

ПРИСАДОЧНАЯ ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ TIG СВАРКИ И НАПЛАВКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22

С.В. Ахонин, С.Л. Шваб

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

Рассмотрен подход к выбору присадочного материала для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (способ TIG) титанового сплава VT22. Показано, что металл шва, полученный с применением опытной порошковой проволоки ППТ-22, является представителем переходного класса титановых сплавов, к которым относится сплав VT22 (коэффициент β -стабилизации такого металла равен 1). Данная проволока может использоваться для аргонодуговой сварки высокопрочного титанового сплава VT22. Механические свойства таких сварных соединений после термической обработки достигают уровня показателей основного металла. Применение проволоки ППТ-22 при восстановительной аргонодуговой наплавке деталей из сплава VT22 обеспечивает их высокие эксплуатационные характеристики. Библиогр. 15, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: титановый сплав VT22, порошковая проволока, TIG сварка, восстановительная наплавка

Механические характеристики сварных соединений высокопрочных сплавов титана, в частности сплава VT22, значительно ниже, чем у основного металла, поэтому для компенсации низкой прочности и пластичности металла шва применяют конструктивное утолщение металла в зоне сварки. Это в свою очередь приводит к значительному увеличению материалоемкости и стоимости сварных изделий. Поэтому получение равнопрочного сварного соединения является актуальной задачей.

В связи с характером воздействия на титан различных легирующих элементов промышленные сплавы по типу структуры подразделяются на следующие группы: α -сплавы, псевдо- α -сплавы (сплавы на основе α -фазы с небольшим количеством β -фазы), $(\alpha+\beta)$ -сплавы, псевдо- β -сплавы (сплавы на основе β -фазы с небольшим количеством α -фазы) и β -сплавы. Авторы работ [1, 2] выделяют также сплавы переходного класса, которые по структуре и протекающим в них превращениям занимают промежуточное положение между $(\alpha+\beta)$ - и псевдо- β -сплавами, к которым и относится сплав VT22 (табл. 1).

Для титановых сплавов было [1, 2] введено понятие о коэффициенте β -стабилизации K_β . Этот коэффициент представляет собой сумму отношений концентрации каждого β -стабилизатора в сплаве к его второй критической концентрации в двойном сплаве титана с этим элементом [3].

При описании многокомпонентных титановых сплавов принимается, что действие всех β -стабилизаторов можно выразить суммарным эквивалентным содержанием молибдена $[Mo]_{\text{ЭКВ}}$. На основании данных [4–6] авторы работы [3] выразили следующее соотношение для оценки эквивалента титановых сплавов по молибдену, мас. %:

$$[Mo]_{\text{ЭКВ}} = Mo + Ta/4 + Nb/3,3 + W/2 + V/1,4 + Cr/0,6 + Ni/0,8 + Mn/0,6 + Fe/0,4, \quad (1)$$

а коэффициент β -стабилизации определяется по формуле:

$$K_\beta = [Mo]_{\text{ЭКВ}}/C_{\text{крMo}} = [Mo]_{\text{ЭКВ}}/11, \quad (2)$$

где $C_{\text{крMo}}$ — критическая концентрация Mo в двойном сплаве титана с ним и равна 11 %.

По типу структуры (коэффициенту β -стабилизации) титановые сплавы распределяются в последовательности, представленной в табл. 2 [1, 7, 8].

На сегодняшний день существует ряд проволок на основе титана, которые выпускаются промышленностью. Проволоки сплошного сечения на основе титана с пределом прочности больше 800 МПа (табл. 3) не обеспечивают достаточный комплекс механических свойств при сварке титанового сплава VT22. Швы, полученные при TIG сварке с применением проволоки СПТ-2, не обеспечивают прочность сварного шва выше 800 МПа и поэтому

Таблица 1. Химический состав титанового сплава VT22, мас. % (ГОСТ 19807-91)

Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr	[O]	[H]	[N]
Основа	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	0,5...2,0	не более 0,18	не более 0,015	не более 0,05

Таблица 2. Значения коэффициента β -стабилизации для титановых сплавов

Классификационный параметр	Класс титанового сплава					
	α	псевдо- α	$(\alpha+\beta)$	переходной	псевдо- β	β
K_β	0	<0,25	0,3...0,9	1,0...1,4	1,5...2,4	2,5...3,0

Таблица 3. Химический состав и механические свойства проволок на основе титана с пределом прочности выше 800 МПа (ГОСТ 27265-87)

Марка проволоки	Содержание легирующих элементов, мас. %				Механические свойства	
	Al	Mo	V	Zr	σ_b , МПа	δ , % (не менее)
BT6св	3,5...4,5	-	2,5...3,5	-	665...865	12
СПТ-2	3,5...4,5	-	2,5...3,5	1,0...2,0	645...845	13
BT20-2св	3,5...4,5	0,5...1,5	0,5...1,5	1,0...2,0	635...835	10
СП15*	3,0...5,5	2,0...3,5	2,0...3,5	1,0...2,0	Не менее 735	10

*Доля ниобия в этом сплаве составляет 2,5...4,4 мас. %.

она не может быть использована в качестве присадочного материала для сварки сплавов с пределом прочности выше 800 МПа. Наиболее близкой по химическому составу и механическим свойствам по отношению к сплаву BT22 является проволока СП15. Однако использование этой проволоки в качестве присадочного материала не обеспечивает равнопрочность сварных соединений из титанового сплава BT22.

Исследования качества проволоки из сплава BT22 сплошного сечения позволили сделать выводы о нецелесообразности ее использования при сварке и наплавке ввиду большого количества дефектов как на ее поверхности, так и внутри самого металла, что в результате приводит к загрязнению металла сварного шва [9].

Для решения проблемы сварки высокопрочных титановых сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины предложен присадочный материал на основе титанового сплава системы Ti–Al–V–Mo–Nb–Zr [10]. Данное изобретение представляет собой порошковую проволоку, содержащую металлическую составляющую и флюсовую, которая содержит фториды щелочноземельных и редкоземельных элементов, взятых в соотношении 2:1 в количестве 6...18 мас. %, а оболочка проволоки выполнена из титана.

Предложенный авторами патента [10] сплав (табл. 4) находится в диапазоне химического состава промышленно выпускаемого сплава СП15 и отличается по степени легирования от сплава BT22. В связи с этим при разработке порошковой проволоки для TIG сварки титанового спла-

ва BT22 в качестве металлической составляющей сердечника проволоки был использован сплав BT22.

Для определения степени легирования металла шва порошковой проволокой предложена следующая расчетная формула:

$$C_{\text{шов}} = K_1 C_{\text{пров}} + K_2 C_{\text{BT22}}, \quad (3)$$

где K_1, K_2 — коэффициенты доли легирующих элементов в проволоке и сплаве BT22 соответственно; $C_{\text{пров}}$ — концентрация легирующих элементов в проволоке; C_{BT22} — концентрация легирующих элементов в сплаве BT22 (среднее значение).

При определении коэффициентов K_1 и K_2 использовали макрошлиф сварного соединения сплава BT22 толщиной 8 мм, на котором определяли площадь поперечного сечения металла шва и металла в разделке (рис. 1). Исходя из соотношения площади поперечного сечения шва к площади металла, полученного проволокой, коэффициенты K_1 и K_2 равны значениям 0,3 и 0,7 соответственно.

Для проволоки диаметром 3,0 мм с коэффициентом заполнения 64 % (при этом доля флюсовой составляющей по отношению к металлической — 7 %), оболочка из чистого титана составляет 36 % по отношению к проволоке. При таких же параметрах проволоки количество чистого титана в металлической составляющей сплава BT22 — 48 %, чистого титана в объеме проволоки — 83 % и легирующих элементов в проволоке — 10 %. Исходя из соотношения общего количества легирующих элементов в сплаве BT22 к общему количеству легирующих элементов в проволоке, расчетным методом определено количество каждого легирующего элемента в проволоке с учетом оболочки из чистого титана. Полученные данные количества каждого легирующего элемента позволили определить их концентрацию в сварном шве (табл. 4), а также рассчитать молибденовый эквивалент ($[Mo]_{\text{экв}} = 11,1$). Металл шва сварного соединения из титанового сплава BT22 с использованием присадочной порошковой проволоки, в состав которой входит металлическая составляющая из сплава BT22, имеет коэффициент β -стабилизации равный 1, что относит такой металл к сплавам переходного класса, каким является титановый сплав BT22.

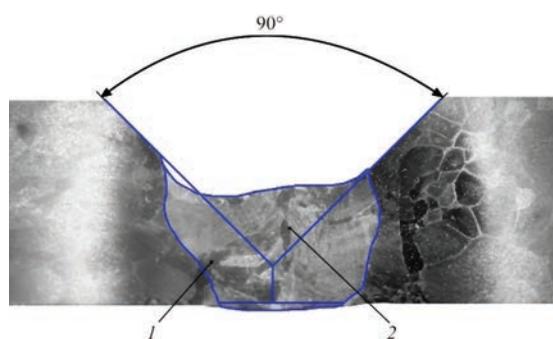


Рис. 1. Макрошлиф соединения из сплава BT22 (после первого прохода), выполненного опытной порошковой проволокой: 1 — металл шва, 2 — металл в разделке

Таблица 4. Расчетное содержание легирующих элементов, мас. %

Элемент	$C_{\text{пров}}$	$C_{\text{ВТ22}}^*$	$C_{\text{шов}}$
Al	3,2	5,1	4,5
Mo	2,9	4,8	4,2
V	2,8	4,8	4,2
Fe	0,4	1,0	0,8
Cr	0,6	1,3	1,1

* — среднее значение по ГОСТ 19807–91.

Подобный расчет был проделан и для проволоки, предложенной авторами патента [10], т. е. с металлической составляющей, соответствующей химическому составу из сплава СП15, однако в этом случае $K_{\beta} = 0,9$, что относит такой металл к классу $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов.

Сварные соединения из высокопрочных титановых сплавов в обязательном порядке должны подвергаться термической обработке для повышения их механических свойств. Поскольку металл шва и основной металл в соединении с применением порошковой проволоки с шихтой из сплава СП15 являются представителями разного класса, то необходимо применять разные режимы термической обработки для металла шва и основного металла, что на практике осуществить практически невозможно. Поэтому целесообразно в порошковой проволоке в качестве металлической составляющей использовать гранулы из сплава того же химического состава, что и сплав, который подвергается сварке, т. е. ВТ22.

Повышенное скольжение сферических гранул по длине проволоки приводит к их высыпанию и разбрызгиванию во время сварки. Это в свою очередь оказывает существенное влияние на процесс горения дуги, формирование сварного шва и его химический состав. Как показали исследования, при использовании проволоки с гранулами сферической формы количество легирующих элементов в металле шва уменьшается в 2–3 раза. Сферическая поверхность гранул также обладает пониженной адгезией к вводимому в сердечник флюсу.

С целью изменения формы гранул был разработан комплекс устройств. Для оценки качества порошковой проволоки исследовали степень деформации гранул, которую определяли методом измерения величины природного угла откоса (β) (рис. 2). Для этого бункер предварительно опускали до соприкосновения с плоскостью и в него засыпали смесь. Потом бункер поднимали с постоянной скоростью (10 м/ч), а смесь, которая высыпалась, образовывала конус.

На определенных режимах была достигнута такая форма гранул ($\beta = 30^\circ$), при которой они не вы-

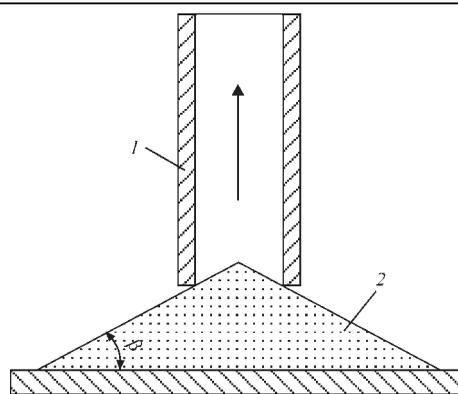


Рис. 2. Схема определения природного угла откоса: 1 — полнотелый цилиндр; 2 — сыпучая смесь

сыпались из сформированной трубки (при использовании гранул сферической формы, где $\beta = 20^\circ$).

Опытным путем определена флюсовая составляющая проволоки, которая представлена трехкомпонентной системой $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--BaF}_2$. Для получения механических свойств металла шва, близких к основному металлу, необходимо, чтобы было максимальное количество металлической составляющей в шихте порошковой проволоки и минимальное количество флюсовой компоненты. Экспериментальным путем установлено, что использование флюса в количестве 7 % предупреждает образование пор в сварном шве, а шлак, образованный после сварки, хорошо скалывается.

В качестве оболочки порошковой проволоки применяли ленту из титанового сплава ВТ1-00. Формирование порошковой проволоки и ее претяжку до нужного диаметра осуществляли на специальном волочильном станке [11], предназначенном для производства титановых порошковых проволок (рис. 3).

По результатам экспериментов изготовлена опытная порошковая проволока ППТ-22 с шихтой оптимизированного состава. Проведенные замеры по всей длине изготовленной проволоки показали постоянство коэффициента заполнения равного $0,61 \pm 0,03$ при диаметре проволоки 3,0 мм.

Опытная наплавка с применением полученной проволоки показала стабильное протекание процесса сварки (без высыпания нерасплавленных гранул), что свидетельствовало о достаточном уплотнении шихты и равномерном ее распределении по длине проволоки.

Применение проволоки ППТ-22 в качестве присадочного материала при аргонодуговой сварке магнитоуправляемой дугой титанового сплава ВТ22 позволило получить сварные соединения толщиной 8 мм (после термической обработки) с показателями прочности (σ_b) и ударной вязкости (KCV) сварного соединения на уровне 1120 МПа и 14,5 Дж/см² соответственно. Данные механиче-

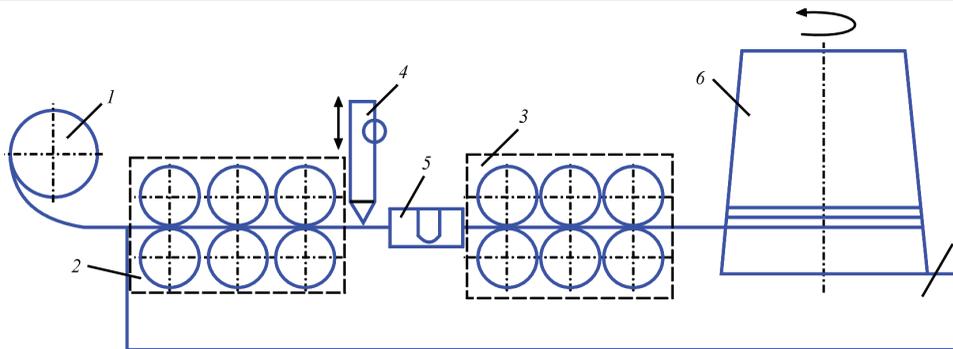


Рис. 3. Схема волоочильного станка: 1 — кассета; 2 — роликовые клетки формирования U-образного профиля; 3 — роликовые клетки закрытия трубчатого профиля и первичного уплотнения шихты; 4 — дозатор; 5 — U-образная планка; 6 — барабан; 7 — станина



Рис. 4. Результаты испытаний наплавочных соединений на усталостную прочность

ских свойств близки к показателям основного металла ($\sigma_b = 1067$ МПа, $KCV = 14,5$ Дж/см²) [12].

Проволока ППТ-22 была также использована в качестве присадочного материала при аргонодуговой восстановительной наплавке деталей из титанового сплава ВТ22 [13].

После наплавки и локальной термической обработки были проведены испытания на усталостную прочность. Результаты испытаний показали [14], что при использовании порошковой проволоки ППТ-22 наплавочные соединения выдержали полный цикл испытаний по заданным программам и разрушение после добавочных циклов произошло по месту захвата (рис. 4).

Результаты испытаний наплавочных соединений на износостойкость в условиях фреттинг-коррозии [15] показали также положительные результаты. Итак, линейный износ наплавов, полученных с помощью проволоки ППТ-22, почти в два раза меньше, чем у основного металла ВТ22 (рис. 5).

Таким образом, в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработана титановая присадочная порошковая проволока ППТ-22, которая состоит из металлической (гранулы ВТ22) и флюсовой (фториды щелочноземельных элементов) составляющих, с использованием которой достигается равнопрочность сварных соединений из сплава ВТ22 при аргонодуговой сварке и последующей термо-

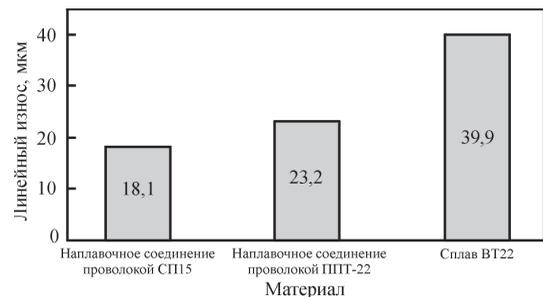


Рис. 5. Результаты испытаний наплавочных соединений на износостойкость

обработке. Также является целесообразным применение данной проволоки при восстановительной наплавке деталей из сплава ВТ22.

Список литературы

1. Моисеев В.Н. (2001) *Машиностроение. Энциклопедия. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы*. Фридляндер И.Н. (ред.). Раздел 2. Титан и титановые сплавы. Москва.
2. Белов С.П., Брун М.Я., Глазунов С.Г. (1992) *Металловедение титана и его сплавов*. Глазунов С.Г., Колачев Б.А. (ред.). Москва, Металлургия
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
4. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. (1977) *Титановые сплавы в машиностроении*. Ленинград, Машиностроение.
5. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В. Д. (2000) *Титановые сплавы разных стран*. Москва, ВИЛС.
6. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. (2005) *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, МИСИС.
7. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. (1980) *Металлография титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
8. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. (1992) *Металловедение титана и его сплавов*. Москва, Металлургия.
9. Прилуцкий В.П., Шваб С.Л., Ахонин С.В. и др. (2014) Сравнительные свойства присадочных материалов для наплавки на титановый сплав ВТ22. *Сб. тр. междунар. конф. «Титан-2014 в СНГ», май 2014 г., г. Нижний Новгород*, сс. 109–114.
10. Прилуцкий В.П., Замков В.М., Радкевич И.А., Никифоров Г.А. (1998) *Присадочный материал на основе титанового сплава*. Украина, Пат. 25333, А В23К 35/36.
11. Прилуцкий В.П., Замков В.Н., Гуревич С.М. (1975) Аргонодуговая сварка титановых сплавов с применением присадочной порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*, 7, 41–44.
12. Prilutsky V.P., Akhonin S.V., Schwab S.L., Petrychenko I.K. (2018) Effect of Heat Treatment on the Structure and Prop-

- rties of Titanium Alloy VT22 Welded Joints Produced by TIG-Welding with Flux-Cored Wire. *Materials Science Forum*, **9**, pp. 119–125.
13. Прилуцкий В.П., Ахонин С.В., Шваб С.Л. и др. (2017) Восстановительная наплавка деталей из титанового сплава VT22. *Автоматическая сварка*, **1**, 39–47.
 14. Антонюк С. Л., Аболихина Е. В., Баранников А. М. и др. (2010) Усталостные характеристики титанового сплава VT22 с аргонодуговой наплавкой и последующей скоростной термообработкой. *Сб. тр. междунар. конф. «Титан-2010 в СНГ», май 2010 г., г. Екатеринбург*, сс. 206–211.
 15. Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Моляр А.Г., Антонюк С.Л. (2009) Применение локальной индукционной термообработки для ремонта изделий из сплава VT22. *Сб. тр. междунар. конф. «Титан-2009 в СНГ», май 2009 г., г. Одесса*, сс. 413–421.
 6. Kolachev, B.A., Elagin, V.I., Livanov, V.A. (2005) *Metallurgy and heat treatment of nonferrous metals and alloys*. Moscow, MISIS [in Russian].
 7. Borisova, E.A., Bocharov, G.A., Brun, M.Ya. (1980) *Metallography of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 8. Khorev, A.I., Belov, S.P., Glazunov, S.G. (1992) *Metallurgy of titanium and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 9. Prilutsky, V.P., Shvab, S.L., Akhonin, S.V. et al. (2014) Comparative properties of filler materials for surfacing on titanium alloy VT22. *In: Proc. of Int. Conf. on Titanium 2014 in CIS (Russia, Nizhny Novgorod, May 2014)*, 109–114.
 10. Prilutsky, V.P., Zamkov, V.M., Radkevich, I.A., Nikiforov, G.A. (1998) *Filler material based on titanium alloy*. Ukraine, Pat. 25333, Int. Cl. A B23K 35/36 [in Ukrainian].
 11. Prilutsky, V.P., Zamkov, V.N., Gurevich, S.M. (1975) Argon-arc welding of titanium alloys with application of filler flux-cored wire. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 41–44 [in Russian].
 12. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V., Schwab, S.L., Petrychenko, I.K. (2018) Effect of heat treatment on the structure and properties of titanium alloy VT22 welded joints produced by TIG-welding with flux-cored wire. *Mat. Sci. Forum*, **92**, 119–125.
 13. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V., Schwab, S.L. et al. (2017) Restoration surfacing of parts of titanium alloy VT22. *The Paton Welding J.*, **1**, 32–35.
 14. Antonyuk, S.L., Abolikhina, E.V., Barannikov, A.M. et al. (2010) Fatigue characteristics of titanium alloy VT22 with argon-arc surfacing and subsequent high-speed heat treatment. *In: Proc. of Int. Conf. on Titanium-2010 in CIS (Russia, Ekaterinburg, May 2010)*, 206–211.
 15. Ivasishin, O.M., Markovsky, P.E., Molyar, A.G., Antonyuk S.L. (2009) Application of local induction heat treatment for repair of products from VT22 alloy. *In: Proc. of Int. Conf. on Titanium-2009 in CIS (Ukraine, Odessa, May 2009)*, 413–421.

References

ПРИСАДНИЙ ПОРОШКОВИЙ ДРІТ ДЛЯ TIG ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22

С.В. Ахонін, С.Л. Шваб

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

Розглянуто підхід до вибору присадного матеріалу для аргонодугового зварювання неплавким електродом (спосіб TIG) титанового сплаву VT22. Показано, що метал шва, отриманий із застосуванням дослідного порошкового дроту ППТ-22, є представником перехідного класу титанових сплавів, до яких відноситься сплав VT22 (коефіцієнт β-стабілізації такого металу дорівнює 1). Даний дріт може використовуватися для аргонодугового зварювання високоміцного титанового сплаву VT22. Механічні властивості таких зварних з'єднань після термічної обробки досягають рівня показників основного металу. Застосування дроту ППТ-22 при відновлювальному аргонодуговому наплавленні деталей зі сплаву VT22 забезпечує їх високі експлуатаційні характеристики. Бібліогр. 15, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: титановий сплав VT22, порошковий дріт, TIG зварювання, відновлювальне наплавлення

FILLER FLUX-CORED WIRE FOR TIG WELDING AND SURFACING OF TITANIUM ALLOY VT22

S.V. Akhonin, S.L. Shvab

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

The paper considers an approach for selection of filler material in TIG welding of titanium alloy VT22. It is shown that weld metal obtained using pilot flux-cored wire PPT-22 is a representative of transient class of titanium alloys, to which VT22 alloy is referred to (coefficient of β-stabilizing of such metal equals 1). This wire can be used for argon-arc welding of high-strength titanium alloys VT22. Mechanical properties of such welded joints after heat treatment reach the level of base metal indices. Application of PPT-22 wire in restoration argon-arc surfacing of VT22 alloy parts provides their high service characteristics. 15 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: titanium alloy VT22, flux-cored wire, TIG welding, restoration surfacing

Поступила в редакцію 18.04.2019