

ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ22

С. Л. ШВАБ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО, С. В. АХОНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В статье приведены результаты исследований влияния фторидов редкоземельных металлов на структурные изменения металла шва титанового сплава ВТ22 с целью использования их в составе флюсового наполнителя опытной порошковой проволоки для сварки этого сплава. Показано, что в швах, выполненных аргонодуговой сваркой на сплаве ВТ22 по флюсу, состоящему из фторидов редкоземельных металлов, наблюдается измельчение β -зерен. Введение LaF_3 в сердечник опытной порошковой титановой проволоки ППТ-22 в комплексе с термической обработкой позволило повысить ударную вязкость сварных швов при аргонодуговой сварке сплава ВТ22 в 2 раза — до 30,6 Дж/см². Библиогр. 8, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ22, фториды редкоземельных металлов, порошковая проволока

Аргонодуговая сварка (АДС) является наиболее универсальным способом соединения конструкций из титановых деталей, так как позволяет осуществлять сварку в различных пространственных положениях, быстро перенастраивать оборудование при изменении типа соединения и толщины свариваемого металла [1, 2]. В связи с высокой химической активностью титан при повышенных температурах и особенно в расплавленном состоянии активно поглощает кислород и азот, что приводит к резкому снижению пластичности. Поэтому качество сварных соединений определяется, главным образом, надежностью защиты зоны сварки, а основной трудностью при сварке титана является обеспечение надежной защиты от атмосферы не только сварочной ванны и корня шва, но и остывающих участков сварного соединения, нагретых выше 400 °С, т. е. до тех температур, при которых начинается заметное взаимодействие титана с газами — кислородом, водородом и азотом.

Одним из преимуществ сварки титана с использованием флюсов является наличие оболочки расплавленного флюса, покрывающего зону сварки и защищающего ее от вредного влияния O_2 , H_2 и N_2 . В процессе сварки протекают металлургические реакции, которые могут привести к обогащению шва этими вредными примесями. Поэтому одно из требований при сварке титана к флюсовым системам — это отсутствие оксидов в них. Доказано [3], что удаление из флюса оксидов позволяет ограничить в наплавленном металле содержание кислорода менее 0,1 %.

Основные требования, предъявляемые к флюсу для сварки титана, определяются, в первую очередь, сравнительно высокой температурой плавления титана, поэтому сварочные флюсы для него должны отличаться повышенной тугоплавкостью

[3]. Во избежание насыщения шва водородом флюс должен иметь минимальную гигроскопичность; обеспечивать стабильность дугового разряда в процессе сварки, а после окончания ее — легкую отделимость шлаковой корки от застывшего металла шва, что является одним из критериев технологичности флюсовой системы.

С точки зрения технологичности ни один из фторидов щелочных и щелочноземельных металлов не пригоден в качестве однокомпонентного флюса. Поэтому в качестве флюсов при сварке титана применяют многокомпонентные системы, состоящие из фторидов щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов, а также хлоридов щелочноземельных металлов [3].

Применение фторидных флюсов при АДС титана приводит к уменьшению размеров сварочной ванны, сокращению времени существования металла в расплавленном состоянии, а также связывает водород в нерастворимые в металле соединения TiF_xH_y , что снижает вероятность возникновения зародышей газовой фазы в сварочной ванне и тормозит образование пор в жидком титане.

Важное свойство фторида кальция во флюсовой системе — это способность интенсивно взаимодействовать с водяным паром с образованием фтористого водорода. Возможность удаления влаги из зоны сварки и, благодаря этому, защиты металла шва от насыщения водородом и кислородом является важной особенностью сварки титана под флюсом на основе CaF_2 . Поэтому, за основу флюсовой системы авторами данной работы был выбран этот компонент.

Экспериментальным методом было установлено, что при сварке с BaF_2 отмечается характерная особенность шлаковой корки. Она легко скалывается целыми кусками с поверхности соединения. С этой целью необходимо введение этого компонента во флюсовую систему.

Таблица 1. Физические свойства компонентов флюсовой системы

Свойства компонентов	CaF ₂	SrF ₂	BaF ₂
Температура, °С плавления кипения	1411 2500	1473 2460	1280 2260
Плотность, г/см ³	3,18	4,18	4,83
Теплота образования, кДж/моль	608	1222	599,1

Для повышения тугоплавкости флюсовой системы необходимо ввести компонент с повышенной температурой плавления (табл. 1). Известно [4], что системы CaF₂-BaF₂, CaF₂-SrF₂ и SrF₂-BaF₂ представляют собой непрерывный ряд твердых растворов. Наиболее тугоплавкая из них — система CaF₂-SrF₂. Следовательно, переход от двухкомпонентной системы CaF₂-BaF₂ к системе CaF₂-SrF₂-BaF₂ должен привести к повышенной температуре плавления флюса.

Изучив влияние фторидов щелочных и щелочноземельных металлов на процесс сварки титана, авторами данной работы была выбрана система CaF₂-SrF₂-BaF₂, которая послужила флюсовой основой в сердечнике порошковой проволоки ППТ-22 для сварки титанового сплава ВТ22. Данная проволока состоит из оболочки из титанового сплава ВТ1 и сердечника (гранулы из сплава ВТ22 и флюсовая составляющая) [5].

В работе [3] была исследована возможность рафинирования металла шва введением во флюс таких активных к кислороду и азоту элементов, как церий, лантан, иттрий в виде фторидов. Наиболее активное рафинирующее действие оказывает иттрий, наименьшее — церий, промежуточное положение занимает лантан. Установлено, что для рафинирования металла шва во флюс следует вводить не более 10 % этих фторидов. Тогда содержание кислорода в металле шва составит 0,09 % и с дальнейшим повышением количества LaF₃ или YF₃ во флюсе останется постоянным.

Авторы работы [6] исследовали возможность модифицирования металла швов с помощью флюсов, содержащих фториды редкоземельных металлов. В работе показано, что при сварке титанового β-сплава ВТ15 под флюсом, содержащим LaF₃, наблюдается измельчение структуры шва, повышение механических свойств металла шва и снижение в нем содержания кислорода. При этом отмечено повышение его пластических свойств и ударной вязкости. Химико-спектральным методом было установлено, что металлургическое взаимодействие жидкого металла и расплавленного флюса, в состав которого входит LaF₃, сопровождается переходом лантана в металл шва.

В настоящей работе было исследовано влияние фторидов редкоземельных металлов на структурные изменения металла шва сплава ВТ22 с целью

использования их в составе флюсового наполнителя порошковой проволоки ППТ-22.

Особенности воздействия фторидов редкоземельных металлов при сварке на структурные изменения в металле швов сплава ВТ22. Исследования осуществляли на сварных образцах толщиной 6 мм из сплава ВТ22, полученных методом АДС по флюсу за один проход и без применения флюса. Эксперименты проводили с фторидами редкоземельных металлов LaF₃ и YF₃ на режиме: $I_{св} = 200$ А, $v_{св} = 8$ м/ч, $L_d = 2$ мм, $U_d = 12,5...13,0$ В.

Сравнение макроструктуры полученных наплавов показало, что при сварке по флюсам LaF₃ и YF₃ формы швов между собой не отличаются, ширина шва в обоих случаях составляет 13,5 мм. В шве, выполненном АДС без флюса, максимальная глубина проплавления составляет 2,5 мм и ее максимум находится по оси шва, а в случае АДС по флюсам LaF₃ и YF₃ проплавление находится на этом же уровне и практически одинаково по всей ширине шва (рис. 1).

Во всех трех вариантах после сварки металл шва состоит из зерен β-фазы разного размера и формы. Большинство β-зерен имеют неравноосную форму, коэффициент формы зерна (отношение длины к ширине) составляет от 1 до 5, зерна вытянуты в вертикальном или же близком к вертикали направлении (рис. 2, а, в, д).

Известно [7], что межосевые и междендритные промежутки в металле шва в большей степени обогащены β-стабилизаторами, чем внутренние объемы осей, поэтому наиболее интенсивный распад β-фазы происходит во внутренних объемах как наименее стабильных участках. Наиболее интенсивный распад β-твердого раствора после сварки произошел в шве, выполненном АДС без применения флюса (рис. 2, д). Очевидно, что условия охлаждения металла швов, выполненных с применением флюсов, отличаются от условий охлаждения металла швов, выполненных без применения флюсов.

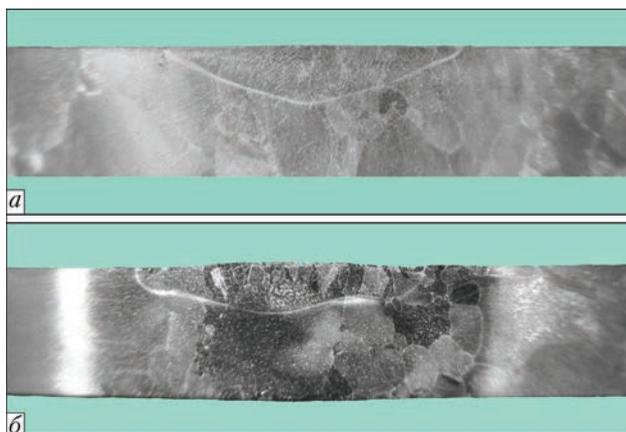


Рис. 1. Макрошлифы сварных соединений сплава ВТ22, выполненных АДС: а — без применения флюса; б — по флюсу YF₃

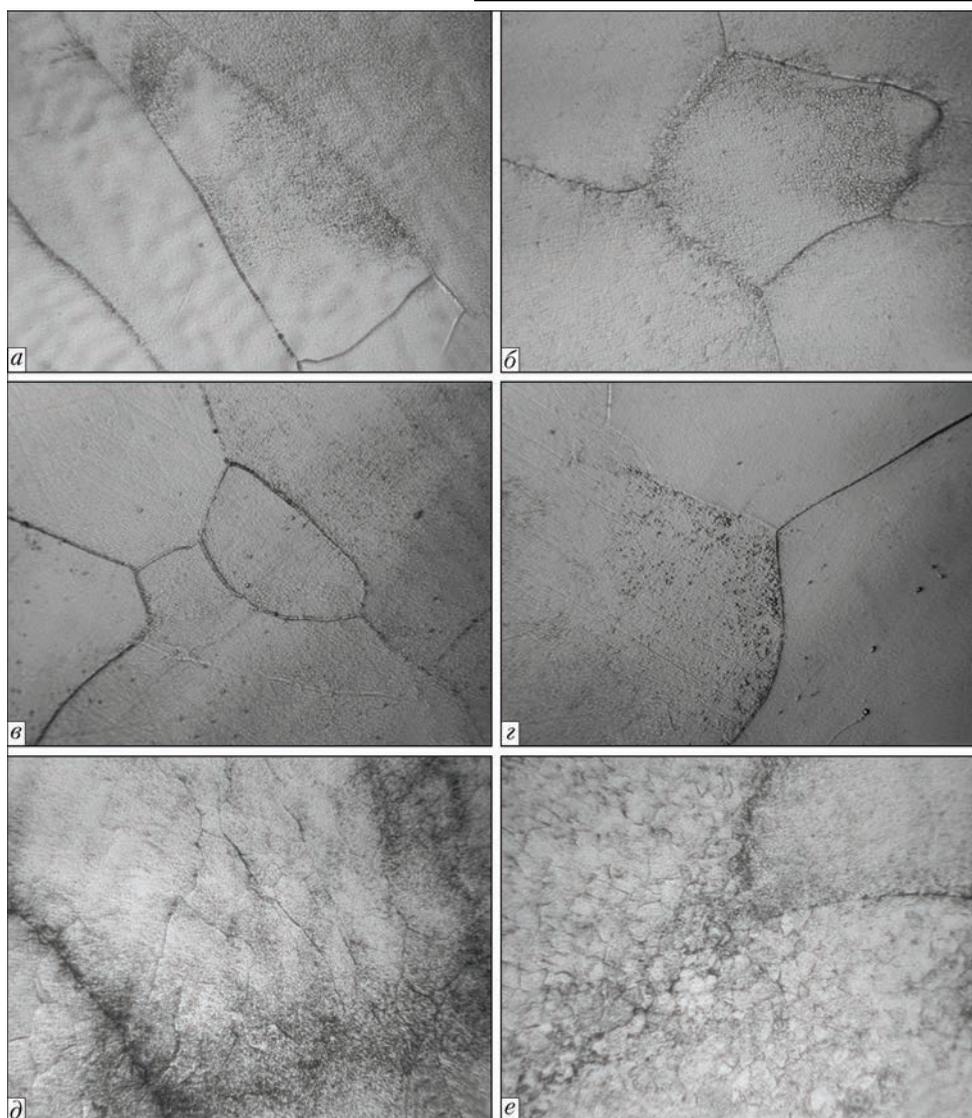


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) сварных соединений: *a* — шов, выполненный АДС по флюсу YF_3 ; *б* — ЗТВ образца с YF_3 ; *в* — шов, выполненный АДС по флюсу LaF_3 ; *г* — ЗТВ образца с LaF_3 ; *д* — шов, выполненный АДС без флюса; *е* — ЗТВ образца без флюса

Интенсивность распада β -фазы в швах сплава ВТ22 зависит от скорости охлаждения после сварки, и чем выше скорость охлаждения, тем ниже интенсивность распада. Например, в швах сплава ВТ22, выполненных ЭЛС и характеризующихся очень высокой скоростью охлаждения, фиксируется метастабильная β -фаза, в то время как в швах, выполненных ЭШС и отличающихся значительно меньшей скоростью охлаждения, происходит значительный распад β -фазы. После АДС с применением фторидов иттрия и лантана интенсивность распада β -твердого раствора меньше, чем после АДС без флюса. Анализ структур подтверждает известный факт, что скорость охлаждения металла шва, выполненного с использованием флюсов, выше.

Помимо различия в интенсивности распада β -фазы в швах, можно отметить, что в нижней части шва и, особенно, в ЗТВ образца, сваренного АДС без флюса, сильно развиты полигонизационные процессы. Крупные зерна β -фазы после АДС

без применения флюса имеют развитую субструктуру (рис. 2, *д*, *е*) в отличие от образцов, сваренных АДС по флюсам LaF_3 и YF_3 (рис. 2, *а-г*). В результате действия сварочных деформаций в крупных β -зернах отдельные фрагменты зерна разворачиваются друг относительно друга на угол в несколько градусов, образуя субструктуру.

Необходимо отметить, что в швах, выполненных АДС по флюсу, состоящему из фторида редкоземельного металла (LaF_3 или YF_3), в состоянии после сварки наблюдается измельчение β -зерен по сравнению с АДС без применения флюса. Анализ распределения зерен в швах по площади их поперечного сечения показал, что микроструктура металла шва, выполненного АДС без применения флюса, состоит из небольшого числа больших β -зерен, а в швах, выполненных с применением фторидов как иттрия, так и лантана, число мелких зерен значительно выше, чем в шве, выполненном без применения флюса. К примеру, в шве, по-

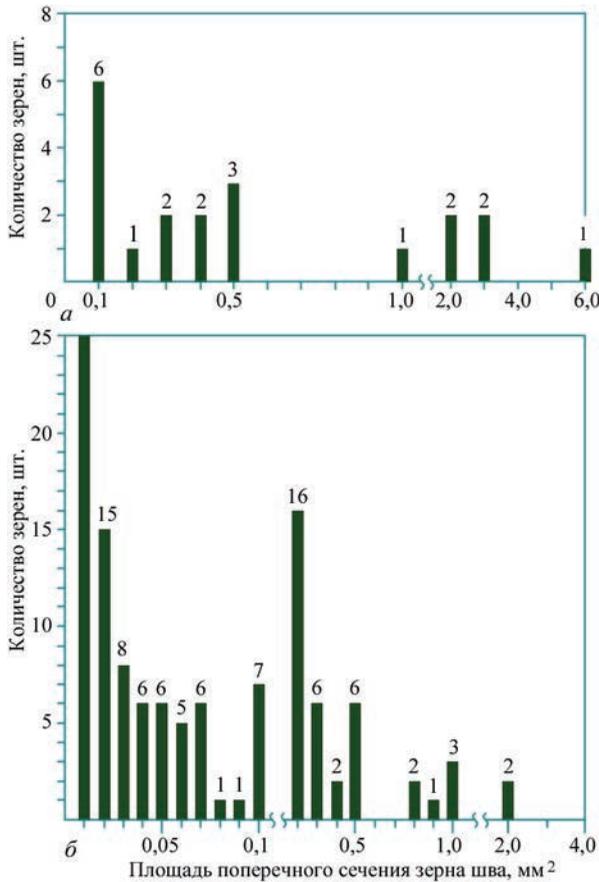


Рис. 3. Гистограммы распределения количества зерен в швах сплава VT22 в зависимости от площади их поперечного сечения: а — АДС без флюса; б — АДС по флюсу YF₃

лученном с фторидом редкоземельного металла, проявляется в 10 раз больше зерен площадью до 0,1 мм², в сравнении с таким же участком шва, полученном без участия лантана или иттрия (рис. 3).

Показатели микротвердости (рис. 4) швов, выполненных с LaF₃ и YF₃, находятся на уровне 3450 МПа, что на 150 МПа выше от показателей

Таблица 2. Параметры режимов сварки образцов

Номер прохода	I _{св} , А	U _д , В	v _{св} , М/ч	v _{под} , М/ч
1	180	10,5	9	24
2, 3	200	12,0	9	30

швов, выполненных без введения редкоземельных элементов и ближе к значениям микротвердости основного металла (3800 МПа).

Таким образом, применение редкоземельных элементов при сварке двухфазного (α+β)-титанового сплава VT22 при значениях микротвердости шва, близких к основному металлу, приводит к измельчению β-зерен шва, что, в свою очередь, дает предпосылки к увеличению пластичности сварного шва. Поэтому авторы данной работы исследовали введение фторидов редкоземельных элементов во флюсовую содержащую порошковой проволоки для сварки титанового сплава VT22.

Сварка и термическая обработка сплава VT22 с присадочной проволокой, содержащей редкоземельные элементы. Сварку выполняли на пластинах из сплава VT22 толщиной 8 мм, в три прохода с разделкой кромок в 90° (табл. 2). При сварке использовали внешнее поперечное переменное магнитное поле (частота 20 Гц, величина магнитной индукции 4 мТл) для перемещения столба дуги и, соответственно, сварочной ванны поперек шва. В качестве присадочного материала применяли опытную порошковую проволоку ППТ-22 диаметром 2,9 мм. Во флюсовый наполнитель проволоки был введен флюс системы CaF₂-SrF₂-BaF₂-LaF₃.

Результаты механических испытаний сварного соединения (табл. 3) показали, что предел прочности металла шва с участием LaF₃ ниже, чем без него, однако ударная вязкость сварного соединения с LaF₃ выше на 30 %, что может быть обусловлено мелкозернистой структурой металла шва. Следует отметить, что все образцы на растяжение разрушились не по шву, а за его границами, по ЗТВ.

Для повышения механических свойств сварных соединений из титанового сплава VT22 их подвергают термической обработке (ТО). ТО титановых сплавов основана главным образом на полиморфном α↔β-превращении. В результате ТО структура стабилизируется, значительно по-

Микротвердость, МПа

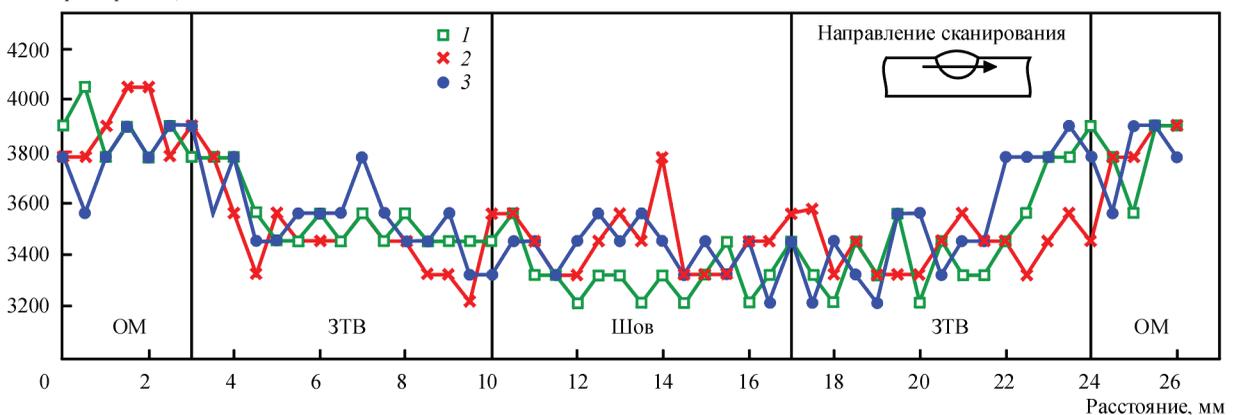


Рис. 4. Микротвердость сварных соединений, выполненных АДС без флюса (1), по флюсу YF₃ (2) и по флюсу LaF₃ (3)

Таблица 3. Результаты механических испытаний сварных соединений после сварки

Место испытаний	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
Основной металл	1039,7*	32,6
Сварное соединение с LaF ₃	865,3	8,9
Металл шва без LaF ₃ [5]	1065,1	5,9

* Приведены результаты испытаний трех образцов.

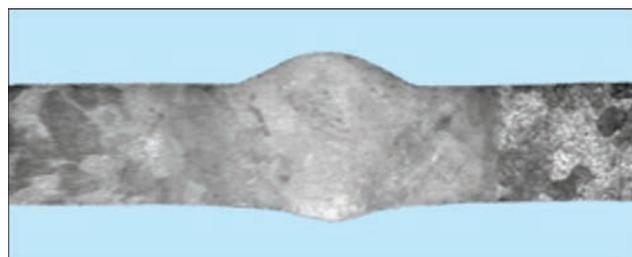


Рис. 5. Макрошлиф сварного соединения, полученного с порошковой проволокой ППТ-22 после двухступенчатой ТО.

вышается пластичность и ударная вязкость швов. Одновременно с этим снижаются внутренние напряжения, возникающие в процессе сварки.

У сплава VT22 со значительным содержанием β -фазы при ТО происходят не только процессы рекристаллизации, но и существенно изменяется фазовый состав. Это в значительной степени влияет на механические свойства. Изменения фазового состава регламентируются скоростями охлаждения, а также различными ступенчатыми циклами нагрева.

При выборе режима ТО необходимо учитывать температуру рекристаллизации, влияющей на характер фазовых превращений. Исходя из анализа литературных данных [7, 8], был выбран достаточно технологически простой процесс ТО сварных соединений, выполненных с использованием присадочной порошковой проволоки: выдержка в печи при температуре 750 °С в течение 1 ч, охлаждение с печью.

Исследование макроструктуры металла шва после отжига показало, что отжиг способствовал формированию однородной и равномерной структуры металла по высоте шва (рис. 5).

Анализ полученных результатов механических испытаний образцов показывает положительное суммарное влияние ТО при введении LaF₃ во флюсовый наполнитель. В результате при незначительном уменьшении прочности (на 10 %), в сравнении с образцами без введения редкоземельных элементов, ударная вязкость соединения с LaF₃ в 2 раза выше, чем без его введения, и на 35 % выше показателей основного металла (табл. 4).

Результаты исследований показывают, что введение редкоземельных элементов во флюсовую составляющую порошковой проволоки для сварки титанового сплава VT22 оказывает влияние на

Таблица 4. Результаты механических испытаний после ТО основного металла и сварного соединения

Место испытаний	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
Основной металл	1057,5*	19,6
Сварное соединение с LaF ₃	955,4	30,6
Сварное соединение без LaF ₃ [5]	1121,6	14,8

* Приведены результаты испытаний трех образцов.

структурные особенности формирования сварного шва, а именно, увеличение количества мелких зерен. Показано, что ТО сварных соединений из сплава VT22, выполненных многопроходной сваркой с опытной присадочной проволокой ППТ-22, способствовала увеличению ударной вязкости соединений в 2,5 раза. Введение в проволоку LaF₃ позволило добиться увеличения ударной вязкости еще в 2 раза (до 30,6 Дж/см²), что выше показателей основного металла.

Список литературы

- (2003) *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Leyens C., Peters M. (ed.). Wiley-VCH, Germany.
- Иноземцев А. А., Башкатов И. Г., Коряковцев А. С. (2010) *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. Москва, ВИАМ.
- Гуревич С. М., Замков В. Н., Блащук В. Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд., доп. и перераб. Киев, Наукова думка.
- Посыпайко В. И., Алексеева В. А. (ред.) (1977) *Диаграммы плавкости солевых систем. Справочник*. Ч. 1. Москва, Metallurgy.
- Прилуцкий В. П., Шваб С. Л., Петриченко И. К. и др. (2016) Аргодуговая сварка титанового сплава VT22 с использованием присадочной порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*, **9**, 10–14.
- Гуревич С. М., Замков В. Н., Загребенюк С. Д., Кушнirenко Н. А. (1964) Влияние флюсов, содержащих редкоземельные элементы, на структуру и свойства сварных швов сплава VT15. *Автоматическая сварка*, **4**, 93–94.
- Грабин В. Ф. (1975) *Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Лясцкая В. С. (2003) *Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов*. Москва, Экомет.

References

- (2003) *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Ed. by C. Leyens. Germany, Wiley-VCH.
- Inozemtsev, A.A., Bashkatov, I.G., Koryakovtsev, A.S. (2010) *Modern titanium alloys and problems of their development*. Moscow, VIAM [in Russian].
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. 2nd ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- (1977) *Diagrams of meltability of salt systems: Refer. book; Pt 1*. Ed. by Posypajko, V.I. et al. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Prilutsky, V.P., Schvab, S.L., Petrychenko, I.K. et al. (2016) Argon arc welding of titanium VT22 alloy using filler flux-cored wire. *The Paton Welding J.*, **9**, 9-13.
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Zagrebennyuk, S.D. et al. (1964) Influence of fluxes containing rare-earth elements on structure and properties of welds of VT15 alloy. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 93-94 [in Russian].
- Grabin, V.F. (1975) *Basics of physical metallurgy and heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

8. Lyasotskaya, V.S. (2003) *Heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Moscow, Ekomet [in Russian].

С. Л. Шваб, І. К. Петриченко, С. В. Ахонін

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ФЛЮСІВ, ЩО МІСТЯТЬ З'ЄДНАННЯ
РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НА СТРУКТУРУ
І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ
ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22

У статті наведено результати досліджень впливу фторидів рідкісноземельних металів на структурні зміни металу шва титанового сплаву VT22 з метою використання їх у складі флюсового наповнювача дослідного порошкового дроту для зварювання цього сплаву. Показано, що в швах, виконаних аргонодуговим зварюванням на сплаві VT22 по флюсу, що складається з фторидів рідкісноземельних металів, спостерігається подрібнення β-зерен. Введення LaF₃ в осердя дослідного порошкового титанового дроту ППТ-22 в комплексі з термічною обробкою дозволило підвищити ударну в'язкість зварних швів при аргонодуговому зварюванні сплаву VT22 у 2 рази — до 30,6 Дж/см². Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: титановий сплав VT22, фториди рідкісноземельних металів, порошковий дріт

S.L. Schwab, I.K. Petrychenko, S.V. Akhonin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

INFLUENCE OF RARE-EARTH ELEMENTS
ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDS
OF TITANIUM ALLOY VT22

The article presents the results of investigations of influence of rare-earth metal fluorides on structural changes in the metal of a titanium alloy VT22 for the purpose of using them in the flux filler of an experimental flux-cored wire for welding this alloy. It was shown that in welds made by argon-arc welding on VT22 alloy along the flux consisting of fluorides of rare-earth metals, the refinement of β-grains is observed. The introduction of LaF₃ into the core of the experimental flux-cored titanium wire PPT-22 in combination with heat treatment allowed increasing the impact toughness of welds in argon-arc welding of VT22 alloy by 2 times — to 30.6 J/cm². 8 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: titanium alloy VT22, rare-earth metals fluorides, flux-cored wire

Поступила в редакцію 31.01.2018

Вниманию читателей!

Вышел в свет первый выпуск информационного бюллетеня ассоциации «Электрод» (www.assotitation-electrode.com) за I кв. 2018 г.

В номере:

Семинар в ИЭС им. Е.О.Патона (по результатам участия в выставке «Schweissen & Schneiden 2017») XVI Международный промышленный форум-2017 Конференция Общества сварщиков Украины Мазур А.А., Липодаев В.Н., Пустовойт С.В. Петрук В.С. Современное состояние рынка сварочного оборудования и материалов в Украине Белый А.И., Жудра А.П., Дзыкович В.И. Разработка электродов для наплавки композиционных сплавов Зверева И.Н., Картунов А.Д., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емельюшин А.Н. Особенности структуры и свойств сварных швов трубной стали, выполненных электродами различных марок Поздравляем! Именинники января, февраля, марта Представляем новых членов Ассоциации: (интервью с Генеральным директором ОЗСО ИЭС им. Е.О.Патона А.В. Степахно) Сварочный календарь событий Календарь выставок и конференций в 2018 г.



Информационная поддержка — журнал «Автоматическая сварка».