

УДК 669.018.95

Н.А. Ночовная¹, П.В. Панин¹, А.С. Кочетков¹, К.А. Боков¹

ОПЫТ ВИАМ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5

Рассмотрены вопросы разработки и исследования перспективных титановых сплавов с точки зрения концепции «экономного» легирования. Приведены свойства экономнолегированных титановых сплавов, разработанных во ФГУП «ВИАМ», в сравнении с зарубежными аналогами. Рассмотрены особенности литейного сплава VT40L (Ti–Al–V–Mo–Fe–Si) и двух новых конструкционных сплавов марок VT44 (Ti–Al–PЗЭ) и VT45 (Ti–Al–V–Fe–PЗЭ), предназначенных как для самостоятельного применения в мало- и средненагруженных конструкциях, так и для создания титанополимерных слоистых композиционных материалов, позволяющих обеспечить снижение массы до 20% по сравнению с цельнометаллическими конструкциями при сохранении одинаковой несущей способности. Показано, что новые сплавы псевдо- α - и $(\alpha+\beta)$ -классов, содержащие модифицирующие микродобавки PЗЭ, обладают повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: экономнолегированные титановые сплавы, слиток, отливка, термомеханическая обработка, фазовый состав, структура, механические свойства.

The issues of development and research of prospective titanium alloys are in focus from the point of view of «economical» alloyage approach. The properties of low-cost titanium alloys developed in FSUE «VIAM» are shown in comparison with foreign analogues. The features of cast alloy VT40L (Ti–Al–V–Mo–Fe–Si) and new structural alloys VT44 (Ti–Al–REE) and VT45 (Ti–Al–V–Fe–REE) are considered, the two latter alloys are designed both for independent use in low- and medium-strained constructions and for titanium-polymer laminates which give opportunity to provide with 20 percent weight reduction comparing to that of bulk-metal constructions with the same load bearing capacity. It is shown that the new near- α and $(\alpha+\beta)$ REE-containing alloys have improved mechanical and service properties.

Keywords: low-cost titanium alloys, ingot, casting, combined thermo mechanical treatment, phase combination, structure, mechanical properties.

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

Создание перспективных воздушных судов и реактивных двигателей нового поколения в равной степени требует применения новых материалов и обеспечения экономической эффективности, что отражено в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных в ВИАМ [1]. Разработка новых конструкционных материалов направлена в первую очередь на повышение удельных характеристик [2], что связано с постоянно возрастающими требованиями к весовой эффективности конструкций при обязательном условии обеспечения заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств материалов. Следует выделить гибридные материалы нового класса – слоистые металлополимерные композиционные материалы (МПКМ), исследование которых в настоящее

время вызывает большой практический интерес [3]. Данные композиционные материалы имеют в своей основе тонкие листовые полуфабрикаты из легких сплавов, которые чередуются с препрегами из стекло- или углепластика. Наибольшее развитие в обсуждаемой области получили так называемые СИАЛы – материалы на основе стеклопластика и алюминия [3, 4]. Помимо алюминиевых сплавов в МПКМ могут быть использованы также сплавы на основе титана [5], что позволяет существенно повысить удельные прочностные свойства гибридного материала [6]. Кроме того, весовая эффективность конструкций из титанополимерных композиционных материалов дает возможность обеспечить снижение массы на 20% по сравнению с цельнометаллическими конструкциями из алюминиевых сплавов и слоистых композиционных материалов системы Ti–TiAl₃ [6, 7].

Титановые сплавы обладают непревзойденными удельными характеристиками, но к настоящему времени практически все возможности по увеличению прочности и снижению плотности традиционных титановых сплавов исчерпаны [8]. Кроме того, многие высокотехнологичные титановые сплавы (например, сплавы марок ВТ38, ВТ23, SP-700, Beta CEZ) имеют сложную систему легирования и содержат дефицитные и дорогостоящие элементы. В связи с этим в данной работе проведен краткий обзор современного уровня разработок ФГУП «ВИАМ» в области экономнолегированных титановых сплавов для различного применения в сравнении с мировыми аналогами.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.4. «Титановые сплавы, совместимые с углепластиком» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Материалы и методы

Исследования для определения структуры и свойств проведены на полуфабрикатах из трех экономнолегированных титановых сплавов марок ВТ40Л, ВТ44 и ВТ45, разработанных во ФГУП «ВИАМ» (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исследуемых экономнолегированных титановых сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)							Фазовый состав
	Al	V	Mo	Zr	Fe	Gd	Ti	
ВТ40Л	5,9	1,5		0,8	0,4	–	Основа	α(+β)
ВТ44	3,7	–	–	–	0,5			α
ВТ45	5,7	2,2	–	–	2,4			α+β

Экспериментальные слитки сплавов массой ~30 кг выплавляли методом вакуумно-дуговой плавки с расходуемым электродом в печи ALD VAR L200, эксплуатируемой в ВИАМ с 2013 г. [10]. Для достижения химической и структурно-фазовой однородности слитков применен тройной переплав. Расходуемые электроды Ø70 мм готовили на вертикальном прессе П454 с усилием 160 тс методом проходного прессования сухой шихтовой смеси в конусную матрицу. После изготовления прессованные электроды выдерживали в сушильном шкафу при температуре 120–150°C не более 8 ч до начала плавки.

Структуру и фазовый состав слитков и полуфабрикатов исследовали методами оптической микроскопии (инвертированный металлографический микроскоп Olympus GX51, программный комплекс для анализа изображений SIAMS-700) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Bruker D8 ADVANCE). Подготовку шлифов осуществляли по стандартным методикам. Анализ химического состава проводили рентгенофлуоресцентным (спектрометр Bruker S4 Explorer) и микрорентгеноспектральным (ана-

лизатор Jeol JСМА-733) методами. Механические испытания проводили на универсальных испытательных машинах Zwick и Walter+Bai. Данные по механическим характеристикам зарубежных сплавов-аналогов взяты из опубликованных научных литературных источников.

Результаты

Концепция «экономного» легирования титановых сплавов основана на выборе таких легирующих элементов, которые имели бы относительно небольшую стоимость и/или входили бы в состав наиболее доступных лигатур (ВнАл, АМТ-1, МФТА и др.). Современные экономнолегированные (*англ.* low-cost/low-doped) титановые сплавы также могут содержать микродобавки (до 0,5% (по массе)) редкоземельных элементов (РЗЭ), введение которых приводит к незначительному удорожанию сплава, однако при этом дает существенный положительный эффект с точки зрения комплекса свойств и модифицирования структуры [11]. К экономнолегированным титановым сплавам относятся малолегированные сплавы, не содержащие дорогостоящих и/или дефицитных элементов (Мо, Та, Zr, Nb, W и др.) и имеющие в основе систем легирования относительно дешевые компоненты технической чистоты (Al, Fe, Cu и т. п.). При шихтовке таких сплавов часто используются доступные «естественные» лигатуры – ферротитан и феррованадий. К преимуществам экономнолегированных титановых сплавов следует также отнести широкие возможности использования лома и отходов титанового производства при выплавке.

Исследования в области создания и апробации малолегированных титановых сплавов интенсифицированы в ВИАМ с начала 2000-х гг. Уже в 2004 г. получен патент [12] на новый экономнолегированный титановый сплав, содержащий железо, азот и кислород в качестве основных легирующих элементов, а также небольшое количество молибдена для упрочнения, в % (по массе): основа – Ti; 0,6–1,0 Fe; 0,3–0,6 Мо, 0,3–0,4 O, 0,04–0,05 N. Сплав имеет умеренные прочностные свойства ($\sigma_b=800\text{--}890$ МПа), хорошую пластичность ($\delta=18,4\text{--}26,8\%$) и повышенную ударную вязкость ($KCU=520\text{--}560$ кДж/м²). Данный сплав рекомендован для применения в изделиях медицинского назначения, так как обладает повышенной биологической инертностью и не содержит токсичных элементов (например, ванадий). Однако основным недостатком сплава явилась его недостаточная низкотемпературная технологичность, что не позволяет изготавливать из него тонколистовые полуфабрикаты. Прочность сплава также недостаточна для изготовления авиационных деталей ответственного назначения.

В данной работе рассмотрены современные экономнолегированные титановые сплавы марок ВТ40Л, ВТ44 и ВТ45, разработанные в ВИАМ в течение последних 10 лет. Ниже приведена их краткая характеристика и основные области применения.

Сплав **ВТ40Л** является литейным сплавом, его композиция основана на применении экономного легирования с использованием кислорода и углерода. Сплав предназначен для получения отливок с прочностью на уровне 1050 МПа и повышенными характеристиками многочасовой усталостной прочности. Основное назначение сплава ВТ40Л – фасонные отливки для изготовления турбинных колес, крыльчаток, корпусов, промежуточных опор, кронштейнов – взамен серийных литейных титановых сплавов ВТ6Л и ВТ20Л. Основным принципом легирования сплава ВТ40Л является использование недефицитных β -стабилизаторов (V, Мо, Fe) и нейтрального упрочнителя (Zr), содержание которого не превышает 1,2%. Кроме основных легирующих элементов сплав легируется кислородом и углеродом, поэтому при прессовании расходуемых электродов обязательному контролю подлежит

содержание кислорода и углерода в титановой губке. Благодаря использованию комплексного подхода к выбору химического состава сплава, уже в слитке можно получить структуру с отсутствием внутридендритной ликвации, что значительно упрощает достижение однородного по морфологии структурного состояния при последующем литье отливок из данного сплава.

Сплав **BT44** (паспортизован в 2014 г.) является деформируемым конструкционным псевдо- α -титановым сплавом средней прочности. Система легирования сплава выбрана с учетом необходимости создания стабильной гомогенной структуры – не менее 95% (объемн.) α -фазы. Сплав умеренно легирован алюминием, который в большой степени определяет комплекс механических характеристик титановых сплавов [13]. В качестве микродобавки, приводящей к эффективному модифицированию литой структуры, использован гадолиний – редкоземельный элемент из группы лантаноидов. В отожженном состоянии сплав имеет псевдооднотазную структуру и не упрочняется с помощью термической обработки. Преимуществом сплава BT44 является его технологичность в сочетании с прочностными характеристиками и малой склонностью к водородной хрупкости, что дает возможность изготавливать из этого сплава деформированные полуфабрикаты при относительно низких температурах и малых усилиях деформации по сравнению со сплавами OT4, BT20 и ПТЗВ. Сплав BT44 предназначен для изготовления мало- и средненагруженных деталей внутреннего набора планера воздушного судна, работающих длительно при температурах до 350°C и кратковременно – до 425°C в общеклиматических условиях.

Сплав **BT45** (паспортизован в 2015 г.) является деформируемым конструкционным ($\alpha+\beta$)-титановым сплавом высокой прочности на основе системы Ti–Al–V–Fe. Сплав легирован алюминием, ванадием и железом для обеспечения комплекса прочностных характеристик; введение РЗЭ позволяет обеспечить эффективное модифицирование литой структуры. В отожженном состоянии сплав BT45 имеет двухфазную ($\alpha+\beta$)-структуру и содержит до 10% (объемн.) стабилизированной β -фазы. Кроме того, композиция сплава имеет существенное технологическое преимущество, так как предоставляет возможность использовать широкую номенклатуру шихтовых материалов. Деформированные полуфабрикаты упрочняются с помощью термической обработки, состоящей из закалки от температур верхнего интервала ($\alpha+\beta$)-области и старения в интервале температур 500–600°C с последующим охлаждением на воздухе. Сплав BT45 предназначен для изготовления средненагруженных деталей внутреннего набора планера воздушного судна, работающих длительно при температурах до 400°C и кратковременно – до 450°C в общеклиматических условиях.

Экономнолегированные титановые сплавы BT44 и BT45 имеют повышенную по сравнению со сплавами-аналогами (OT4, BT20, ПТЗВ, BT6, Ti-6-4) коррозионную стойкость поверхности деформированных полуфабрикатов в составе соединений с углепластиком после механической обработки. В связи с этим они рекомендованы для изготовления комбинированных соединений с препрегами углепластиков (элементы обшивки, декоративные конструкции и др.), работающих при температурах, определяемых теплостойкостью углепластика.

Обсуждение и заключения

Результаты определения комплекса физико-механических характеристик исследуемых сплавов в сравнении с соответствующими показателями сплавов-аналогов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнительные характеристики физико-механических свойств отечественных
и зарубежных экономнолегированных титановых сплавов**

Год	Композиция сплава, % (по массе)	Обработка	Физико-механические свойства при 20°C				Марка сплава	Организация- разработчик (страна)	Источник
			d , г/см ³	σ_B , МПа	δ , %	KCU , кДж/м ²			
1956	Технический титан	Отжиг	4,52	500	25–40	700	BT1-0	ВИАМ (СССР)	Паспорт на сплав
1961	Ti–2Al–1,5Mn	ТМО	4,55	700	15–25	~750	OT4-1	ВИАМ (СССР)	Паспорт на сплав
1999	Ti–4Al–2,5V–1,5Fe– –0,25O	Отжиг	4,51	945	≥10	–	–	TIMET Corp. (США)	[14]
2004	Ti–6Al–(0,5–4,0)Fe– –0,5N–0,2O–(0,5 P3Э)	Отжиг	4,48	1040	8,0	–	–	Daido Steel (Япония)	[15]
2004	Ti–0,8Fe–0,45Mo– –0,35O–0,045N	Отжиг	4,55	816	20,2	520	–	ВИАМ (РФ)	Патент ВИАМ
2004	Ti–5,9Al–1,5(V+Mo)– –0,8Zr–0,4Fe	Литье+ГИП	4,45	1060	7,0	≥290	BT40L	ВИАМ (РФ)	Паспорт на сплав
2005	Ti–6Al–1,8Fe–0,1Si	Отжиг	4,46	1021	12–16	≥350	Ti-62S	TIMET Corp. (США)	[16]
2009	Ti–7,5Al–1V–2Mo– –2Cr–0,5Fe–0,075P3Э	Отжиг	4,40	1270	10,0	–	MMM	Morris Manning Martin LLP (КНР)	[17]
2011	Ti–1Fe–0,35O–0,01N; Ti–1Fe–0,30O–0,04N	Отжиг	4,51 4,51	800 890	8,0 6,0	–	Super- TIX800; Super- TIX800N	Nippon Steel (Япония)	[18]
2014	Ti–3,7Al–0,5(Fe+P3Э)*	ТМО+отжиг	4,43	780	9,0	≥520	BT44	ВИАМ (РФ)	Паспорт на сплав
2015	Ti–5,7Al–2,2V– –2,4(Fe+P3Э)*	ТМО+ТО	4,40	1080	7,5	≥500	BT45	ВИАМ (РФ)	Паспорт на сплав

* Свойства приведены для деформированных полуфабрикатов (поковка толщиной 50 мм), полученных с помощью термомеханической обработки (ТМО) методом осадки при температурах однофазной β -области (суммарная степень деформации ~80%).

Дальнейшая работа в области экономнолегированных титановых сплавов будет направлена на разработку технологий термомеханической обработки (ТМО) деформируемых сплавов для получения бестекстурных [19] тонколистовых полуфабрикатов толщиной 0,4–0,8 мм, которые могут быть применены в слоистых титанополимерных композиционных материалах (ТПКМ). Кроме того, требуется разработка нового низко-модульного сплава на основе титана специально для изготовления деталей крепления для таких ТПКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. и др. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 226–230.
4. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2016).
5. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Современные экономнолегированные титановые сплавы: применение и перспективы развития // МиТОМ. 2016. №9 (735). С. 8–15.
6. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Экономнолегированные титановые сплавы для слоистых металлополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-2-2.

7. Panin P., Nochovnaya N., Kablov D., Alexeev E. Low-cost titanium alloys for titanium-polymer layered composites // Proc. of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014). St.-Petersburg. September 7–12, 2014 (CD).
8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
9. 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.
10. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2016).
12. Сплав на основе титана и изделие, выполненное из него: пат. 2222627 Рос. Федерация; опубл. 27.01.04.
13. Скворцова С.В., Филатов А.А., Дзунович Д.А., Панин П.В. Влияние содержания алюминия на деформируемость титановых сплавов при нормальной температуре // Технология легких сплавов. 2008. №3. С. 40–45.
14. Titanium-aluminum-vanadium alloys and products made therefrom: pat. 5980655 US; publ. 09.11.99 (Y. Kosaka; Titanium Metals Corp.).
15. High strength Ti alloy and its production method: pat. JP 2004010963; publ. 15.02.2004 (A. Suzuki, T. Noda).
16. Kosaka Y. et al. Recent development of titanium and its alloys in automotive and motorcycle applications // Proc. of 11th World Conf. on Titanium. 2007. Vol. II. P. 1383–1386.
17. Alpha plus beta type titanium alloy: appl. US 2009/0169416; publ. 02.07.09 (Morris Manning Martin LLP).
18. Titanium alloy part and method of manufacturing same: pat. 2508643 EP; publ. 10.10.12 (K. Takahashi et al.; Nippon Steel Corp.).
19. Ильин А.А., Скворцова С.В., Дзунович Д.А., Панин П.В., Шалин А.В. Влияние параметров термической и термомеханической обработки на текстурообразование в листовых полуфабрикатах из титановых сплавов // Технология машиностроения. 2012. №8. С. 8–12.