

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ22 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИСАДОЧНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

В. П. ПРИЛУЦКИЙ, С. Л. ШВАБ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО, С. В. АХОНИН, С. Б. РУХАНСКИЙ, И. А. РАДКЕВИЧ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время расширяется использование сварных узлов и конструкций из титановых сплавов с высокой прочностью ($\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ МПа). При этом прочностные характеристики сварных соединений должны быть на уровне характеристик сплавов. Для силовых элементов самолетов типа АН применяется высокопрочный двухфазный ($\alpha+\beta$)-титановый сплав ВТ22. Целью работы являлось исследование влияния снижения степени легирования металла шва на его прочностные характеристики. Для этого разработан принципиально новый присадочный материал для аргонодуговой сварки сплава ВТ22 – титановая порошковая проволока. Несмотря на снижение степени легирования металла шва, после стандартной термической обработки его прочность достигает 1121,5 МПа, что выше уровня прочности основного металла (1057,5 МПа). При этом ударная вязкость составляет 70...75 % ударной вязкости основного металла. Библиогр. 15, табл. 4, рис. 6.

Ключевые слова: титан, сварка, порошковая проволока, управляющее магнитное поле

Одним из ведущих технологических процессов при изготовлении узлов авиационной техники является сварка. Свариваемость — важный фактор, определяющий возможность использования титановых сплавов в узлах авиационной техники. Наибольшее распространение в самолетостроении получили низколегированные титановые сплавы, которые хорошо свариваются. В условиях эксплуатации характеристики сварных соединений этих сплавов близки к соответствующим характеристикам самих сплавов. В настоящее время значительное внимание уделяется расширению использования сварных конструкций и узлов из высокопрочных титановых сплавов с пределом прочности более 1100 МПа.

Задача ставится так, чтобы механические характеристики сварных соединений были близки к характеристикам сплавов. Это связано с появлением таких самолетов, как АН-124, АН-225, АН-70, АН-140, АН-148 и необходимостью применения в их конструкциях крупногабаритных тяжело нагруженных узлов. К ним относятся шасси, шпангоуты, монорельсы, траверсы, каретки крыльев и др. Однако свариваемость существующих высокопрочных сплавов титана значительно хуже, чем низколегированных сплавов. Для силовых элементов самолетов типа АН широко используется высокопрочный двухфазный титановый сплав ВТ22 (система Ti–5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr). Его применяют как в отожженном, так и термически упрочненном состояниях.

Структура отожженного сплава ВТ22 состоит из примерно равных количеств α - и β -фаз и

поэтому он относится к наиболее прочным титановым сплавам в отожженном состоянии. Это свойство позволяет использовать сплав ВТ22 в крупногабаритных изделиях, когда упрочняющая термическая обработка затруднена. Преимущество сплава ВТ22 по сравнению с другими титановыми сплавами — возможность упрочняться при многоступенчатом отжиге с регламентированной скоростью охлаждения. Однако его структура и свойства очень зависят от колебания химического состава в пределах, установленных ГОСТ 19807–91.

Этот фактор также оказывает влияние на свариваемость, и, поскольку по степени легирования сплав ВТ22 относится к сплавам критического состава, то под воздействием термического цикла сварки в металле шва и ЗТВ формируется фазовый состав и структура с крайне низкой пластичностью и ударной вязкостью. Так, при изготовлении сварных конструкций из сплава ВТ22 электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) химический состав сварных швов сохраняется таким же, как и у основного металла, имеет низкую пластичность и ударную вязкость [1, 2]. При применении упрочняющей термической обработки сварного соединения после сварки по режимам, рекомендуемым для основного металла, наблюдается еще большее снижение механических свойств металла шва. Это в значительной мере снижает эффективность использования ЭЛС.

Для изготовления сварных титановых конструкций достаточно широкое применение нашел такой универсальный способ, как аргонодуговая

сварка (АДС) вольфрамовым электродом поверхностной дугой. Этот способ позволяет применять присадочную проволоку при сварке в разделку, что дает возможность изменять состав металла шва, а также регулировать термический цикл сварки. При дуговой сварке сплава ВТ22 за один проход химический состав сохраняется таким же, как и у основного металла, металл швов также имеет низкую пластичность и ударную вязкость. Это связано с гетерогенностью структуры различных участков соединения, возникающей под влиянием термического цикла сварки и, как следствие, неодинаковым распределением, формой и размерами продуктов распада β -твердого раствора [3]. Предполагается, что определенную роль в этом играет химическая неоднородность, возникающая в процессе образования шва [4]. Поэтому при выборе режимов термической обработки сварных соединений этого сплава следует учитывать фазовые и структурные особенности, имеющие место после сварки. Согласно сложившимся представлениям при сварке термически упрочняемых сплавов для снижения образующейся микронеоднородности металла шва рекомендуется снижать степень, а также систему его легирования путем применения присадочных проволок с различным содержанием элементов β -стабилизаторов [2, 4–6]. Это позволяет повысить пластичность швов, но при этом значительно уменьшает их прочность. При этом выявляется характерный недостаток термически упрочняемых двухфазных сплавов – уменьшение отношения прочности шва к прочности основного металла по мере его упрочнения. Поэтому рекомендуют располагать швы в утолщенных зонах. Этот прием до настоящего времени считают единственной возможностью реализовать в сварной конструкции прочностные характеристики сплава ВТ22 [4]. В соответствии с этими предпосылками в настоящее время широкое распространение получила высоколегированная сварочная проволока марки СП15 (Ti–4,5Al–2V–3Mo–3,5Nb–1,5Zr) с пределом прочности не ниже 750 МПа [5, 7]. Суммарный эквивалент по молибдену этой проволоки достигает 7,5 %, поэтому ее рекомендуют применять при сварке двухфазных титановых сплавов большого диапазона. Предел прочности сварных швов сплава ВТ22, выполненных с применением этой проволоки, не превышает 1000 МПа.

Следует отметить, что процесс изготовления высоколегированных присадочных проволок отличается технологической сложностью и высокой энергоемкостью (после каждого перехода в 0,15 мм необходимо проводить травление в кислотах и вакуумный отжиг). Кроме того, в состав СП15 входит ряд дорогостоящих и дефицитных

элементов, таких как V, Mo, Nb и Zr. После окончания процесса изготовления проволоки на ее поверхности все же остаются небольшие дефекты в виде надрывов, микротрещин, остатков окисных слоев. Глубина залегания таких дефектов регламентируется и по ГОСТ 27265–87 составляет не более 0,4 мм. При сварке они могут служить источником дополнительного загрязнения металла шва примесями внедрения, а также способствуют появлению пористости в нем. Наличие же пористости приводит к потере служебных характеристик изделий, снижению механических свойств, статической и особенно циклической прочности сварных соединений [8, 9]. Предупредить возникновение таких дефектов при аргонодуговой сварке в сварном шве можно путем металлургической обработки сварочной ванны жидким флюсом при введении его в зону дуги, что повышает циклическую прочность сварных соединений [10].

При АДС с разделкой кромок происходит перемешивание присадочного и основного металлов, в результате чего химический и фазовый состав сварного шва отличается как от состава основного металла, так и от состава присадочной проволоки. Возникающая при этом структурная и химическая неоднородность приводит к анизотропии физических и механических свойств, а различие в фазовом составе зоны термического влияния (ЗТВ) и сварного шва, требует тщательного подбора режимов термической обработки сварных узлов.

Основной целью работы являлось исследование влияния снижения степени легирования металла шва без изменения состава легирующих элементов на формирование необходимого фазового состава и структуры металла шва и его прочностные характеристики при применении термической обработки сварного соединения. В задачу исследований входило изыскание условий и параметров сварочного процесса, при которых химическая и физическая неоднородность, развивающаяся в слоях наплавленного металла шва и зоне термического влияния, была бы минимальной. Решение этой задачи позволяет значительно упростить процесс термической обработки сварных соединений и получить необходимый комплекс механических характеристик.

Поскольку сплав ВТ22 отличается высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, то необходимо в первую очередь создать такие условия образования сварного шва, при которых возможно регулировать параметры термического цикла с целью снижения протяженности ЗТВ. Это, в свою очередь, окажет влияние на внутризеренную структуру и фазовый состав металла шва и на свойства металла ЗТВ. С этой целью для управления процессом образования сварного

Т а б л и ц а 1. Содержание легирующих элементов в гранулах сплава ВТ22 (результаты спектрального анализа)

Компоненты	Химический состав, мас. %							
	Al	V	Mo	Zr	Si	Fe	Cr	Ti
ГОСТ 19807–91	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,3	0,15	0,5...1,5	0,5...1,5	ост.
Гранулы	5,6	4,8	5,0	0,05	0,12	0,72	1,0	ост.

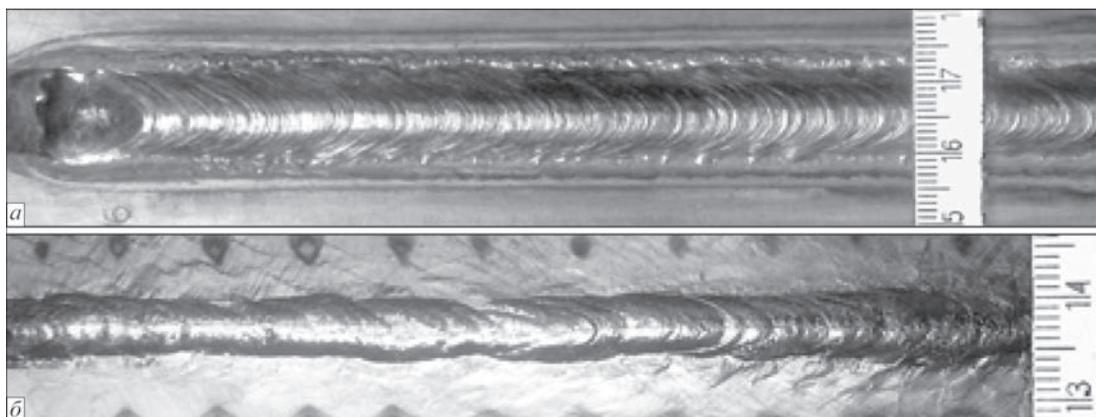


Рис. 1. Образец сварного соединения сплава ВТ22 толщиной 8 мм, полученного с использованием присадочной порошковой проволоки ППТ-22: *а* — лицевая поверхность сварного шва; *б* — обратное формирование



Рис. 2. Рентгенограмма сварного соединения, выполненного с использованием присадочной порошковой проволоки ППТ-22

шва использовали внешнее поперечное переменное магнитное поле, применение которого реализовано при автоматической сварке титана в узкий зазор [11] и при ручной сварке в монтажных условиях [12]. Это дало возможность управлять пространственным положением столба дуги и перераспределять ее тепловую энергию между основным металлом, присадочной проволокой и металлом сварочной ванны.

Механические характеристики металла шва при сварке с разделкой кромок могут быть изменены как выбором соответствующего термического цикла сварки и режима последующей термической обработки сварного соединения, так и путем регулирования степени легирования металла шва. Для этой цели на основе результатов предыдущих исследований был разработан принципиально новый присадочный материал для сварки титана — присадочная титановая порошковая проволока [13, 14]. Она представляет собой трубчатую оболочку из технического титана марки ВТ1-00, внутри которой находится сердечник, в состав которого входят металлическая и флюсовая компоненты. Такая конструкция в отличие от проволоки сплошного сечения позволяет вводить в сердечник флюсовую составляющую, предназначенную для предупреждения возникновения пористости в швах и контрагирования дуги. Флю-

совая компонента сердечника включает в себя фториды щелочноземельных металлов.

В качестве металлической компоненты предложено использовать гранулы, полученные методом плазменного центробежного распыления из заготовки сплава ВТ22 (табл. 1).

Эксперименты по разработке технологии сварки проводились на образцах сплава ВТ22 толщиной 8 мм с V-образной разделкой с углом раскрытия кромок 90° и притуплением 1 мм. В качестве присадочного материала применялась опытная порошковая проволока ППТ-22 диаметром 3 мм. При сварке использовали внешнее поперечное переменное магнитное поле (частота 20 Гц, величина магнитной индукция 4 мТл) для перемещения столба дуги и, соответственно, сварочной ванны поперек шва. Режимы сварки приведены в табл. 2, внешний вид сварного образца показан на рис. 1. На рис. 2 приведена рентгенограмма сварного соединения, подтверждающая, что использование флюсовой компоненты в порошковой проволоке предупреждает появление пор в сварном шве.

Т а б л и ц а 2. Параметры режима сварки образцов

Номер прохода	Параметры сварки			
	$I_{св2}$, А	$U_{д2}$, В	$v_{св2}$, м/ч	$v_{под2}$, м/ч
1	200	13,0	9	30
2, 3	220	13,5	7	30

Таблица 3. Механические свойства металла шва в состоянии после сварки (сплав ВТ22, толщина 8 мм)

Место забора образцов для испытаний	Механические свойства				
	$\sigma_{т}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV , Дж/см ²
Основной металл	1003,8	1039,7	9,6	19,5	32,6
Металл шва	987,7	1065,1	9,0	23,9	5,9

Примечание. Приведены средние значения результатов испытаний трех образцов.

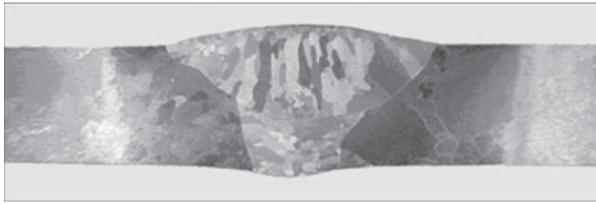


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения сплава ВТ22 толщиной 8 мм (в состоянии после сварки)



Рис. 5. Макрошлиф сварного соединения сплава ВТ22 (в состоянии после ТО) толщиной 8 мм

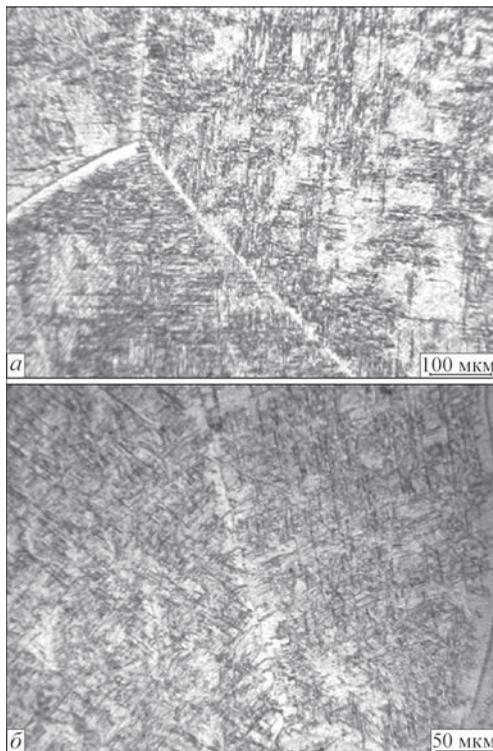


Рис. 4. Микроструктура металла шва, сварного соединения сплава ВТ22 толщиной 8 мм: *a* — без использования магнитного поля; *б* — с использованием магнитного поля

Макрошлиф полученного соединения представлен на рис. 3. Сравнение микроструктур металла швов, полученных при сварке с магнитным управлением и без него, показывает, что применение переменного магнитного поля позволяет регулировать не только размеры сварного шва, но и влиять на условия кристаллизации металла сварочной ванны, способствуя формированию более равномерной и однородной структуры. Так, при сварке без применения магнитного поля внутризеренная структура неоднородна, в ней наблюдаются участки с интенсивным распадом и большой плотностью пластинчатых мартенситных частиц, которые чередуются со светлыми участками, где плотность мартенситных частиц меньше, то есть распад β -твердого раствора происходит неравно-

мерно (рис. 4, *a*). При воздействии переменного магнитного поля на металл сварочной ванны достигается большая равномерность распада твердого раствора и образование более однородной структуры (рис. 4, *б*).

Результаты механических испытаний металла шва в состоянии после сварки приведены в табл. 3.

Полученные результаты показывают, что использование магнитного поля не оказало влияния на величину ударной вязкости металла шва в состоянии после сварки.

После сварки сварные соединения, как правило, подвергают отжигу. Эффективным способом повышения пластических свойств сплава ВТ22 является высокотемпературный отжиг в двухфазной области в интервале температур 750...800 °С с последующим охлаждением с печью [15]. Цель отжига состоит не только в устранении термических сварочных напряжений, но и в получении равномерной равновесной структуры с необходимым соотношением α - и β -фаз. Исходя из анализа литературных данных и рекомендаций авторов работы [15], был выбран достаточно технологически простой процесс термической обработки (ТО) сварных соединений, выполненных с использованием присадочной порошковой проволоки: выдержка в печи при $T = 750$ °С в течение 1 ч, охлаждение с печью.

Результаты механических испытаний металла сварного соединения и основного металла в состоянии после термической обработки приведены в табл. 4.

Таблица 4. Механические свойства сварного соединения и основного металла в состоянии после ТО (приведены средние значения результатов испытаний трех образцов)

Металл	$\sigma_{т}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV , Дж/см ²
Сварное соединение	-	1121,5*	-	-	14,8
Основной металл	974,1	1057,5	13,3	33,3	19,6

Примечание. Разрушение по шву.

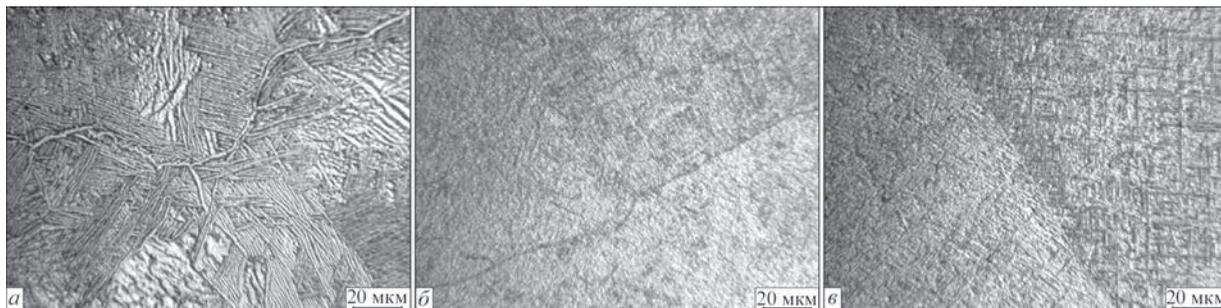


Рис. 6. Макроструктура сварного соединения после ТО: а — ОМ; б — ЗТВ; в — шов

Макрошлиф сварного соединения после термической обработки показан на рис. 5.

Исследования микроструктуры сварных соединений после отжига показали, что в ЗТВ наблюдается достаточно равномерный распад метастабильной β -фазы с выделением дисперсных частиц мартенситной α'/α'' -фазы, сохранилась субзеренная структура и произошла частичная рекристаллизация β -зерна (рис. 6, б). Вдоль границ крупных β -зерен образовались мелкие рекристаллизованные зерна.

Отжиг способствовал формированию однородной и равномерной структуры металла по высоте шва (рис. 6, в), при этом также произошел распад метастабильных фаз, однако размеры продуктов распада в шве крупнее, чем в ЗТВ, что связано с некоторым разлегированием металла шва за счет оболочки порошковой проволоки.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение гранул сплава ВТ22 в качестве металлической компоненты сердечника порошковой проволоки в сочетании с управляющим магнитным полем оказывает положительное влияние на свойства сварного соединения при выбранном режиме термической обработки. Прочность металла шва достигается выше уровня прочности основного металла, несмотря на снижение степени легирования шва. При этом ударная вязкость составляет 70...75 % ударной вязкости основного металла.

1. Совершенствование технологии ЭЛС титанового сплава ВТ22 / В. Н. Замков, А. Д. Шевелев, В. В. Арсенюк [и др.] // Автоматическая сварка. – 1984. №1. – С. 56–58.
2. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Кирилов [и др.]. – М.: Металлургия, 1975. – 248 с.

3. Влияние исходной структуры на характер распада β -твердого раствора в высокопрочном титановом сплаве ВТ22 / А. Б. Ноткин, О. С. Коробов, Н. З. Перцовский [и др.]. // Физика металлов и металловедение. – 1982. – 54, вып. 4. – С. 755–761.
4. Сварка высокопрочных титановых сплавов / С. М. Гуревич, Ф. Р. Куликов, В. Н. Замков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 149 с.
5. Изыскание присадочного материала для сварки ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов. / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Н. А. Куширенко [и др.] // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. – К.: Наукова думка, 1980. – С. 314–320.
6. А. с. 1662217 СССР. Присадочный материал для сварки титановых сплавов с повышенным содержанием β -фазы / С. Г. Глазунов, Л. Ф. Груздева, В. Н. Моисеев [и др.] (СССР); Опубл. 1964, Бюл. № 21.
7. Проволока сварочная из титана и титановых сплавов. Технические условия: ГОСТ 27265–87. – 53 с.
8. Влияние технологических факторов на малоцикловую усталость сварных соединений сплава ВТ22 / Ф. Р. Куликов, Ю. В. Васькин, С. И. Кишкина [и др.] / Авиационная промышленность. – 1977. – № 6. – С. 65–71.
9. Малоцикловая усталость сварных соединений ($\alpha + \beta$)-сплавов титана // Труды 3-й междунар. конф. по титану, т. 2. – М., ВИС, 1978. – С. 273–281.
10. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – К.: Наукова думка, 1986. – С. 128.
11. В. Е. Paton. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium / В. Е. Paton, V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky // Welding Journal. – 1996. – № 5.
12. Замков В. Н. Способы сварки титановых сплавов / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С. 45–48.
13. United States Patent 4131493. Flux-cored welding wire / S. M. Gurevich, V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky, 1978.
14. Пат. 25333, Украина А В23К 35/36. Присадный материал на основе титанового сплава / В. П. Прилуцкий, В. М. Замков, І. А. Радкевич, Г. А. Нікіфоров. – Заявл. 08.05.1997; опубл. 30.10.1998, Бюл. № 30.
15. Влияние термической обработки на структуру и свойства титанового сплава ВТ22 / Л. И. Анисимова, А. А. Попов, В. И. Мельникова [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1977. – т. 44, вып. 4. – С. 843–845.

Поступила в редакцию 13.04.2016

Международный семинар

«Усовершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования»

5–8 июня 2017 г.

г. Белгород, Россия

Организаторы: ассоциация «Электрод», ИЭС им. Е. О. Патона, Новооскольский электродный завод», ООО «Керамглас»

[http:// association-electrode.com](http://association-electrode.com)