5,0-6,0
Цирконий	2,0 - 3,0
Титан	Остальное

При содержании легирующих элементов менее указанных нижних пределов присадочный материал не обеспечивает необходимой прочности шва, которая снижается до 700 - 750 МПа, так как не достигается необходимый фазовый состав металла шва и степень легирования α - и β -фаз.

При содержании легирующих элементов выше указанных верхних пределов нарушается благоприятное сочетание и химический состав α - и β -фаз, что снижает пластичность и ударную вязкость металла шва.

Соотношение флюсовой и металлической составляющей сердечника порошковой проволоки выбиралось из условия обеспечения максимальной производительности процесса сварки (коэффициента наплавки) при сохранении способности присадочного материала предупреждать появление пор и рафинировать металл шва.

При содержании флюсовой составляющей в сердечнике проволоки менее 6 мас.% существенно снижается рафинирующая способность присадочного материала и возникает опасность появления пор при сварке.

При содержании флюсовой составляющей в сердечнике проволоки более 18% уменьшается коэффициент наплавки и увеличивается трудоемкость процесса сварки (за счет удаления большего количества шлака с поверхности шва. В табл.2 приведены составы (мас.%) присадочных материалов с учетом содержания флюсовой составляющей сердечника.

Составы 2а, 2в, 2с - присадочный материал в виде порошковой проволоки, предназначенный для сварки низколегированных титановых сплавов с пределом прочности до 900 МПа в состоянии после сварки (например, BT-6, IMI 318, Grade 5). Величина ударной вязкости швов составляет 400 - 800 МДж/м², а предел прочности 810 - 900 МПа. Составы 3а, 3в, 3с - присадочный материал в виде порошковой проволоки, предназначенный для сварки среднелегированных титановых сплавов с пределом прочности до 1100 МПа в термоупрочненном состоянии (например, IMI 662, IMI 646).

Составы 4а, 4в, 4с - присадочный материал в виде порошковой проволоки, предназначенный для сварки высоколегированных титановых сплавов с пределом прочности до 1400 МПа в термоупрочненном состоянии (например, BT22, BT23).

Экспериментально установлено, что предлагаемый присадочный материал обеспечивает (по сравнению с прототипом) равнопрочность сварных соединений различных типов сплавов как в состоянии после отжига, так и в термоупрочненном состоянии при благоприятном сочетании прочности и пластичности. При этом повышается ударная вязкость шва и малоцикловая усталость сварочного соединения.

В табл.3 приведены механические свойства сварных швов.

Таким образом, предлагаемый присадочный материал устраняет недостатки аналогов и прототипа и обеспечивает следующие преимущества:

1) позволяет получать наплавленный металл заданного хим. состава за счет варьирования количества металлической составляющей сердечника (преимущественно в виде гранул титанового сплава).

2) предупреждает образование в швах дефектов и повышает механические свойства сварного соединения за счет повышения степени легирования металла шва;

3) улучшает технологические свойства присадочного материала за счет увеличения номенклатуры типоразмеров присадочного материала и уменьшения его жесткости.

Таблица 1

№ состава	1		2		3		4		5		Прототип
Содержание Элемент	в сердеч- нике	в шве	в сердеч- нике	в шве	в сердеч- нике	в шве	в сердеч- нике	в шве	в сердеч- нике	в шве	
Алюминий	4,0	2,7	4,5	3,1	5,5	3,9	7,0	5,0	8,0	5,3	3,0-5,5
Ванадий	2,5	1,8	3,0	2,0	4,0	2,8	5,0	3,6	6,0	4,0	1,5-3,5
Молибден	2,5	1,8	3,0	2,0	4,0	2,8	5,0	3,6	6,0	4,0	2,0-3,5
Ниобий	4,5	3,0	5,0	3,4	5,5	3,9	6,0	4,3	7,0	4,7	2,5-4,5
Цирконий	1,5	1,0	2,0	1,4	2,5	1,8	3,0	2,2	4,0	2,7	1,0-2,0
Титан	85	89,7	82,5	88,1	78,5	84,8	74	81,3	69	77,3	81-90

Таблица 2

Состав Компонент	2а	2в	2с	в шве	3а	3в	3с	в шве	4а	4в	4с	в шве
Алюминий	2,9	-"	-"	3,1	3,4	-"	-"	3,9	4,1	-"	-"	5,0
Ванадий	1,9	-"	-"	2,0	2,5	-"	-"	2,8	3,0	-"	-"	3,6
Молибден	1,9	-"	-"	2,0	2,5	-"	-"	2,8	3,0	-"	-"	3,6
Ниобий	3,2	-"	-"	3,4	3,4	-"	-"	3,9	3,6	-"	-"	4,3
Цирконий	1,3	-"	-"	1,5	1,5	-"	-"	1,8	1,8	-"	-"	2,2
Фторид щелочно- земельный	CaF ₂	BaF ₂	SrF ₂	-	CaF ₂	BaF ₂	SrF ₂	-	CaF ₂	BaF ₂	SrF ₂	-
Фторид редкозе- мельный	LaF ₃	CeF ₃	YF ₃	-	LaF ₃	CeF ₃	YF ₃	-	LaF ₃	CeF ₃	YF ₃	-
Титан	82,8	-"	-"	88,0	74,7	-"	-"	84,8	66,5	-"	-"	81,3

Таблица 3

Состоян. металла	Марка сплава	№ состава присадки	Предел прочн., МПа	Ударная вязкость, МДж/м ²	Милоцикло- вая уста- лость (количество циклов до разруше- ния при σ_{max} = 735 МПа)	Наличие пор
Отжиг	BT6	1	1100	610	21500	-
	IMI318					
Отжиг	Grude5	Прототип	960	550	18100	+
	IMI662	2	1150	600	22400	-
	IMI646	Прототип	950	510	19400	+
Т/о	-"	2	1310	620	23400	-
		Прототип	1250	510	22100	+
Отжиг	BT23	3	1107	680	23700	-
	BT22	Прототип	980	635	22300	+
Т/о	-"	3	1180	680	26700	-
		Прототип	1100	450	24200	+