

УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-73-80

О.С. Кашипов¹, Т.В. Павлова¹, А.Р. Истракова¹, В.С. Калашиников¹**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖАРОПРОЧНЫХ ПСЕВДО- α -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Статья посвящена проблеме повышения прочностных характеристик жаропрочных титановых псевдо- α -сплавов. На примере сплава VT20 показан принципиальный подход к совершенствованию режимов термо-механической обработки деформированного полуфабриката. Предложена новая композиция сплава, обеспечивающая значительное повышение прочности по сравнению с серийными сплавами-аналогами. Проведен анализ структуры и механических свойств поковок из опытного сплава в сравнении с отечественными и зарубежными аналогами.

Ключевые слова: титановые сплавы, термическая обработка, микроструктура, механические свойства, жаропрочность.

The paper is dedicated to improving of mechanical properties of heat-resistant near- α - titanium alloys. An approach to improve parameters of heat treatment and machining of wrought semiproducts was described taking VT20 alloy as an example. A new alloy composition providing a significant increase of mechanical properties as compared to analogous commercial alloys was proposed. Analysis of structure and mechanical properties of experimental alloy forgings was carried out in comparison with domestic and foreign alloy analogues.

Keywords: titanium alloys, heat treatment, microstructure, mechanical properties, heat resistance.

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

Псевдо- α -титановые сплавы нашли широкое применение в промышленности, в том числе в изделиях авиационной техники. К безусловным достоинствам сплавов этого класса можно отнести:

- высокую технологичность при металлургическом производстве в процессе изготовления слитков (небольшое содержание тугоплавких легирующих элементов) [1, 2];
- хорошую свариваемость различными видами сварки (небольшое содержание стабильной β -фазы в сварном соединении и основном материале) [3–5];
- высокие рабочие температуры – не менее 450°C при содержании алюминия более 5,5%.

Наиболее высокопрочными жаропрочными промышленными псевдо- α -сплавами являются VT18У (система Ti–Al–Zr–Sn–Nb–Mo–Si) и VT20 (система Ti–Al–V–Mo–Zr), разработанные в ВИАМ, VT41 (система Ti–Al–Sn–Zr–Mo–Nb–W–Si–C), а также сплавы марок 5В (система Ti–Al–Mo–V–C) и 37 (система Ti–Mo–Zr–Nb–C) [6–10], разработанные во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Из зарубежных сплавов-аналогов следует упомянуть о жаропрочном псевдо- α -сплаве Ti-6242S (система Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Si) и высокопрочном (α + β)-сплаве Ti-62222S (система Ti–Al–Sn–Zr–Mo–Cr–Si) универсального применения, которые разработаны в США [11–13].

К существенным недостаткам псевдо- α -сплавов можно отнести низкий уровень прочностных

и усталостных характеристик в сравнении с более легированными (α + β)-сплавами. Деформированные полуфабрикаты из сплавов VT18У, VT20 и Ti-6242S в интервале температур 20–400°C по прочностным характеристикам сопоставимы с аналогичными полуфабрикатами из (α + β)-сплава VT6 с прочностью $\sigma_B^{20^\circ} \geq 930$ МПа и $\sigma_B^{400^\circ} = 670$ МПа. На сегодняшний день подобный уровень прочностных характеристик применительно к новым изделиям авиационной и космической техники явно недостаточен. Достижение уровня прочности: $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1100$ МПа, $\sigma_B^{400^\circ} \geq 800$ МПа, $\sigma_B^{550^\circ} \geq 685$ МПа на деформированных полуфабрикатах из псевдо- α -сплавов обеспечит универсальность применения такого сплава как высокопрочного и жаропрочного конструкционного материала.

Материалы и методы

Для исследований выплавлены опытные слитки массой до 50 кг по схеме двойного вакуумно-дугового переплава. В качестве шихтовых материалов применяли промышленные лигатуры и чистые материалы, поставляемые по действующим техническим условиям. Слитки ковали на молоте при температурах β -области, затем осаживали на прессе по двум схемам: при температурах (α + β)-области и β -области вблизи температуры полного полиморфного превращения. Масса готовых поковок после деформации на молотах и прессах составила 15–25 кг, толщина сечения – до 35–45 мм. Термическую обработку поковок про-

водили по режимам: одноступенчатого и двойного отжига – для материала после $(\alpha+\beta)$ -деформации и двойного отжига – для материала после β -деформации. Микроструктуру поковок исследовали в соответствии с ПИИ.2.785 «Металлографический анализ титановых сплавов». Определение механических свойств осуществляли по стандартным методикам (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145).

Результаты

Решение задачи повышения уровня механических свойств псевдо- α -сплавов можно условно разделить на две связанные между собой части: первая – изменение принципиального подхода к упрочнению основных фаз путем изменения режимов термомеханической и термической обработки; вторая – разработка нового химического состава сплава. Все серийные отечественные сплавы основаны на принципе твердорастворного упрочнения α -фазы. Применение этого принципа означает: с одной стороны – высокое содержание алюминия в этих сплавах (более 6,5%) вблизи границы $\alpha/(\alpha+\alpha_2)$ двойной системы Ti–Al, с другой – обуславливает применение одноступенчатого отжига при относительно низких температурах, при которых реализуются лишь начальные стадии рекристаллизации.

Опыт по разработке и совершенствованию жаропрочных псевдо- α - и $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов [14–17] позволяет сделать вывод, что сочетание твердорастворного и дисперсионного упрочнения может обеспечить значительное повышение прочностных характеристик сплавов, содержащих изоморфные β -стабилизаторы и кремний. Термическая обработка в этом случае должна проводиться по режиму двойного отжига. Первую ступень отжига необходимо проводить при температурах, близких к температуре полного полиморфного превращения $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$, – для обеспечения наибольшего твердорастворного упрочнения, получения пересыщенного твердого раствора α -фазы и метастабильной β -фазы, более полной рекристаллизации α - и β -фаз. Отжиг на второй ступени проводится при относительно низких температурах, при которых происходят распад метастабильных твердых растворов и дисперсионное упрочнение материала. Отличия в режимах термической обработки при одноступенчатом и двойном отжиге схематично приведены на рис. 1.

Следует отметить, что при термической обработке по режиму двойного отжига одним из существенных факторов, влияющих на микроструктуру и механические свойства, является фактическая скорость охлаждения полуфабриката после первой ступени отжига.

В качестве примера приведем механические свойства при применении двойного отжига вместо одноступенчатого или процесса ТМО (правка/калибровка при температурах $(\alpha+\beta)$ -области с

последующим старением) поковок (штамповок) массой 2–2,3 кг, сечением 15–25 мм из сплава ВТ20, полученных путем осадки исходного катаного прутка при температурах $(\alpha+\beta)$ -области. Обобщенные результаты испытаний образцов, вырезанных вдоль и поперек волокна полуфабрикатов, приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что применение двойного отжига приводит к повышению прочностных характеристик поковок из сплава ВТ20 при некотором снижении относительного сужения.

С учетом вышепредложенного подхода к термической обработке, а также современных представлений о влиянии легирующих элементов на свойства титановых сплавов оценена возможность корректировки промышленных композиций титановых сплавов. При разработке новой композиции псевдо- α -сплава (по отношению к серийным отечественным сплавам) в обобщенном виде можно отметить следующие критерии:

- снижение твердорастворного упрочнения алюминием с компенсацией пониженной прочности добавками элементов так называемых нейтральных упрочнителей, а также с учетом содержания элементов внедрения;

- ограниченное легирование элементами со значительной переменной растворимостью в основных твердых растворах в интервале температур термической обработки;

- легирование β -твердого раствора изоморфными и эвтектоидными β -стабилизаторами.

Основываясь на вышеизложенной концепции, предложена новая композиция псевдо- α -сплава. По уровню легирования β -стабилизаторами [18] новая композиция практически не отличается от серийного сплава ВТ20 (рис. 2). Плотность сплава составляет 4,59 г/см³. Содержание стабильной β -фазы в опытном сплаве в отожженном состоянии составляет ~4,5%, что соответствует сплаву ВТ20.

Важно отметить, что в опытном сплаве измельчение зерна и структурных составляющих происходит уже на стадии получения слитков, что позволяет облегчить и сократить количество операций горячей деформации при получении полуфабрикатов.

Микроструктура изготовленных по различным технологическим схемам поковок из опытного сплава после двойного отжига в сравнении с типичными структурами жаропрочных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов ВТ8-1 и ВТ25У в отожженном состоянии приведена на рис. 3.

Микроструктура поковки из опытного сплава после деформации в $(\alpha+\beta)$ -области и двойного отжига по степени дисперсности составляющих (глобулей первичной α -фазы, пластинок вторичной α -фазы) занимает промежуточное положение между $(\alpha+\beta)$ -титановыми сплавами ВТ8-1 и ВТ25У, что обусловлено выбранной композицией сплава. Микроструктуры опытных поковок, полу-

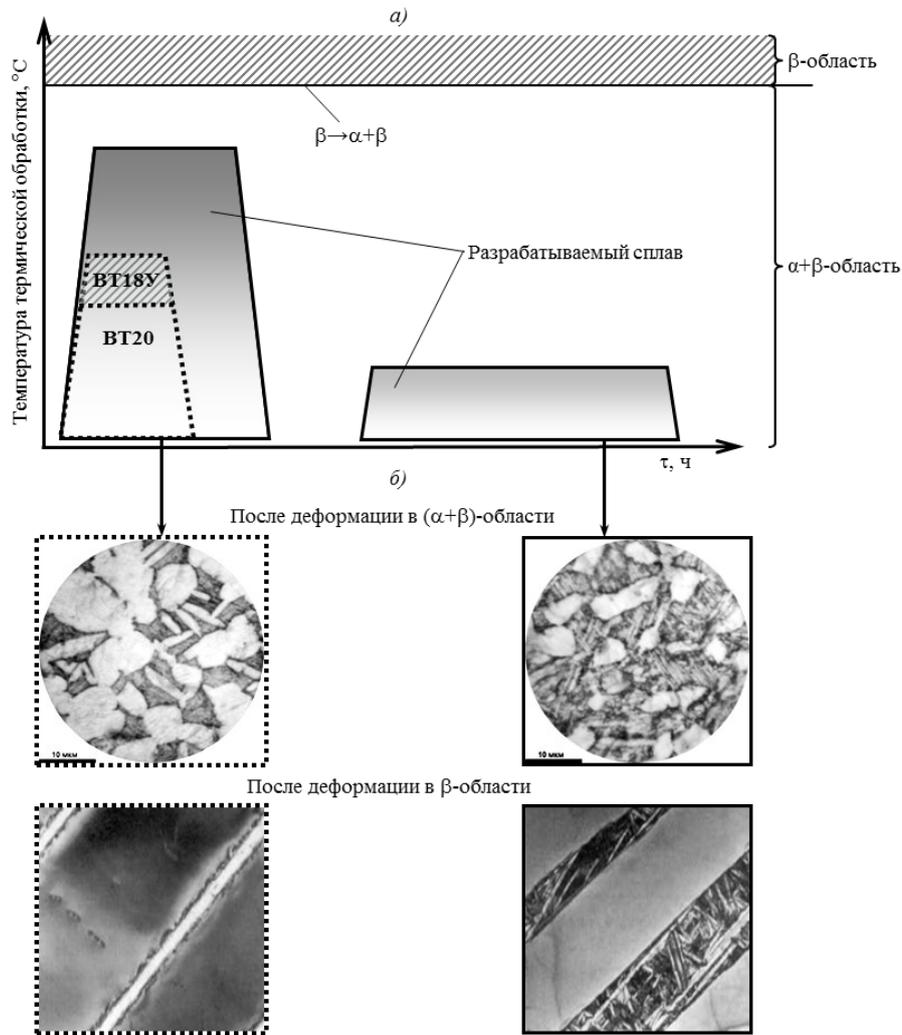
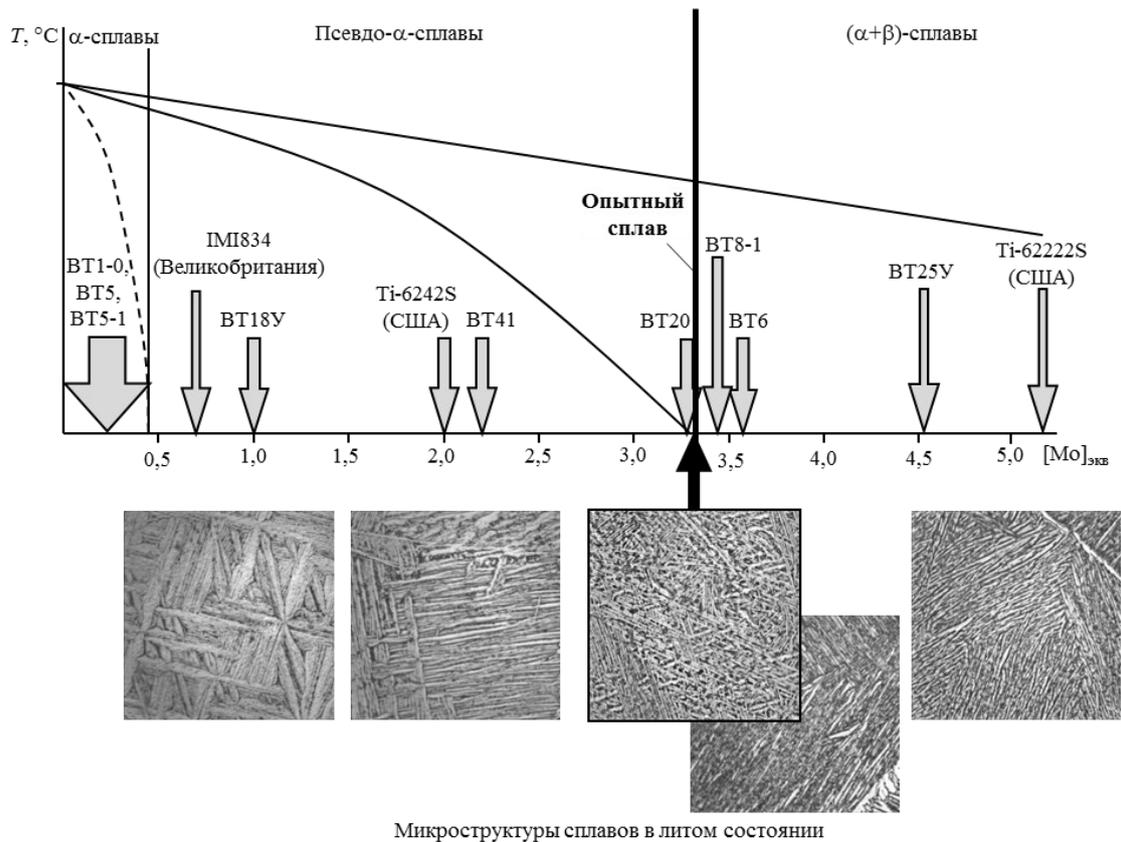


Рис. 1. Режимы термической обработки (а) и типы микроструктур (б): - - - - - серийный режим отжига; — — — — — двойной отжиг

Таблица 1

Сравнительные свойства поковок из сплава VT20

Вид обработки	Микроструктура	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$\sigma_B^{500^\circ}$, МПа
		МПа		%		
Одноступенчатый отжиг (серийный режим)		980–1020	895–975	14–17,2	48,7–55,4	675–715
Термомеханическая обработка (ТМО)		1000–1080	930–980	12–16,8	46,2–53	700–745
Двойной отжиг		1045–1110	915–985	13,6–18	38,4–43,3	720–750



Микроструктуры сплавов в литом состоянии

Рис. 2. Уровень легирования псевдо- α - и ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов, приведенный по содержанию к молибденовому эквиваленту

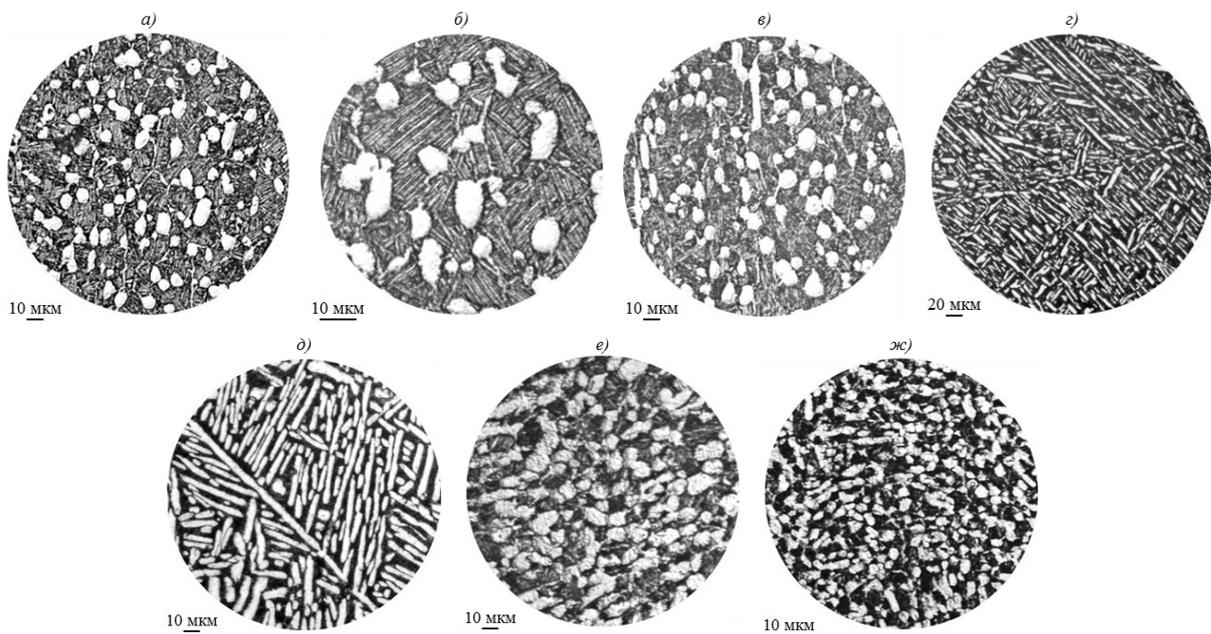


Рис. 3. Микроструктуры титановых сплавов, полученные методом оптической микроскопии:
a, б – после деформации в ($\alpha+\beta$)-области (поперечное направление волокна); *в* – после деформации в ($\alpha+\beta$)-области (продольное направление волокна); *г, д* – после деформации в β -области (поперечное направление волокна); *е* – типичная структура штамповки из сплава VT8-1; *ж* – типичная структура штамповки из сплава VT25U

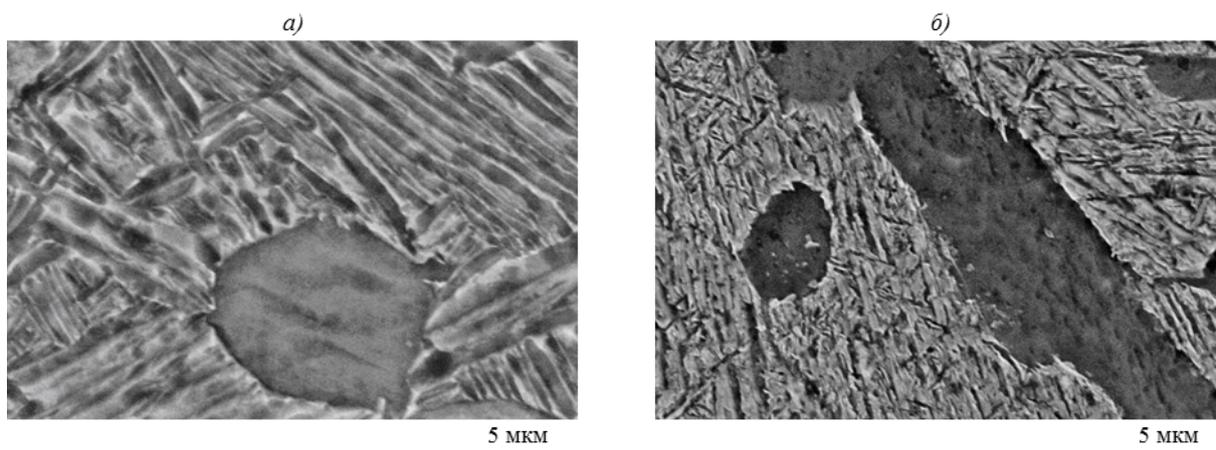


Рис. 4. Микроструктура поковки после деформации в $(\alpha+\beta)$ -области и двойного отжига (а) и деформации в β -области и двойного отжига (б)

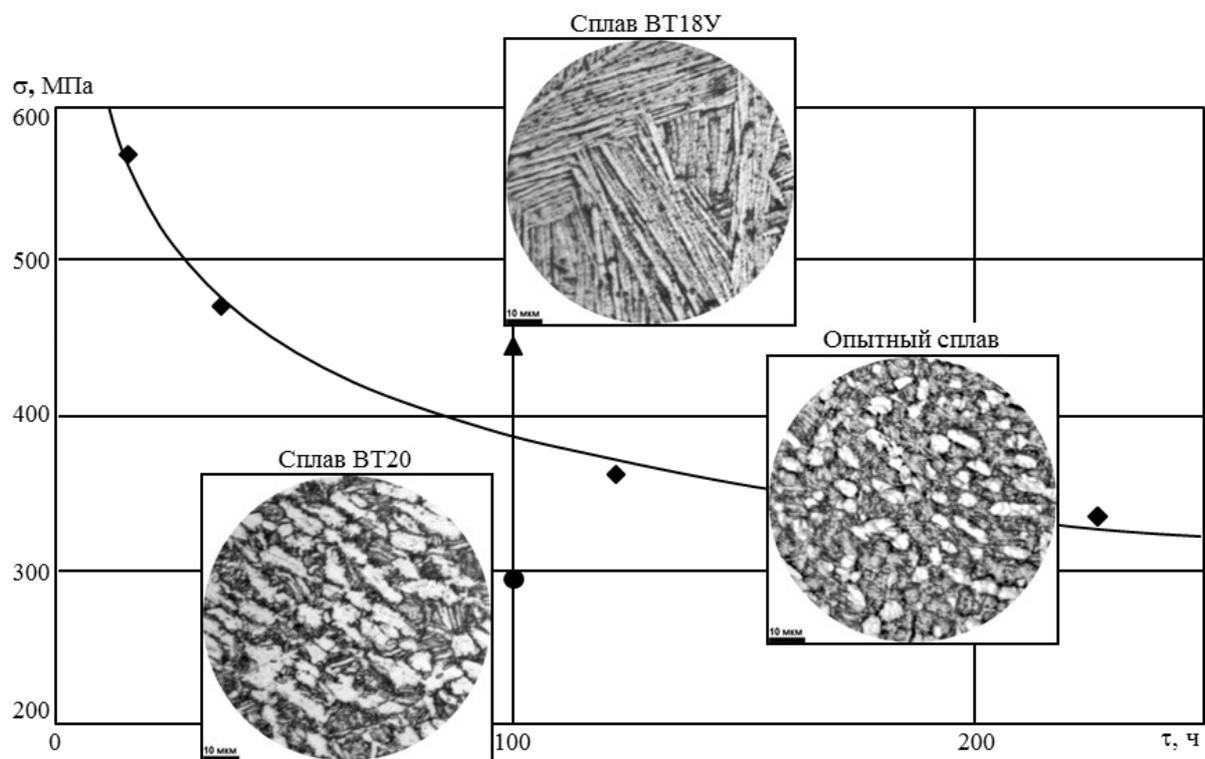


Рис. 5. Длительная прочность жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов после деформации в $(\alpha+\beta)$ -области и двойного отжига при температуре 550°C

Таблица 2

Механические свойства псевдо- α -титановых сплавов (минимальные и средние значения)

Свойства	Значения свойств опытного сплава после		
	($\alpha+\beta$)-деформации+ +двойного отжига	β -деформации+ +двойного отжига	($\alpha+\beta$)-деформации+ +одноступенчатого отжига
Рабочая температура, °С	550	550–600	550
$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	1130–1165	1100–1145	1080–1105
δ , %	9,5–12,5	7,0–9,2	8,8–12,2
ψ , %	17,0–19,0	15,0–16,5	18,0–18,5
KCU, Дж/см ²	28–30	–	26–27
$\sigma_B^{500^\circ}$, МПа	800–830	770–800	760–775
$\sigma_B^{550^\circ}$, МПа	780–810	730–750	–
$\sigma_B^{600^\circ}$, МПа	625–660	710–740	–
$\sigma_B^{650^\circ}$, МПа	540–580	565–590	–

Таблица 3

Механические свойства поковок из опытного сплава в сравнении с серийными жаропрочными титановыми сплавами в термоупрочненном состоянии

Свойства	Значения свойств сплавов после упрочняющей термической обработки (УТО)				
	опытного по режиму		BT3-1	BT8-1	BT25Y
	1	2			
$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	1295–1330	1480–1525	≥ 1260	≥ 1215	≥ 1295
δ , %	6,7–8,1	4,1–4,8	$\geq 7,0$	$\geq 9,0$	$\geq 6,5$
ψ , %	9,0–14,5	6,8–8,0	–	$\geq 15,0$	$\geq 13,5$
$\sigma_B^{550^\circ}$, МПа	850–890	1020–1055	–	–	–

Таблица 4

Механические свойства различных деформируемых титановых сплавов в отожженном состоянии (средние значения) [3, 6–13, 17, 19–22]

Сплав, область деформации	Плотность, г/см ³	Рабочая температура, °С	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	δ	ψ	$\sigma_B^{450^\circ}$, МПа	$\sigma_B^{500^\circ}$, МПа	$\sigma_{100}^{500^\circ}$, МПа
				%				
Опытный сплав ($\alpha+\beta$)/ β	4,59	550/600	1165/1145	16,5/9,2	19,0/16,5	850/860	830/800	500/–
5B, ($\alpha+\beta$)	~4,45	500	915	16,5	39,5	550	–	–
37, ($\alpha+\beta$)	~4,45	500	920	15,5	38,0	560	525	–
BT3-1, ($\alpha+\beta$)	4,6	450	1025	17,5	39,0	760	–	–
BT6, ($\alpha+\beta$)	4,45	350	985	14,5	45,0	–	–	–
BT14, ($\alpha+\beta$)	4,52	400	980	14,0	38,0	650	–	–
BT18Y, (β)	4,55	600	960	11,5	19,0	735	700	625
BT20, ($\alpha+\beta$)	4,45	500	995	15,5	37,0	695	675	450
BT22, ($\alpha+\beta$)	4,62	350	1160	19,5	43,0	–	–	–
BT23, ($\alpha+\beta$)	4,57	350	1100	8	18	700	660	–
BT25Y, ($\alpha+\beta$)	4,62	550	1185	14,5	32,0	880	850	700
Ti-6242S, ($\alpha+\beta$)	4,54	550	1000	14,0	33,0	740	685	–
Ti-2222S, (β)	4,65	450	1180	10,0	15,0	–	–	–
Ti-6246, ($\alpha+\beta$) и (β)	4,65	400/450	1100–1200	7,0–15,0	12,0–32,0	–	–	–
Ti-17, ($\alpha+\beta$) и (β)	4,65	400/450	1165–1200	8,5–10,0	14,0–32,0	–	–	–

ченные с помощью растрового электронного микроскопа, приведены на рис. 4.

Высокая дисперсность вторичной (превращенной) α -фазы после двойного отжига способствует увеличению прочностных характеристик материала поковок из опытного сплава.

Механические свойства поковок из опытного сплава в зависимости от температуры деформации и режимов термической обработки приведены в табл. 2.

Поковки из опытного сплава после двойного отжига обладают наиболее высоким уровнем прочности при сохранении удовлетворительных характеристик пластичности независимо от типа структуры. Сплав после деформации в β -области сохраняет высокий уровень прочности вплоть до 600°C.

Длительная прочность поковок из опытного сплава после $(\alpha+\beta)$ -деформации и двойного отжига при 550°C приведена на рис. 5. После β -деформации длительная прочность опытного сплава сопоставима с прочностью сплава BT18Y при тех же условиях испытаний. Длительная прочность поковок из опытного сплава с мелкозернистой глобулярно-пластинчатой микроструктурой занимает промежуточное положение между сплавами BT20 (с мелкозернистой структурой) и BT18Y (с крупнозернистой пластинчатой структурой).

Композиция опытного сплава также позволяет эффективно применять упрочняющую термическую обработку (УТО), состоящую из закалки в воде с температур $(\alpha+\beta)$ -области и старения. Механические свойства поковок из опытного сплава в термоупрочненном состоянии для двух режимов УТО, отличающихся температурой закалки, приведены в табл. 3.

Обсуждение результатов и заключения

Проведен сравнительный анализ физико-механических свойств ближайших титановых сплавов-аналогов по классу и области применения (табл. 4).

По прочности при 20°C опытный сплав превосходит аналогичные сплавы своего класса и

зарубежные сплавы-аналоги по прочности при повышенных температурах, находится на уровне легированных высокопрочных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов Ti-6246, Ti-17, Ti-6222S, BT22 и BT25Y.

Повышение прочностных характеристик легких сплавов является одной из задач, решаемых специалистами ВИАМ в рамках Стратегии развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [23, 24]. Разработанная композиция жаропрочного высокопрочного титанового псевдо- α -сплава обеспечивает эффективное сочетание дисперсионного и твердорастворного механизмов упрочнения. На опытных поковках с мелкозернистой глобулярно-пластинчатой микроструктурой после двойного отжига получен высокий уровень механических свойств: $\sigma_{20}^{20} \geq 1130$ МПа, $\delta \geq 9,5\%$, $\psi \geq 17\%$, $\sigma_{500}^{500} \geq 800$ МПа, $\sigma_{550}^{550} \geq 780$ МПа. Применение упрочняющей термической обработки позволяет повысить прочность поковки до уровня: $\sigma_{20}^{20} \geq 1295$ МПа, $\sigma_{550}^{550} \geq 1020$ МПа при сохранении пластичности материала. Опытный сплав (в зависимости от типа структуры деформированного полуфабриката) обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик при комнатной и повышенных температурах (не менее чем на 115 МПа) и рабочей температуры на 50–100°C по сравнению с серийным сплавом BT20. На композиции сплава получен патент Российской Федерации.

С учетом полученного комплекса механических свойств возможными областями применения нового сплава могут быть силовые статорные детали газотурбинных двигателей и энергетических установок с рабочей температурой до 550–600°C, а также детали для ракетно-космической техники, изготавливаемые из серийных титановых сплавов BT3-1, BT6, BT14 и BT20.

Дальнейшие исследования опытного сплава целесообразно продолжить в направлениях совершенствования режимов термомеханической обработки и исследования структуры и механических свойств опытно-промышленных полуфабрикатов с проведением их общей квалификации [25, 26].

Для проведения исследований приглашаем к сотрудничеству заинтересованные организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И.В., Кудрявцев А.С., Ушков С.С. и др. Опыт изготовления слитков массой до 17 тонн из псевдо-альфа сплавов //Титан. 2013. №2. С. 23–28.
2. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
3. Горынин И.В., Ушков С.С., Баранов А.В., Михайлов В.И., Ушаков Б.Г. Титановые сплавы для конструкций морского применения //Морские интеллектуальные технологии. 2009. №4. С. 61–66.
4. Mateo A., Corzol M., Angladal M. and etc. Welding repair by linear friction in titanium alloys //Materials Science and Technology. 2009. V. 25. №7. P. 905–913.
5. Zhiyong Chen, Jinwei Li, Jie Liu and etc. Creep Behavior of Fusion Zone and Base Metal of the Electron Beam Weldments of a Near-alpha Titanium Alloy //J. Mater. Sci. Technol. 2010. V. 26 (6). P. 564–571.
6. Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В., Лысенко Л.В., Травин В.В. Оптимизация комплекса служебных свойств титановых сплавов марок 5В и 37 для узлов и деталей энергетического оборудования //Титан. 2010. №4. С. 23–30.

7. Кудрявцев А.С., Паноцкий Д.А. Исследование характеристик вязкости разрушения высокопрочных свариваемых псевдо- α -титановых сплавов применительно к изделиям морской техники //Титан. 2010. №2. С. 9–15.
8. Иванова Л.А., Козлова И.Р., Кудрявцев А.С., Чудakov Е.В. Влияние термопластической обработки на комплекс свойств и структуру высокопрочных титановых сплавов типа 5В, используемых для деталей энергооборудования //Титан. 2010. №3. С. 36–42.
9. Кудрявцев А.С., Козлова И.Р., Иванова Л.А., Чудakov Е.В. Материаловедческое обеспечение производства колец из свариваемых высокопрочных титановых сплавов для деталей энергомашиностроения //Титан. 2013. №2. С. 29–31.
10. Травин В.В., Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Козлова И.Р. Ползучесть псевдо- α -титановых сплавов и ее влияние на напряженно-деформированное состояние деталей паровых турбин //Титан. 2013. №2. С. 4–12.
11. Materials Properties Handbook. Titanium alloys. ASM International. 1994. P. 337–376.
12. International titanium association. Specifications book. Fourth edition. 2005. P. 26–36.
13. Jackson J., Rice R. Preliminary material properties: Handbook. V. 2: SI Units. AFRL-ML-WP-TR-2001-4027. Battelle 505 King Avenue. Columbus, OH 43201-2693 Chapter 5. P. 5–3, 5–8.
14. Проходцева Л.В., Филонова Е.В., Наприенко С.А., Моисеева Н.С. Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава ВТ41 //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 407–412.
15. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
16. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Исследование термической стабильности прутка из сплава ВТ41 после различных режимов термической обработки //МиТОМ. 2010. №8. С. 30–34.
17. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
18. Il'yin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents /In: Titanium-99. Science and technology. 1999. P. 53–60.
19. Способ термической обработки высокопрочных (α + β)-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.
20. Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011.
21. Моисеев В.Н. Высокопрочные титановые сплавы для авиакосмической техники /В сб. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2002. Юбилейный науч.-технич. сб. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2002. С. 115–121.
22. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных микронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 02 (viam-works.ru).
23. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
24. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
25. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
26. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.