

УДК 620.17

В. Ю. БЕЛОУС

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Т120

Рассмотрена технология получения сварных соединений с прочностью не менее 0,9 от прочности основного материала. При анализе влияния термического цикла сварки на титановые сплавы изучены диаграммы аннотермического превращения. Доработана методика изучения влияния термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения в металле шва и зоне термического влияния экспериментального сложнелегированного титанового сплава Т120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr и проведена оценка свойств его сварных соединений. Показано, что большие значения скоростей сварки обеспечивают фазовый состав металла шва и зоны термического влияния с меньшим количеством метастабильных фаз. Сварные соединения титанового сплава Т120, выполненные аргонодуговой сваркой, имеют значения показателей предела прочности 1162 МПа, что соответствует 97 % от прочности сплава.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, аргонодуговая сварка, структура сварного шва, диаграмма аннотермического превращения.

Разработка конкурентноспособной высокотехнологичной техники требует повышения механических характеристик узлов и деталей. В настоящее время всё большее внимание уделяется расширению использования сварных конструкций и узлов из сплавов титана высокой прочности ($\sigma_b \geq 1100$ МПа) [1]. В этом направлении в ведущих материаловедческих центрах США, ЕС, России, Китая ведутся интенсивные работы как по совершенствованию существующих титановых сплавов, так и по созданию новых [2]. Свариваемость двухфазных высоколегированных сплавов титана, применение которых может дать наибольшее снижение массы конструкции, значительно хуже, чем сплавов низколегированных. Термический цикл сварки таких сплавов приводит к существенному изменению структур околосшовной зоны и металла шва и, как следствие, к ухудшению механических характеристик соединения, поэтому при разработке новых сплавов существенное внимание уделяется возможности получения сварных соединений с пределом прочности не менее 0,9 от предела прочности основного материала.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны высокопрочные двухфазные сплавы Т110 и Т120. Высокопрочный сплав марки Т110 системы Ti-5,5Al-1,2Mo-1,2V-4Nb-2Fe-0,5Zr разработан в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с АНТК им. О. К. Антонова [3] и нашел применение в конструкции самолета АН 148. Он содержит следующие легиру-

ющие элементы, % мас.: алюминий (5,0–6,0), ниобий (3,5–4,8), молибден (0,8–1,8), ванадий (0,8–2,0), железо (1,5–2,5), цирконий (0,3–0,8). Сплав Т110 по сравнению с высокопрочным титановым сплавом ВТ23 [4] имеет более высокую устойчивость против образования усталостных трещин и по ряду служебных характеристик, например, по усталостной долговечности основного металла, превышает показатели сплава ВТ23 на 15–20 % [5]. Экспериментальный сложнолегированный сплав Т120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr [6] имеет коэффициент стабилизации β -фазы в пределах 0,96–1,07. Он содержит больше легирующих элементов по сравнению с известными сплавами ВТ23, Т110 и должен иметь в состоянии после отжига предел прочности σ_b , превышающий 1200 МПа [3].

Изучение влияния термического цикла сварки на свойства сварных соединений титановых сплавов начинают с анализа процессов, протекающих в металле при нагреве и остывании. Поскольку для титана и титановых сплавов характерно полиморфное превращение, то целесообразно построение диаграмм анизотермического превращения изучаемого сплава, которые позволяют оценить вероятный фазовый состав остывающего металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ). На них показываются линии начала и конца высокотемпературного диффузионного распада β -фазы, а также начала выделения низкотемпературной α' -фазы. Для известных промышленных сплавов, таких как ВТ23, существуют экспериментальные диаграммы анизотермического превращения [7]. Для сплавов Т110 и Т120 таких диаграмм нет.

Целью представленной работы, которая продолжает исследования [8, 9], является оценка влияния термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения в металле шва и зоне термического влияния экспериментального сложнолегированного титанового сплава Т120 с $\sigma_b > 1200$ МПа, построение расчетной диаграммы анизотермических превращений и оценка свойств сварных соединений сплава Т120 в сравнении с другими высокопрочными титановыми сплавами.

Выполнено сравнение механических характеристик соединений сложнолегированного сплава Т120 и сплавов ВТ23 и Т110 (таблица 1). Соединения сплава ВТ23 выполнялись аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом (АДС) из пластин толщиной 8 мм. Соединения титанового сплава марки Т110 выполнялись АДС из пластин толщиной 7 мм.

Таблица 1 – Механические характеристики высокопрочных двухфазных титановых сплавов, использованных в исследованиях

Марка сплава	Эквивалент молибдена	Толщина металла, мм	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²
ВТ23	5,7–8,0	8	1030	980	13	35
Т110	4,4–7,9	7	1190	1150	18	31
Т120	5,6–10,5	8	1259	1110	15	13

При разработке новых сплавов, отличающихся сложным химическим составом и структурой, информация о физических и теплофизических свойствах моделируемого сплава отсутствует. Для ее получения широко применяется теория многокомпонентных сплавов и термодинамическое моделирование на основе методологии расчёта фазовых диаграмм CALPHAD. Ее развитие на неравновесные процессы привело к созданию модели Scheil-Gulliver, позволяющей получить зависимости многих параметров многокомпонентных сплавов, которые образуются при затвердевании, от состава и температуры. В ней характеристики отдельных фаз (молярный объем, теплопроводность, плотность) выражаются функциями, аналогичными используемым для моделирования термодинамических функций в избыточных многокомпонентных сплавах [10]. После определения свойств отдельных фаз параметры конечного сплава рассчитываются с использованием хорошо себя зарекомендовавших моделей смеси [11, 12], которые позволяют учесть влияние микроструктуры на конечные свойства сложного сплава. Такие модели, которые были изначально разработаны для двухфазных систем, в дальнейшем расширены до многокомпонентных структур [13]. Описанный подход позволил нам промоделировать физические и теплофизические свойства и кинетику фазовых превращений восьмикомпонентного титанового сплава T120.

С использованием методологии CALPHAD и модели Scheil-Gulliver определены свойства сложнолегированного восьмикомпонентного титанового сплава T120 и построена диаграмма анизотермических превращений (рисунок 1). На ней для скоростей охлаждения 130–0,05 °C/c показаны линии, соответствующие температурам начала $\beta \rightarrow \alpha_n$ превращения (около 790 °C) и его конца (420 °C).

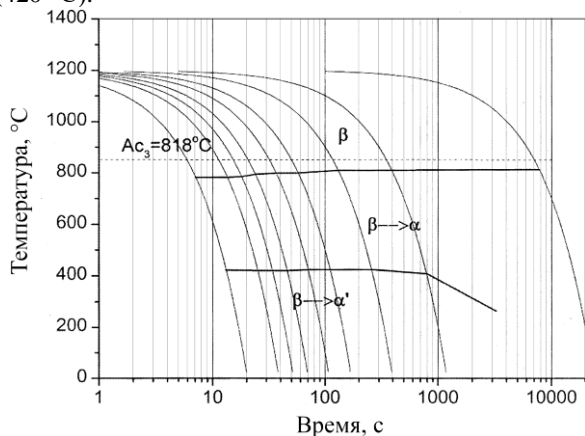


Рисунок 1 – Расчетная диаграмма анизотермических превращений сложнолегированного восьмикомпонентного титанового сплава T120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr

Пунктирная линия на диаграмме соответствует расчетной температуре A_{c3} полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \beta$ для сплава системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, которая составляет 818 °С. Она ниже соответствующей температуры для сплава VT23, у которого $A_{c3} = 926$ °С, что объясняется большим содержанием β -стабилизирующих элементов в сплаве T120.

В исходном состоянии сложнолегированный двухфазный сплав T120 состоит из равноосных полиэдрических β -зерен с дисперсной внутризеренной ($\alpha+\beta$)-структурой (рисунок 2, а). Он имеет коэффициент стабилизации β -фазы в пределах 0,96–1,07 и содержит больше легирующих элементов по сравнению с известными сплавами VT23 и T110. В состоянии после отжига его предел прочности превышает 1200 МПа. После сварки (рисунок 2, б) в металле шва фиксируются метастабильные β -фаза и α' -фаза. Метастабильная β -фаза с объемно-центрированной кубической решеткой находится преимущественно в металле шва. Имеющая гексагональную плотноупакованную решетку с ромбическим искажением α' -фаза располагается в металле шва и ЗТВ.

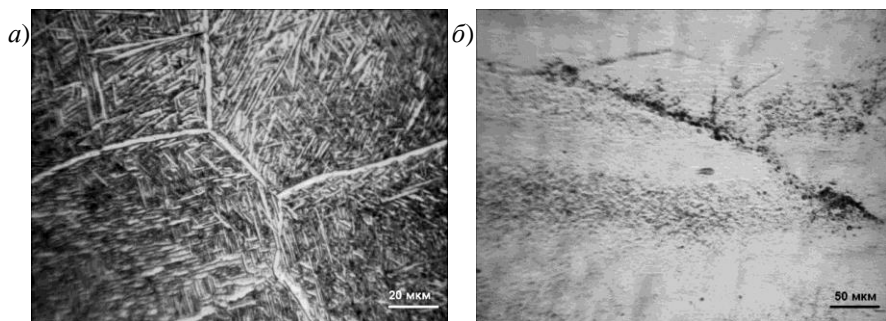


Рисунок 2 – Микроструктура сложнолегированного восьмикомпонентного титанового сплава T120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr: а – основной металл после проката и отжига; б – металл шва, выполненного аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом

Теоретическое изучение воздействия термического цикла аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом на структурно-фазовое состояние соединений титанового сплава T120 выполнялось с применением программного комплекса ANSYS [14, 15]. В процессе исследования учитывалось влияние тока сварки, напряжения на дуге, скорости перемещения и диаметра анодного пятна на размеры и форму области проплавления основного металла и зоны термического влияния, вероятный фазовый состав металла шва и ЗТВ. На рисунке 3 представлена трёхмерная конечно-элементная модель рассчитываемого сварного соединения.

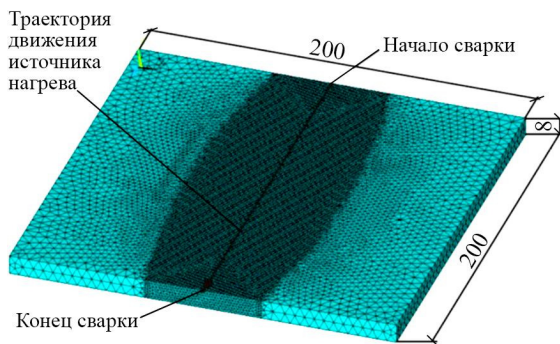


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель сварного соединения

Анализировались два режима сварки, параметры которых приведены в таблице 2. Диаметр анодного пятна согласно экспериментальным данным принят равным 9 мм.

Таблица 2 – Режимы АДС вольфрамовым электродом титановых сплавов

Режим сварки	Ток сварки $I_{св}$, А	Напряжение дуги U , В	Скорость сварки $v_{св}$, м/ч
1	350	12	10
2	380	12	16

Получены расчетные тепловые поля в пластине, на их основе были построены изотермы максимальных температур, по которым определяли геометрию и размеры зоны проплавления, ЗТВ, зоны полиморфного превращения. На рисунке 4 представлено распределение скоростей охлаждения в поперечном сечении сварного соединения для требуемых температурных интервалов.

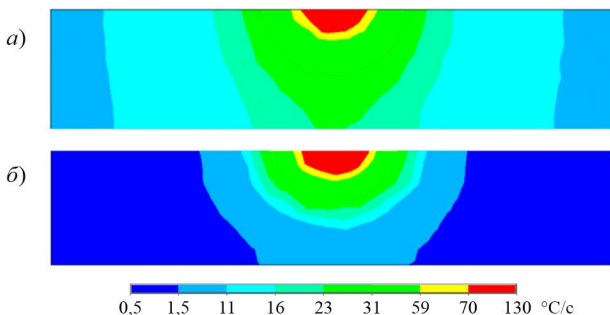


Рисунок 4 – Результат расчета скоростей охлаждения при 800 °С в сварном соединении титанового сплава Т120:
 а – $I_{св} = 350$ А, $v_{св} = 10$ м/ч; б – $I_{св} = 380$ А, $v_{св} = 16$ м/ч

Полученные распределения мгновенных скоростей охлаждения используются для построения схемы распределения метастабильных фаз. Здесь учитывается, что температуры начала и конца $\beta \rightarrow \alpha$ превращения согласно расчетной диаграмме анизотермических превращений титанового сплава T120 (см. рисунок 1) составляют соответственно 790 и 420 °С. Результаты, полученные в среде программного комплекса ANSYS, приведены на рисунке 5. Зоне проплавления – объему, в котором металл нагревается до температур, превышающих температуру плавления сплава, на схеме соответствует область β .

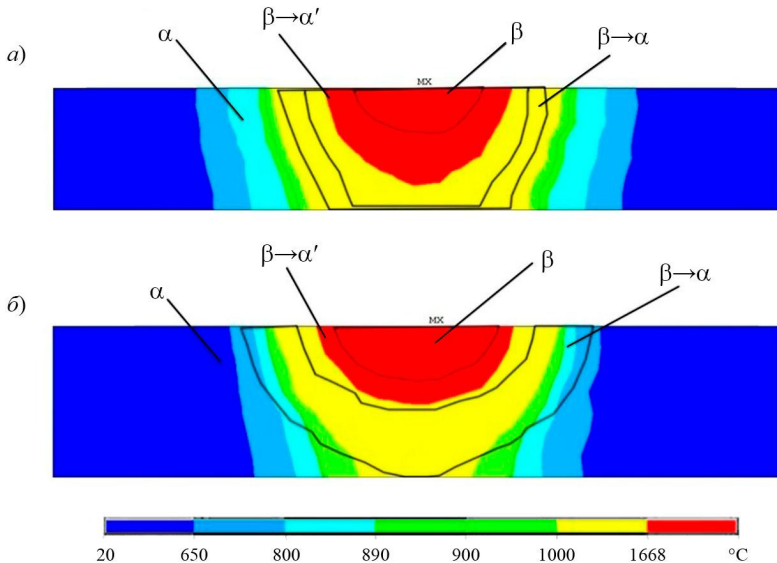


Рисунок 5 – Области формирования метастабильных фаз при охлаждении сварного соединения в сварном соединении титанового сплава T120:

a – $I_{св} = 350$ А, $v_{св} = 10$ м/ч; *б* – $I_{св} = 380$ А, $v_{св} = 16$ м/ч

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что в начале распада высокотемпературной β -фазы при температурах порядка 800 °С, объем формирующейся метастабильной β -фазы примерно одинаков во всех рассмотренных случаях, при этом скорости охлаждения в ЗТВ меньше при скоростях сварки 16 м/ч. После снижения температуры до 600 °С при той же скорости сварки градиенты температуры оказываются большими наоборот в металле шва. В конце распада высокотемпературной β -фазы при температурах порядка 400 °С наименьшие скорости охлаждения в металле шва фиксируются при скоростях сварки 10 м/ч и 350 А.

Расчеты также показали, что при увеличении тока сварки с 240 до 350 А объем выделения β -фазы изменяется не значительно, уменьшение составляет

до 10 % (таблица 3). В то же время объем выделения α' -фазы уменьшается в 1,47 раз и оказывается самым малым в случае сварки с наименьшей погонной энергией при скоростях сварки 16 м/ч. Происходящее при увеличении скоростей сварки с 10 до 16 м/мин уменьшение объемов метастабильных фаз сплава Т120, и особенно α' -фазы, должно положительно сказаться на показателях прочности и пластичности сварного соединения.

Таблица 3 – Выделение метастабильных фаз в поперечном сечении соединения при АДС-сварке сложнелегированного титанового сплава Т120

Режим сварки	Ток сварки, А	Скорость сварки, м/ч	Площадь β -фазы, мм ²	Площадь α' - фазы, мм ²
1	350	10	14,9	73,1
2	380	16	15,0	19,9

Выполнено сравнение свойств соединений сплава Т120 со сплавами Т110 и ВТ23. Они выполнялись аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом диаметром 5 мм без применения присадочных материалов и изменения химического состава металла шва. Соединения сплава марки Т110 сваривались из пластин толщиной 8 мм. Соединения высокопрочного титанового сплава ВТ23 [4] выполнялись из пластин толщиной 7 мм. Ток сварки составлял 350–360 А, скорость сварки – 10 м/ч, что соответствует режиму 1 (см. таблицу 2). Поскольку сварные соединения высоколегированных двухфазных титановых сплавов эксплуатируются, как правило, в отожженном состоянии, то часть сварных соединений была подвергнута отжигу с последующим охлаждением в печи с целью обеспечения распада метастабильных фаз в металле шва и ЗТВ.

Исследования структуры выполненных соединений сплава Т110 позволили сделать вывод, что металл швов и околошовных участков соединений, полученных методом АДС, имеет характерную пластинчатую структуру β -превращенного зерна, где между более грубыми пластинами α -фазы заметны более мелкие выделения вторичной α -фазы (рисунок 6, а). В участках ЗТВ, прилегающих к основному металлу, помимо указанных структурных элементов внутри зёрен наблюдается первичная глобулярная α -фаза. После отжига структура дуговых швов и околошовных участков зоны термического влияния представляет собой полиэдрические зёрна с преимущественно пластинчатым строением α -фазы (рисунок 6, б).

В соединениях сплава Т120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr металл швов, выполненных АДС, в состоянии после сварки также состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода зерен метастабильной β -фазы (рисунок 7, а), зафиксированной при резком охлаждении после сварки. В объеме β -зерен и на их границах наблюдается незначительное количество дисперсных выделений метастабильной α' -фазы. В результа-

те термического цикла сварки в шве сформировались метастабильные структуры с преобладающим содержанием β -фазы. Выделение дисперсных частиц метастабильной α' -фазы по границам зерен и субзерен фиксируется также в теле зерна как в шве, так и в ЗТВ. Метастабильная β -фаза имеет пониженную прочность, поэтому сварные соединения, выполненные методом АДС, имеют сниженные показатели прочности в состоянии после сварки, по сравнению с прочностью основного металла. Кроме того, в связи с наличием значительной объемной доли метастабильной α' -фазы, металл шва и ЗТВ должен иметь и низкую ударную вязкость.

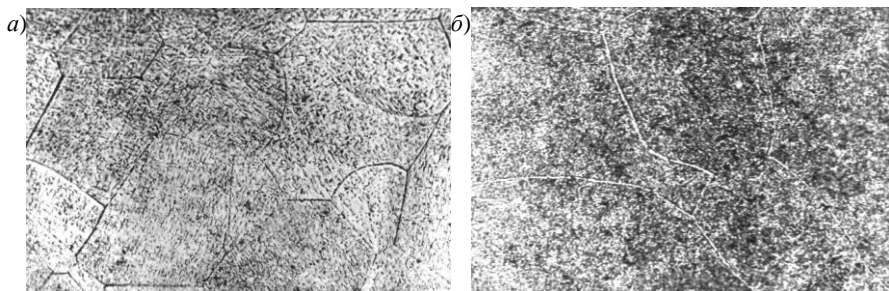


Рисунок 6 – Микроструктура металла шва сварного соединения титанового сплава Т110, выполненного ЭЛС:

a – после сварки; *б* – после отжига 750 °С, 1 ч

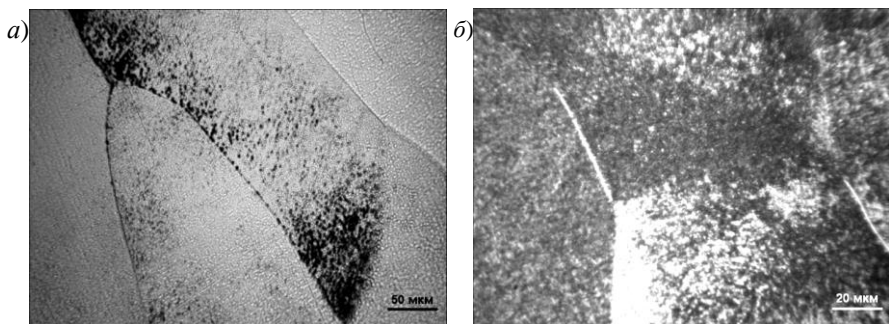


Рисунок 7 – Микроструктура металла шва сварного соединения титанового сплава Т120 системы Тi-6,5Al-3Мо-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного АДС:

a – в состоянии после сварки; *б* – в состоянии после отжига 900 °С

В результате отжига метастабильные β - и α' -фазы, зафиксированные после сварки, распались с образованием двухфазной ($\alpha+\beta$)-структуры (рисунок 7, *б*), структура и фазовый состав соединения стали более однородными, произошла коагуляция структурных элементов, по толщине до 1,5–2,5 мкм.

Сравнение механических свойств сварных соединений позволило сделать вывод, что наибольшую прочность в состоянии после сварки имеют соединения титанового сплава Т120, выполненные аргонодуговой сваркой с повышенными значениями скоростей сварки и охлаждения – режим № 2, для которого скорость сварки составляет 16 м/ч. Этот режим сварки позволил обеспечить наименьшее количество метастабильных фаз в металле шва. В этом случае значение показателя предела прочности металла шва составляет 1162 МПа (таблица 4), что соответствует 97 % от расчетной прочности сплава, составляющей 1200 МПа и 92 % от фактической прочности сплава, составляющей 1259 МПа.

Таблица 4 – Механические свойства сварных соединений сложнолегированного сплава Т120, выполненных АДС вольфрамовым электродом

Режим сварки	Состояние образца	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСВ, Дж/см ²
1	После сварки	1075	985	15,3	31	17,6
2	После сварки	1162	1069	14,7	28	4,9
2	Отжиг 900 °С, 1 ч	1151	1074	9,3	30,1	34,6

Применение отжига для соединений, выполненных по режиму 2, снижает прочность, но способствует повышению показателей ударной вязкости образцов с острым надрезом с 17 Дж/см² до 34 Дж/см² (см. таблицу 3). По этим показателям высокопрочный сплав Т120 превосходит высокопрочные сплавы ВТ23 и Т110 (таблица 5). Следует отметить, что высокие скорости сварки и охлаждения свойственны электронно-лучевой сварке, что позволяет сделать вывод о перспективности для сплава Т120 именно электронно-лучевой сварки в вакуумной камере.

Таблица 5 – Механические свойства сварных соединений титановых сплавов ВТ23 и Т110, выполненных АДС вольфрамовым электродом

Марка сплава	Состояние образцов	Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, Δ %	Относительное сужение, ψ %	Ударная вязкость КСВ, Дж/см ²
ВТ23	После сварки	1128	1084	1,3	23	27
ВТ23	Отжиг 750 °С, 1 ч	970	945	5,1	11	30
Т110	После сварки	1118	1081	6,4	13	11
Т110	Отжиг 750 °С, 1 ч	1078	990	12	38	29

Выводы. 1 Разработана математическая модель тепловых процессов в титане при сварке вольфрамовым электродом, позволяющая определить размеры и форму шва и ЗТВ, в которых протекают полиморфные превращения с образованием метастабильной α' -фазы.

2 Построена диаграмма аннотермических превращений экспериментального титанового сплава T120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr.

3 Показано, что в случае аргонодуговой сварки высоколегированного титанового сплава T120 системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr большие значения скоростей сварки и скоростей охлаждения обеспечивают лучший фазовый состав металла шва и ЗТВ с меньшим количеством метастабильных фаз.

4 Сварные соединения титанового сплава T120, выполненные аргонодуговой сваркой с повышенными значениями скоростей сварки и охлаждения, имеют предел прочности 1162 МПа, что соответствует 97 % от прочности сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Хорев, А. И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций / А. И. Хорев // Технология машиностроения. – 2007. – № 12. – С. 5–13.

2 Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.

3 Високоміцний титановий сплав : пат. 40087 України, МПК⁷ C22C 14/00 / В. М. Замков [и др.] ; Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України. – 2000021117 ; заявл. 25.02.2000, опубл. 16.07.2001. – Бюл. № 6.

4 Високопрочний титановий сплав VT23 и его применение в перспективных сварных конструкциях / А. И. Хорев [и др.] // Сварочное производство. – 2008. – № 9. – С. 3–8.

5 Исследование механических свойств кованных полуфабрикатов опытного титанового сплава T110 / С. Л. Антонюк [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 3. – С. 30–33.

6 Високоміцний титановий сплав : пат. 111002 України, МПК (2016.01) C22C 14/00, C22B 34/12 (2006.01) / С. В. Ахонін [та інш.] ; власник: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України. – A201406878, заявл. 19.06.2014, опубл. 10.03.2016. – бюл. № 5.

7 Фазовые превращения при непрерывном охлаждении в сплавах VT6ч и VT23 / В. С. Лясоцкая [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1986. – № 2. – С. 88–93.

8 Структура и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов, выполненных ЭЛС и ТИГ / С. В. Ахонин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8 (744). – С. 16–19.

9 Влияние режима дуговой сварки на фазовый состав сварных соединений высокопрочного титанового сплава системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr / В. Ю. Белоус [и др.] // Математическое моделирование и информационные техноло-

гии в сварке и родственных процессах : сб. докл. восьмой междунар. конф. – Киев : Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – С. 10–13.

10 CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) : A Comprehensive Guide / ed. : N. Saunders, A. P. Miodownik // Pergamon Materials Series : Vol. 1. – Oxford : Elsevier Science, 1998. – 479 p.

11 **Harding, R. A.** Theory and Practice of Computer Modelling of Phase Diagrams for Cast Irons / R. A. Harding, N. J. Saunders // Trans. American Foundrymen's Society. – 1997. – Vol. 105. – P. 451–457.

12 Phase Formation Modeling of an Alloy 706 Casting Using Computational Thermodynamics / B. A. Boutwell [et al.]. – Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives : Proceedings of the 8th International Symposium. – Warrendale, PA : TMS, 1996. – P. 99.

13 **Ахонин, С. В.** Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава BT23 при сварке TIG / С. В. Ахонин [и др.] // Автоматическая сварка. – Киев, 2013. – № 3. – С. 26–29.

14 Modeling of the Thermo-Physical and Physical Properties Relevant to Solidification / N. Saunders [et al.] // Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes : Proceedings of the Tenth International Conference. – Warrendale, PA : TMS, 2003. – P. 669–676.

15 **Akhonin, S. V.** Narrow-Gap TIG Welding of Titanium Alloys with Electromagnetic Redistribution of Thermal Energy of the Arc / S. V. Akhonin, V. Yu. Belous, A. F. Muzhychenko // Laser technologies in welding and materials processing : Proceedings of the 4th International Conference 26–29 May, 2009, vil. Katsiveli, Crimea, Ukraine. – Kiev : E. O. Paton Electric Welding Institute NASU. – P. 11–13.

V. Yu. BILOUS

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THE INFLUENCE OF THE ARC WELDING MODE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY T120

The technology of producing welded joints with a strength of at least 0.9 of the strength of the base material is considered. When analyzing the effect of the thermal welding cycle on titanium alloys, anisothermal transformation diagrams are studied. The methodology for studying the influence of the thermal cycle of welding on the structural-phase transformations in the weld metal and the heat-affected zone of the experimental complex-alloyed titanium alloy T120 of the Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr system is improved and the properties are evaluated its welded joints. It is shown that high values of welding speeds provide the phase composition of the weld metal and the heat affected zone with a smaller number of metastable phases. T120 titanium alloy welded joints made by argon arc welding have a tensile strength of 1162 MPa, which corresponds to 97 % of the alloy strength.

Keywords: titanium, titanium alloys, argon arc welding, weld structure, anisothermal transformation diagram.

Получено 14.06.2020