

УДК 669.295

С.В. Путырский¹, А.Л. Яковлев¹, Н.А. Ночовная¹, В.А. Крохина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА VT22M

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10

Представлены результаты исследования влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой, из сплава VT22M. Помимо традиционно применяемого ступенчатого режима для штамповок из сплава VT22M рассматривалась возможность использования термической обработки для получения прочности $\sigma_s \geq 1200$ МПа и с нагревом выше температуры $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -перехода. Исследовалось влияние вакуумной термической обработки по ступенчатому режиму и режиму с нагревом выше температуры $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -перехода на свойства сварных соединений и основного металла. Исследованы также свойства сварных соединений, выполненных с применением вставки из сплава VT1-0.

Ключевые слова: высокопрочные титановые сплавы, деформация, механические свойства, термическая обработка, микроструктура, вязкость разрушения, электронно-лучевая сварка.

S.V. Putyrskiy¹, A.L. Yakovlev¹, N.A. Nochovnaya¹, V.A. Krokhdina¹

RESEARCH OF DIFFERENT HEAT TREATMENT MODES INFLUENCE ON PROPERTIES OF SEMI-FINISHED PRODUCTS AND WELDED JOINTS FROM TITANIUM ALLOY VT22M

The article presents the results of a study of the various heat treatment effects on the semi-finished and welded joints properties, made by electron-beam welding made of alloy VT22M. In addition to the traditional used step mode for forgings made of VT22M, the possibility of using heat treatment for strength $\sigma_s \geq 1200$ MPa and heat treatment with heating above the $\alpha \rightleftharpoons \beta$ transition temperature has been considered. The effect of vacuum heat treatment by stepped mode and the mode with heating above the transition temperature $\alpha \rightleftharpoons \beta$ on the properties of welded joints and the semi-finished has been investigated. Also the properties of welded joints have been investigated when using an insert made of alloy VT1-0.

Keywords: high-strength titanium alloys, deformation, mechanical properties, heat treatment, microstructure, fracture toughness, electron-beam welding.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Эффективность изготовления деталей и узлов из высокопрочного титанового сплава VT22 подтверждается многолетним опытом его успешного применения в авиационной технике [1]. Высокопрочный титановый сплав VT22 широко применен в конструкции самолетов КБ Яковлева, Ильюшина, Антонова, Бериева. Высокая прокаливаемость (до 200 мм) сделала наиболее целесообразным применение данного сплава для изготовления крупногабаритных высоконагруженных элементов конструкции. Комплекс механических свойств сплава VT22 позволил применить данный сплав для изготовления элементов конструкции шасси самолетов Ил-76, Ил-86, Ил-96, Як-40, Бе-200, Ан-124.

В авиационной промышленности существует тенденция [2] создания модификаций ранее вы-

пускаемых изделий с увеличенной взлетной массой и ресурсом, что делает особо актуальной задачу повышения надежности и ресурса ответственных узлов и агрегатов конструкции самолетов. Для ее решения в части деталей, сконструированных с применением высокопрочных титановых сплавов, во ФГУП «ВИАМ» разработаны модификации сплавов VT22 и VT23 – сплавы VT22M [3] и VT23M [4, 5] соответственно, отличающиеся более узкими диапазонами содержания легирующих элементов и сниженным уровнем максимально допустимого содержания примесных элементов, что позволяет добиться повышения гарантированного уровня значений характеристик прочности и надежности.

Сплав VT22M относится к сплавам переходного класса и имеет коэффициент β -стабилизации,



Рис. 1. Полуфабрикаты из сплава VT22M после проведенияковки (а) и штамповки (б)

равный $K_{\beta} \approx 1$. Для сплавов данного класса свойственно изменение механических свойств в широком диапазоне в зависимости от режимов деформации и термической обработки [6, 7]. В зависимости от выбранных режимов термической обработки сплав VT22M может иметь высокую прочность и повышенную вязкость разрушения. В настоящее время для полуфабрикатов из сплава VT22 и, соответственно, сплава VT22M применяется ступенчатая термическая обработка в $(\alpha+\beta)$ -области, обеспечивающая достижение сочетания высоких значений прочности и долговечности материала авиационных деталей. Известно, что значительного повышения вязкости разрушения сплава VT22M возможно достичь путем проведения термической обработки с нагревом выше температуры $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -перехода, что, как правило, может негативно сказаться на других ресурсных характеристиках [8]. С учетом предъявляемых требований по прочности и вязкости разрушения для материала штамповок из сплава VT22M, необходимо опробование режимов термической обработки, позволяющих достичь высоких значений указанных характеристик. Применение новых для сплава VT22M режимов термической обработки даст возможность проектировщикам изделий рассчитывать на более широкую область применения сплава для изготовления различных элементов конструкции самолета [9, 10].

В данной работе приводятся результаты исследования влияния различных режимов термической обработки на свойства материала штамповок из сплава VT22M, а также сварных соединений.

В научных литературных источниках [11, 12] и в некоторой технической документации можно встретить указание на необходимость осуществления электронно-лучевой сварки (ЭЛС) сплава VT22M с применением вставок из малолегированных сплавов с целью повышения пластичности сварного соединения и соответствующего повышения ударной вязкости и вязкости разрушения. Целесообразность применения вставки из малолегированных сплавов вызывает сомнение ввиду снижения прочности сварного соединения. В связи с этим в данной работе также исследовались

механические свойства сварных соединений сплава VT22M с использованием вставки из сплава VT1-0.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.2. «Материалы на основе титана с регламентированной β -структурой» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Для проведения исследований в условиях производства ФГУП «ВИАМ» изготовлена опытная партия штамповок из сплава VT22M с завершающей деформацией в $(\alpha+\beta)$ -области. На рис. 1 представлен вид полуфабрикатов послековки и окончательной штамповки.

Темплеты из изготовленных штамповок подвергали термической обработке в камерной лабораторной печи Nobertherm по режимам:

- режим №1 – термическая обработка, аналогичная применяемой для сплава VT22, – двойной ступенчатый отжиг с первой ступенью, включающей нагрев до температуры 700–950°C и выдержку, охлаждение с печью до температуры 600–800°C;
- режим №2 – термическая обработка, обеспечивающая высокие значения прочности – двойной отжиг с нагревом первой ступени до температуры 700–950°C;
- режим №3 – β -отжиг с нагревом до температуры 800–1000°C.

Для исследования влияния различных режимов термической обработки на свойства сварных соединений штамповок из сплава VT22M изготовлены заготовки для последующей ЭЛС и выполнены их сварка. Кольцевые и прямолинейные сварные образцы представлены на рис. 2. На авиационных предприятиях сварка элементов конструкции, как правило, выполняется без проведения предварительной термической обработки. Последующая термическая обработка осуществляется в вакууме или в защитной атмосфере инертных газов.

Проведение термической обработки в вакууме определяет необходимость корректировки ее

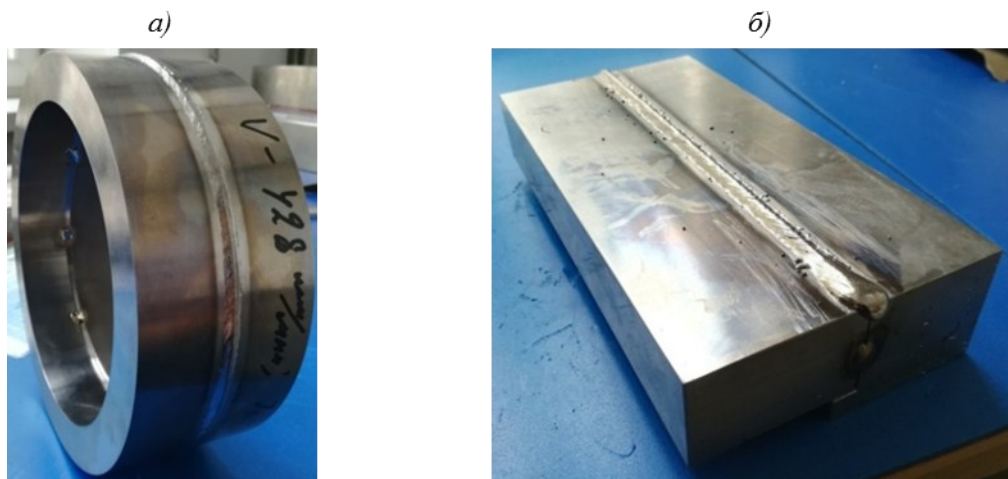


Рис. 2. Полуфабрикаты из сплава VT22M после сварки:
 а – кольцевой сварной образец; б – прямолинейный сварной образец

режимов. Для обеспечения достижения требуемого уровня свойств основного металла и сварного шва при вакуумной термической обработке сплава VT22M охлаждение необходимо осуществлять с регламентированной скоростью. Требуемая скорость охлаждения обеспечивается за счет напуска в рабочую камеру инертного газа. Охлаждение с температуры второй ступени следует осуществлять до температуры на 100–150°C ниже температуры старения. Свойства сварных соединений исследовали после ступенчатой термической обработки и термической обработки с нагревом в β -область. Свойства сварных соединений, выполненных со вставкой из сплава VT1-0, исследовали после термической обработки по ступенчатому режиму.



Рис. 3. Установка для вакуумной термической обработки MonoTherm

Термическую обработку (ТО) сварных образцов из сплава VT22M осуществляли в вакуумной печи MonoTherm (рис. 3) по следующим режимам:

– режим №1 – $(\alpha+\beta)$ -ТО: двойной ступенчатый отжиг с первой ступенью, включающей нагрев до

температуры 700–950°C и выдержку, охлаждение с печью до температуры 600–800°C и контролируемой скоростью охлаждения;

– режим №3 – β -ТО: β -отжиг с нагревом до температуры 800–1000°C и контролируемой скоростью охлаждения.

Испытания на растяжение образцов из титанового сплава VT22M проводили по ГОСТ 1497 на испытательной машине Zwick/Roell Z400. Испытания на ударный изгиб образцов из титановых сплавов выполняли в соответствии с ГОСТ 9454, испытания на определение вязкости разрушения – по ГОСТ 25.506.

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении, на ударную вязкость и вязкость разрушения образцов из штамповок сплава VT22M после термообработки по представленным режимам приведены в табл. 1.

На рис. 4 приведены изображения микроструктуры образцов из штамповок сплава VT22M после термической обработки по представленным режимам.

После выполнения ЭЛС образцов без термообработки для проведения исследования механических свойств и структуры изготовлены макрошлифы сварных соединений до проведения термической обработки. Изображения макроструктуры сварных образцов представлены на рис. 5. При анализе макроструктуры сварных образцов сварочных дефектов (трещин, пор) не обнаружено.

Результаты испытаний сварных соединений образцов, в том числе после сварки со вставкой из сплава VT1-0, а также образцов из основного металла после различных режимов термической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 1

Свойства штамповок из сплава ВТ22М после различных режимов термической обработки (ТО)

Условный номер режима ТО	Модуль упругости, ГПа	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	$KCU, \text{кДж/м}^2$	$K_{1c}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
		МПа		%			
№1 двойной ступенчатый отжиг	119	1100	1160	14,0	30	548	75
	118	1140	1190	17,0	27	654	77
	118	1070	1140	15,0	28	617	71
Среднее значение	118	1103	1163	15,3	28,3	606	74
№2 двойной отжиг	120	1200	1240	12,5	50,0	280	55
	121	1220	1270	10,0	25,0	290	52
	120	1230	1280	10,0	28,0	279	63
Среднее значение	120	1217	1263	11,0	34,0	283	56,7
№3 β -отжиг	116	1210	1300	6,4	5,2	248	85
	115	1210	1290	4,0	4,8	567	81
	116	1210	1290	4,8	4,4	579	–
Среднее значение	116	1210	1293	5,1	4,8	464,7	83

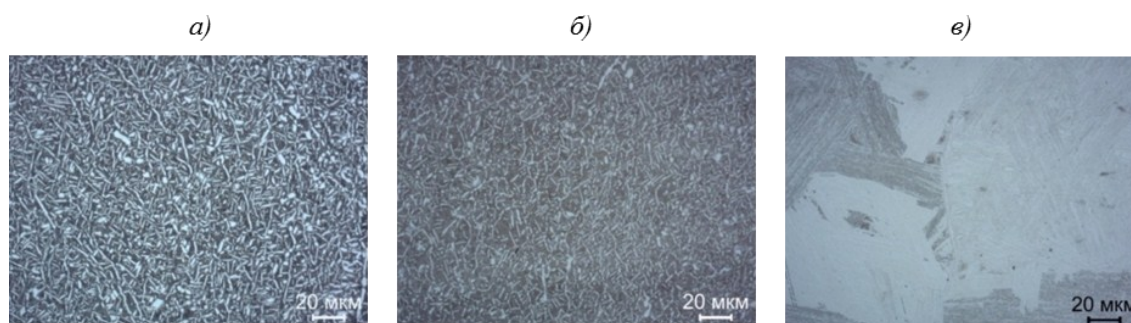


Рис. 4. Микроструктура штамповок после термической обработки по режимам ТО1 (а); ТО2 (б) и ТО3 (в)

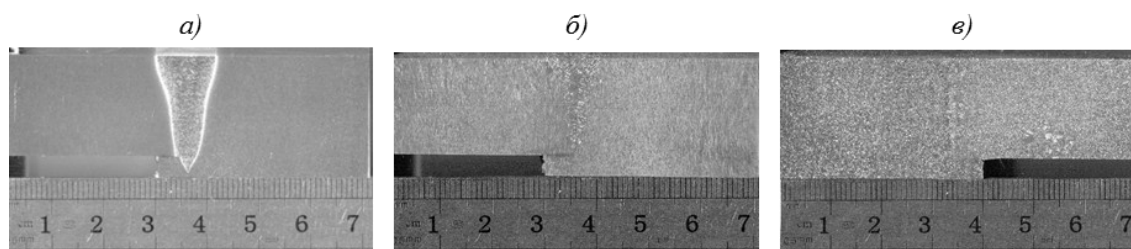


Рис. 5. Макроструктура сварных соединений без термической обработки (а) и после термообработки по режимам (α+β)-ТО (б) и β-ТО (в)

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение образцов сварных соединений штамповок из сплава ВТ22М после различных режимов термической обработки (ТО)

Условный номер образца	Вид обработки	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
		МПа		%	
1	ЭЛС+(α+β)-ТО	1100	1050	–	–
2		1100	1050	–	–
3		1080	1050	–	–
	Среднее значение	1093	1050	–	–
4	ЭЛС+β-ТО	1020	980	–	–
5		1040	980	–	–
6		1040	990	–	–
	Среднее значение	1033	983	–	–
7	ЭЛС со вставкой из сплава ВТ1-0, (α+β)-ТО	900	820	–	–
8		910	840	–	–
9		880	800	–	–
	Среднее значение	896	820	–	–
10	Основной металл, (α+β)-ТО	1140	1120	12,5	26,0
11		1130	1100	13,5	25,0
12		1130	1110	15,0	41,0
	Среднее значение	1133	1110	13,7	30,7
13	Основной металл, β-ТО	1090	1020	9,6	18,0
14		1090	1020	9,6	18,5
15		1100	1030	11,2	20,5
	Среднее значение	1093	1023	10,1	19,0

Из полученных значений следует, что после проведения термической обработки по рассматриваемым режимам, а также в случае сварки с применением вставки из сплава ВТ1-0, прочность сварного соединения составляет:

Термическая обработка (ТО)	σ_{β} , МПа	$\sigma_{\beta,св}$, МПа	$\sigma_{\beta,св}/\sigma_{\beta}$
($\alpha+\beta$)-ТО	1133	1093	0,97
β -ТО	1093	1033	0,95
ЭЛС со вставкой из сплава ВТ1-0, ($\alpha+\beta$)-ТО	1133	896	0,79

Результаты испытаний образцов из сварных соединений на ударную вязкость представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены результаты испытаний сварных образцов и основного металла на определение вязкости разрушения. Значения K_{Ic} удалось определить не на всех испытанных образцах – в ряде случаев получены значения K_Q . Отметим высокие значения $K_{Ic}=77,5$ МПа $\sqrt{м}$, полученные на основном металле образца из сплава ВТ22М после вакуумной термической обработки. Получение K_Q на испытанных образцах указывает на высокую пластичность материала, в том числе сварных соединений. Значения K_{Ic} могут быть получены на данном материале при испытании образцов с большей толщиной.

Выполнены испытания на малоцикловую усталость образцов из прямолинейных сварных темплетов, прошедших термическую обработку по режимам ($\alpha+\beta$)-ТО и β -ТО, и из темплетов, сваренных со вставкой из сплава ВТ1-0, прошедших термическую обработку по режиму ($\alpha+\beta$)-ТО. Испытывали корсетные цилиндрические образцы с $K_T=1,01$. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

В соответствии с результатами испытаний наибольшее количество циклов выдерживают образцы, прошедшие термическую обработку по режиму ($\alpha+\beta$)-ТО. Наименьшие результаты получены на образцах из темплета, сваренного со вставкой из сплава ВТ1-0, что является следствием ослабления материала сварного шва.

Микроструктуру сварных образцов из сплава ВТ22М после термической обработки (рис. 6) исследовали методами оптической и растровой микроскопии – представлена микроструктура основного металла, зоны термического влияния (ЗТВ) и сварного шва. Видно, что в случае термической обработки, проводимой полностью в ($\alpha+\beta$)-области, микроструктура ЗТВ состоит из зон со структурой основного металла и переходной зоны с мелкопластинчатой структурой, что является следствием нагрева ЗТВ выше температуры $\alpha\rightleftharpoons\beta$ -перехода при сварке. Микроструктура сварного шва имеет пластинчатое строение.

В случае сварки со вставкой из сплава ВТ1-0 в сварном шве меняется количественное соотношение α - и β -фаз вследствие уменьшения содержания легирующих элементов – в основном β -стабилизаторов в металле шва.

В результате проведения термической обработки по выбранному режимам в штамповках из сплава ВТ22М формируется различная микроструктура, что определяет различия в механических свойствах материала. Микроструктуру после термической обработки по режиму №1 (двойной ступенчатый отжиг) можно охарактеризовать как структуру смешанного типа, в которой выделения α -фазы присутствуют в виде пластин и глобул. В микроструктуре материала штамповок после термической обработки по режиму №2 (двойной

Таблица 3

Результаты испытаний образцов из сварных соединений на ударную вязкость

Условный номер образца	Вид обработки	KCU , кДж/м ²
1	Вертикальный луч, ($\alpha+\beta$)-ТО	344
2		373
3		400
Среднее значение		372
4	Сварка со вставкой из сплава ВТ1-0, ($\alpha+\beta$)-ТО	301
5		373
6		427
Среднее значение		367
7	Основной металл, ($\alpha+\beta$)-ТО	380
8		501
9		531
Среднее значение		470
10	Вертикальный луч, β -ТО	394
11		446
12		465
Среднее значение		435
13	Основной металл, β -ТО	567
14		553
15		513
Среднее значение		544

Таблица 4

Результаты испытаний сварных прямолинейных образцов на вязкость разрушения

Условный номер образца	Вид обработки	K_Q	K_{Ic}
		МПа $\sqrt{м}$	
1	Сварной образец, ($\alpha+\beta$)-ТО	–	52
2		–	92
Среднее значение		–	72
3	Сварной образец со вставкой из сплава ВТ1-0, ($\alpha+\beta$)-ТО	86	–
4		93	–
Среднее значение		89,5	–
5	Сварной образец, β -ТО	110	–
6		107	–
Среднее значение		108,5	–
7	Основной металл, β -ТО	111	–
8		106	–
Среднее значение		108,5	–
9	Основной металл, ($\alpha+\beta$)-ТО	–	76
10		–	79
Среднее значение		–	77,5

Таблица 5

Результаты испытаний на малоцикловую усталость сварных образцов из сплава ВТ22М (параметры нагружения: $f=15$ Гц, коэффициент асимметрии $R_\sigma=0,1$; температура испытания 20°C , $\sigma_{max}=800$ МПа)

Условный номер образца	Вид обработки	N_p , циклов
1	($\alpha+\beta$)-ТО	200000*
2		200000*
3		200000*
Среднее значение		≥ 200000
4	Сварка со вставкой из сплава ВТ1-0, ($\alpha+\beta$)-ТО	13690
5		2900
6		15840
Среднее значение		10810
7	β -ТО	53650
8		102160
9		170060
Среднее значение		108623

* Образец снят без разрушения.

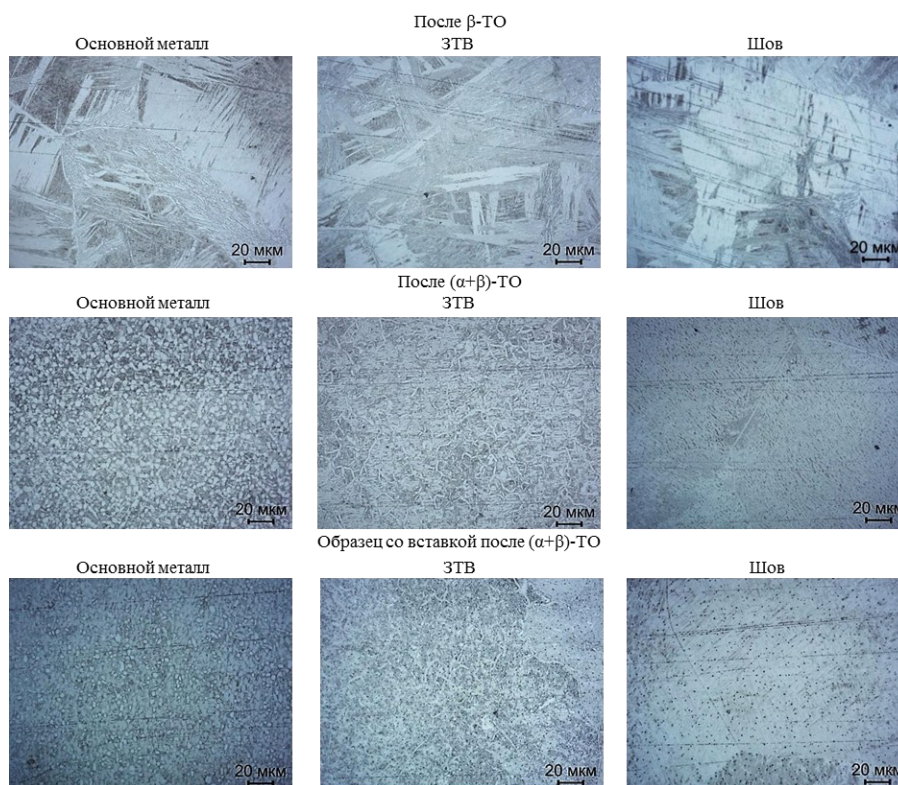


Рис. 6. Микроструктура (оптическая микроскопия) сварных образцов после термической обработки (ТО)

отжиг) практически отсутствуют глобулярные выделения α -фазы, что, вероятно, связано с отсутствием выдержки при температуре $T_{п.п.}(100-150)^\circ\text{C}$. Размер структурных составляющих после термической обработки по режиму №2 меньше, чем по режиму №1, что обуславливает более высокую прочность образцов: $\sigma_B \geq 1240$ МПа при $\delta \geq 12\%$. Однако значения вязкости разрушения (K_{Ic}) и ударной вязкости (КСУ) после термической обработки по режиму №2 значительно ниже, чем после термической обработки по режиму №1.

Образцы, обработанные по режиму №3 (β -отжиг), с температурой нагрева первой ступени в β -области характеризуются крупными первичными β -зернами с расположенными в них пластинами α -фазы. При испытаниях на растяжение образцы после обработки по режиму №3 обладают высокой прочностью ($\sigma_B \geq 1290$ МПа) и низкой пластичностью ($\delta \geq 4,4\%$). Однако получаемая структура позволяет обеспечить высокие значения вязкости разрушения материала ($K_{Ic} \geq 81$ МПа $\sqrt{\text{м}}$) даже при столь низких значениях относительного удлинения [14]. При термической обработке с нагревом в β -область определяющим фактором, влияющим на механические свойства материала, является скорость охлаждения с температуры β -области. Наиболее целесообразным выглядит проведение термической обработки сплава ВТ22М, включающей нагрев в β -область, с контролем скорости охлаждения, что можно реализовать при проведении вакуумной термической обработки и применении контролируемого напуска инертного газа для обеспечения скоростей охлаждения в заданных диапазонах.

Создание в материале β -превращенной структуры служит эффективным методом повышения вязкости разрушения [15]. По нашему мнению, наиболее предпочтительным является применение для этой цели завершающей деформации в β -области. Однако при этом для достижения требуемой морфологии структурных составляющих деформацию в β -области необходимо осуществлять с высокой степенью, что не всегда может быть реализовано. В этом случае для повышения

вязкости разрушения целесообразно рассматривать применение термической обработки с нагревом в β -область.

Полученные результаты испытаний образцов после термической обработки по режиму №2 свидетельствуют о достаточно высокой (в сравнении с аналогами) вязкости разрушения сплава ВТ22М – $K_{Ic} \geq 52$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, даже после термической обработки, обеспечивающей прочность $\sigma_B \geq 1200$ МПа (табл. 6).

Результаты испытаний сварных соединений и основного металла после вакуумной термической обработки показывают, что после β -термической обработки прочность сварного соединения и основного металла ниже, чем после термической обработки по ступенчатому режиму. Применение вставки из малолегированного сплава ВТ1-0 снижает прочность сварного соединения более чем на 18%.

Особо обращают на себя внимание результаты испытаний на определение ударной вязкости, приведенные в табл. 3. Образцы на определение ударной вязкости сварных соединений, выполненных со вставкой из сплава ВТ1-0, при испытаниях показали самые низкие результаты, что, по видимому, является следствием низкой прочности сварного соединения. Ударная вязкость является комплексной характеристикой, зависящей от совокупности прочностных и пластических свойств материала. Ее величина тем больше, чем выше пластичность и прочность материала [16]. Повышение пластичности и снижение прочности, которые происходят при разбавлении материала шва нелегированным сплавом ВТ1-0, не обеспечивают существенного повышения ударной вязкости.

При этом применение вставки из сплава ВТ1-0 имеет негативное влияние на прочностные и усталостные характеристики сварного соединения. Как видно из результатов усталостных испытаний, приведенных в табл. 5, сварные образцы со вставкой из сплава ВТ1-0 выдерживают наименьшее число циклов. Наилучшее сопротивление усталостному разрушению демонстрируют образцы сварных соединений после ступенчатой термической обработки, что является классическим результатом.

Таблица 6

Механические свойства сплава ВТ22М и его аналогов

Свойства	Минимальные значения физико-механических свойств сплава			
	ВТ22М		VST 5-5-5-3 (закалка+старение)	Ti –10V–2Fe–3Al
	ступенчатая ТО	закалка+старение		
$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	≥ 1140	≥ 1240	≥ 1230	≥ 1100
$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$, МПа	≥ 1070	≥ 1200	≥ 1180	≥ 1000
δ , %	$\geq 14,0$	$\geq 10,0$	$\geq 7,6$	–
ψ , %	$\geq 28,0$	$\geq 25,0$	$\geq 14,5$	–
K_{Ic} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	$\geq 71,0$	$\geq 52,0$	$\geq 41,0$	≥ 60
КСУ, кДж/м ²	≥ 548	≥ 279	≥ 281	–

Заключения

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– применение термической обработки с нагревом в β -область является целесообразным при наличии требований разработчика изделия к достижению на деталях из сплава ВТ22М повышенных значений вязкости разрушения;

– после термической обработки в β -область наилучшее сочетание свойств достигается при ее проведении в вакуумных печах с контролем скорости охлаждения;

– для сварных соединений ступенчатая термическая обработка, применяемая в настоящее время на авиастроительных предприятиях, является наиболее предпочтительной;

– сравнение полуфабрикатов из сплава ВТ22М после термической обработки для получения высокой прочности ($\sigma_{\text{в}} \geq 1200$ МПа) с высокопроч-

ными сплавами, подвергнутыми аналогичной термообработке для получения близкой прочности, показывает преимущество сплава ВТ22М по значениям вязкости разрушения;

– результаты испытаний образцов сварных соединений сплава ВТ22М, выполненных со вставкой из сплава ВТ1-0, показали отсутствие преимуществ по значениям ударной вязкости и вязкости разрушения. Прочностные и усталостные характеристики при применении вставки из низколегированных сплавов значительно снижаются. В настоящее время современные установки электронно-лучевой сварки обладают достаточно высокой герметичностью, что позволяет избежать газонасыщения шва и его охрупчивания. По мнению авторов статьи, применение вставки из сплава ВТ1-0 при электронно-лучевой сварке элементов конструкции из сплава ВТ22М является нецелесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путьрский С.В., Крохина В.А. Перспективы применения высокопрочного титанового сплава ВТ22 и его модификаций // Титан. 2018. №2 (60). С. 42–47.
4. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 8–13.
5. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.09.2018).
6. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаливающегося высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30.
7. Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
8. Микляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г. Кинетика разрушения. М.: Металлургия, 1979. 279 с.
9. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
10. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
11. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
12. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей и узлов авиакосмической техники // Сварочное производство. 2009. №3. С. 13–23.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Плохих А.И., Путьрский С.В., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Исследование структуры и свойств многослойных материалов на основе титановых сплавов // Титан. 2016. №4 (54). С. 42–47.
15. Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983. 160 с.
16. Золоторевский В.С. Механические свойства материалов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.