



УДК 669.018.44:669.295

**СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ  
ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ  
ГТД**

О.С. Кашапов

*кандидат технических наук*

А.В. Новак

Н.А. Ночовная

*доктор технических наук*

Т.В. Павлова

**Март 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Первая публикация статьи - в журнале «Авиационные материалы и технологии», специальный выпуск «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов», 2007 г.

Данная редакция (дополненная, переработанная) подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ», №3, 2013 г.

УДК 669.018.44:669.295

*О.С. Кашапов, А.В. Новак, Н.А. Ночовная, Т.В. Павлова,*

## **СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

*В статье отражены основные аспекты разработки и применения титановых сплавов для деталей газотурбинных двигателей. Проведено сравнение основных показателей физических и прочностных свойств жаропрочных и интерметаллидных титановых сплавов различных поколений. Указаны направления развития материалов и технологий рассматриваемого класса.*

**Ключевые слова:** *титановые сплавы, механические свойства, структура, интерметаллиды титана.*

*O.S. Kashapov, A.V. Novak, N.A. Nochovnaya, T.V. Pavlova,*

## **STATE, PROBLEMS AND PROSPECTS OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOYS FOR GTE PARTS**

*The paper describes the main aspects of the development and application of titanium alloys for turbine engine parts, comparison of the physical and mechanical properties of heat-resistant titanium and titanium aluminides alloys by different generations. The directions of the development of materials and technologies of the class were shown.*

**Key words:** *titanium alloys, mechanical properties, structure, titanium aluminides.*

Существенное повышение требований к экономичности и надежности газотурбинных двигателей, к снижению их шумовых характеристик и увеличению ресурса заметно обострили проблему выбора конструкционных материалов, используемых для изготовления ответственных деталей двигателя, в первую очередь, – для лопаток и дисков компрессора высокого давления.

Если учесть, что в современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет >30% (рис. 1) [1], то станет понятно, насколько важны эти материалы для авиации и насколько необходимо интенсивное развитие материаловедения титановых сплавов и технологии их производства.

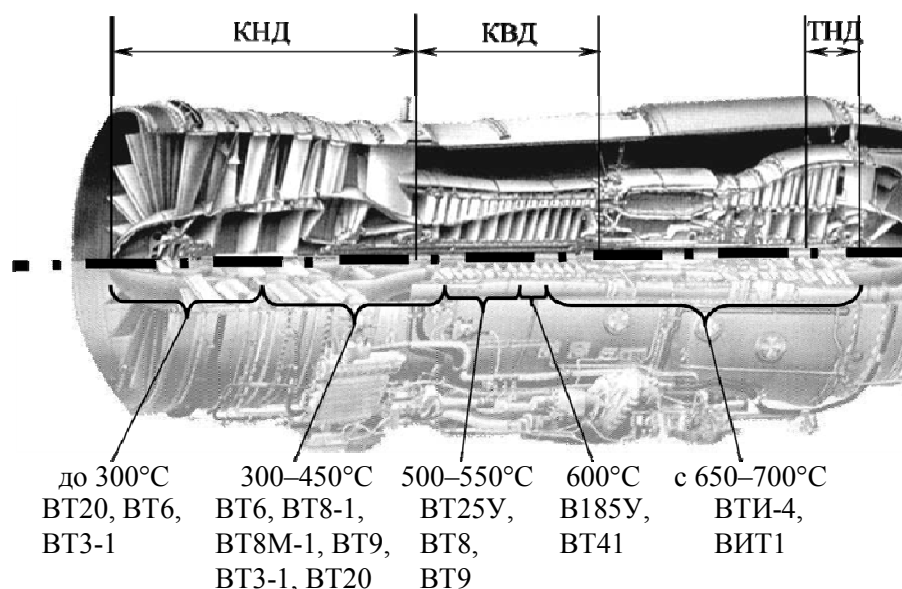


Рис. 1. Области применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции ГТД

Одним из главных лимитирующих факторов при разработке титановых сплавов стало требование по повышению рабочей температуры деталей компрессора высокого давления ГТД до 550–650°C. По этой причине создание жаропрочных титановых сплавов с высоким сопротивлением малоцикловой усталости и ползучести является в настоящее время одной из наиболее актуальных задач современного двигателестроения.

Прототипами таких сплавов стали отечественные жаропрочные титановые сплавы BT25Y и BT18Y, разработанные и внедренные в 80-х годах прошлого столетия, и зарубежные сплавы IMI834 и IMI550 (Великобритания). Различия в химических составах отечественных и зарубежных сплавов невелики, но они носят крайне принципиальный характер.

Разработчики сплавов серии IMI в целях обеспечения высокого сопротивления ползучести и термостабильности существенно уменьшили содержание  $\beta$ -фазы в своих сплавах. В результате этого значительно ухудшилась их технологичность. В отечественных сплавах небольшое количество остаточной  $\beta$ -фазы было сохранено, поэтому они обладают приемлемой для производства технологичностью, что позволяет изготавливать блиски, барабаны, диски и лопатки различных ступеней КВД авиационных двигателей. Однако наличие остаточной  $\beta$ -фазы привело к тому, что хотя по характеристикам кратковременной и длительной прочности при рабочих температурах отечественные титановые сплавы и превосходят импортные аналоги (табл. 1), но все же сопротивление ползучести и термическая стабильность при предельной температуре (600°C) у наших сплавов ниже, чем у зарубежных.

Механические свойства жаропрочных титановых сплавов [2]

Сплав	Предел прочности, МПа			Длительная прочность, МПа, в течение 100 ч	
	при температуре испытаний, °С				
	20	550	600	550	600
BT18У	910	–	600	–	372
IM834	1040	–	600	–	300
BT25У	1080	784	–	450	–
IM550	1048	715	597	410	–

Следует отметить, что приведенные в табл. 1 данные по уровню свойств жаропрочных титановых сплавов уже вряд ли удовлетворяют конструкторов. По этой причине относительно новые жаропрочные титановые сплавы – как отечественные, так и зарубежные (BT25У и BT18У, Ti-6-2-4-2 и IM834) – нуждаются в дальнейшем улучшении их эксплуатационных характеристик.

Несмотря на то, что исследователи подошли практически вплотную к предельным возможностям твердорастворного упрочнения псевдо- $\alpha$ -сплавов титана, проводимые во ФГУП «ВИАМ» в данном направлении работы, позволяют считать, что применение дополнительного многокомпонентного легирования обеспечит некоторое повышение жаропрочных характеристик титановых сплавов. Так, использование дополнительного легирования такими элементами, как W и Fe, позволило обеспечить повышение предела прочности  $\sigma_{\text{в}}^{600^\circ}$  до 720 МПа, и предела длительной прочности при 600°С на базе 100 ч ( $\sigma_{100}^{600^\circ}$ ) – до 335 МПа (рис. 2) для нового жаропрочного титанового сплава BT41. Улучшение прочностных характеристик и жаропрочности при введении дополнительных легирующих элементов связано, главным образом, с образованием некоторого количества карбидной фазы на основе вольфрама и упрочнением, вызванным дополнительным легированием  $\alpha$ -твердого раствора железом, введенным в пределах растворимости.

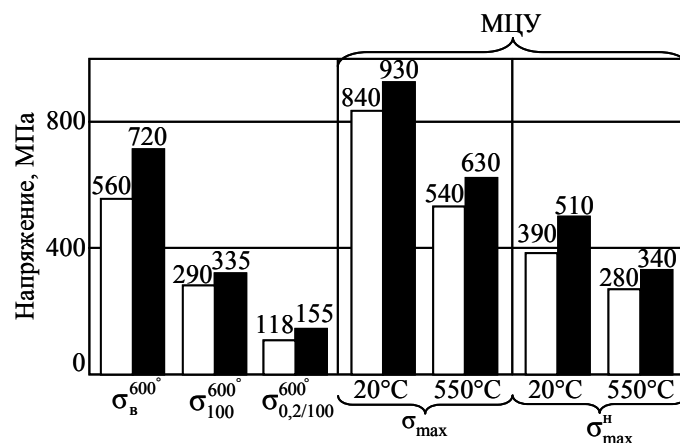


Рис. 2. Механические свойства серийного сплава ВТ18У (□) и нового сплава ВТ41(■), полученные на штамповках дисков, изготовленных методом  $\beta$ -деформации (при испытании на МЦУ:  $N=10^4$  цикл;  $R=0$ ;  $f=10$  Гц;  $K_f=3,35$ ;  $r_H=0,25$  мм)

В то же время свойства, связанные с механизмом ползучести и распространения трещины, зависят не столько от вида легирования, сколько от типа структуры. Получение заданного типа микроструктуры материала детали определяется технологическими режимами деформации, используемыми при ее изготовлении, и последующей термической обработки [3].

Проследить, каким образом технологические режимы термомеханической обработки влияют на микроструктуру сплава и, как следствие, – на трещиностойкость и характеристики усталостной прочности можно на примере нового жаропрочного титанового сплава ВТ41, который предназначен для работы при температурах до 600°C. Полуфабрикаты, изготовленные ( $\alpha+\beta$ )-деформацией, обладают глобулярно-пластинчатой структурой (рис. 3), которая обеспечивает повышенные характеристики усталостной прочности на мало- и многоцикловой базах испытаний (табл. 2). Метод  $\beta$ -деформации позволяет получить на полуфабрикатах пластинчатую структуру (рис. 3, а), которая обеспечивает повышенную жаропрочность и трещиностойкость (табл. 2) [4].

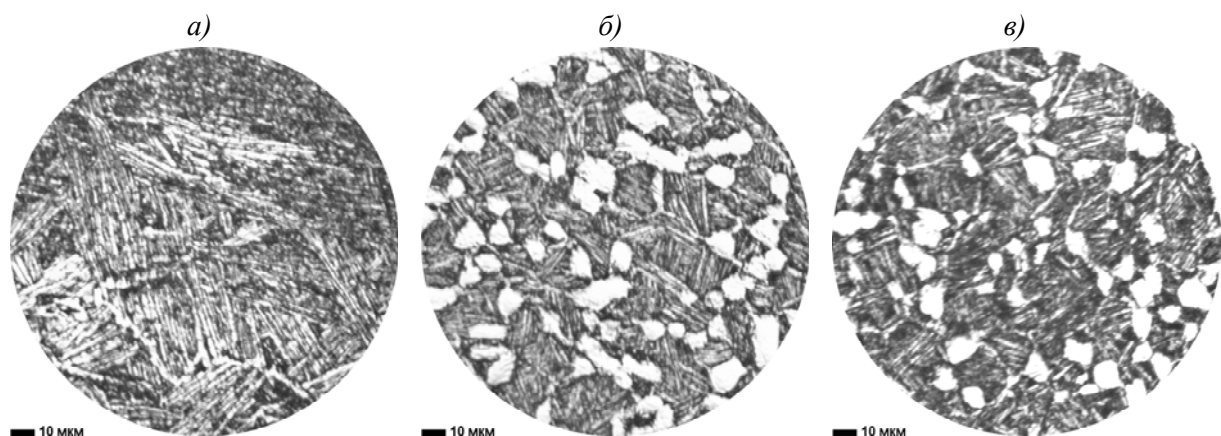


Рис. 3. Микроструктура полуфабрикатов из сплава ВТ41:

*а* – пластинчатая (штамповка,  $\beta$ -деформация); *б* – глобулярно-пластинчатая (штамповка диска,  $(\alpha+\beta)$ -деформация); *в* – глобулярно-пластинчатая (пруток,  $(\alpha+\beta)$ -деформация)

Таблица 2

**Механические свойства нового отечественного и зарубежного жаропрочных титановых сплавов [2, 3, 5, 6]**

Сплав	Полуфабрикат, состояние	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	(МЦУ/МнЦУ): $\sigma_R^*$ , МПа, при $N=2 \cdot 10^4 / N=2 \cdot 10^7$ цикл
		МПа				
ВТ41	Штамповка ( $\beta$ -деформация), отожженное состояние	1030	945	720	330	930/410
	Штамповка ( $(\alpha+\beta)$ -деформация), отожженное состояние	1080	1020	660	295	970/490**
ИМ1834	Штамповка, пруток ( $(\alpha+\beta)$ -деформация), закалка и старение	1040	935	660	300	915/470 ( $N=10^7$ цикл)

\*Для МЦУ:  $R=0$ ;  $f=10$  Гц; для МнЦУ:  $R=-1$ ;

\*\* Катаный пруток, закалка и старение.

По данным, приведенным в табл. 2, можно сделать вывод, что эксплуатационные свойства нового жаропрочного титанового сплава ВТ41 не только превышают свойства серийного сплава ВТ18У, но и превосходят свойства зарубежного жаропрочного титанового сплава-аналога ИМ1834.

Однако предел рабочих температур жаропрочных титановых сплавов типа ВТ18У, ВТ41 и ИМ1834 составляет 550–600°C, что является недостаточным для деталей компрессора и турбины ГТД нового поколения. Поэтому в течение последних лет внимание разработчиков и исследователей всего мира приковано к новому классу материалов. Благодаря высоким удельным прочностным характеристикам, рабочей температу-

ре  $>600^{\circ}\text{C}$  и стойкости к окислению и возгоранию [7, 8], интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана, а именно на основе орто-фазы  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ , являются наиболее перспективными материалами для изготовления деталей последних ступеней компрессора и турбины ГТД нового поколения.

Типичными представителями интерметаллидных титановых орто-сплавов являются сплавы, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

**Интерметаллидные сплавы на основе орто-фазы ( $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ ) [2, 9]**

Сплав	Система легирования	Страна-разработчик
22–27	Ti–Al–Nb	США
22–25	Ti–Al–Nb–(Mo, Zr, Si)	Франция
ВТИ-4	Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si	РФ (ФГУП «ВИАМ»)
ВИТ1	Ti–Al–Nb–(Zr, Mo, Ta, W)–(Si, C)	РФ (ФГУП «ВИАМ»)

Современные орто-сплавы в качестве легирующих элементов (кроме ниобия) содержат также элементы: Mo, V, Ta, W и Zr. Выбор указанных элементов обусловлен тем, что в тройных сплавах Ti–Al–Nb они повышают упругие и прочностные свойства, снижают окисляемость, а за счет изменения фазового состава и структурных превращений позволяют сформировать многочисленные типы структур с повышенными прочностными и пластическими характеристиками и параметрами надежности [9–12]. Для повышения жаропрочных свойств в сплавы вводят Si и C, которые благодаря образованию сложных силицидов, карбидов и дисперсного упрочнения, повышают температурные характеристики – кратковременную и длительную прочность композиций.

Повышенные жаропрочные свойства орто-сплавов наблюдаются при легировании их тугоплавкими элементами, однако повышенное легирование нецелесообразно, поскольку увеличивается плотность сплавов и снижается пластичность, что приводит к уменьшению удельных жаропрочных характеристик и ухудшению технологичности. Преодоление указанных трудностей достигается путем разработки экономнолегированных орто-сплавов и использования технологий производства титановых сплавов, позволяющих за счет твердорастворного, дисперсионного и структурного упрочнения орто-фазы сохранить хорошую технологичность при сохранении приемлемой жаропрочности. Используя указанные приемы и методы, во ФГУП «ВИАМ» разработаны орто-сплавы ВТИ-4 и ВИТ1 [9, 13].

В табл. 4 представлены физико-механические свойства интерметаллидных титановых сплавов на основе орто-фазы ( $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ ).

**Физические и механические свойства  
интерметаллидных титановых сплавов на основе орто-фазы [2, 9]**

Сплав	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B/d$ , км (усл. ед.)	$\sigma_B^{650^\circ}$	$\sigma_{100}^{650^\circ}$	$\sigma_{100}^{650^\circ} / d$ , км (усл. ед.)
					МПа		
22–27	5,4	1080	5,1	200,0	850	340	63,0
22–25	5,39	1415	4,6	262,5	944	–	–
ВТИ-4 (лист 2,5 мм)	5,1	1150	8,0	225,5	950	350	68,5
ВИТ1 (пруток 25 мм)	5,3	1250	6,0	236,0	1150	450	85,0

Хотя интерметаллидные сплавы на основе орто-фазы  $Ti_2AlNb$  являются наиболее перспективными материалами для изготовления деталей последних ступеней компрессора и турбины ГТД нового поколения, освоение орто-сплавов в промышленном масштабе сдерживается рядом трудностей, которые вызваны специфическими особенностями (большое количество легирующих элементов, повышенная температура плавления и вязкость расплавов, трудность точного определения основных компонентов) и использованием мощного металлообрабатывающего оборудования для производства конечных деформированных полуфабрикатов – штамповок, поковок, листов, прутков и пр. Поэтому оптимизация химического состава, технологий выплавки и деформации, направленная на повышение характеристик пластичности, технологий механической обработки, изучение кинетики структурно-фазовых превращений, происходящих при термомеханической обработке, являются первоочередными задачами при исследовании интерметаллидных титановых сплавов [12–15].

В настоящее время проводятся работы по освоению разработанных интерметаллидных титановых сплавов на базе промышленных предприятий и их внедрению в перспективные изделия. Одновременно с этим продолжаются работы по дальнейшему совершенствованию композиций сплавов и технологий их металлургического производства в соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [16–18]. Требования, предъявляемые конструкторами к материалам для модернизируемых и новых изделий авиационной техники, ставят перед разработчиками материалов все новые задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель». Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: ВИАМ. 2010. С. 43–46.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИС–МАТИ. 2009. 520 с.
3. 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. 8–13.
4. Проходцева Л.В., Филонова Е.В., Наприенко С.А., Моисеева Н.С. Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава ВТ41 /В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 407–411.
5. Gey N., Bocher P., Uta E., Humbert M., Gilgert J. How texture and microtexture influence dwell fatigue lifetime in forged IMI834 titanium alloys /In: Ti-2011: Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. 2011. V. 1. P. 879–883.
6. TMC-0614. Timet Datasheet alloy 834 – Timet. 2000. 3 p. /<http://www.timet.com/images/document/datasheets/alphaalloys/834.pdf>.
7. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Изотова А.Ю., Новак А.В. Пожаробезопасные титановые сплавы и особенности их применения //Титан. 2012. №4. С. 42–46.
8. Борисова Е.А., Скляр Н.М. Горение и пожаробезопасность титановых сплавов / Под редакцией Каблова Е.Н. М.: ВИАМ. 2007. 87 с.
9. Иванов В.И., Ночовная Н.А. Интерметаллиды на основе титана //Титан. 2007. №1. С.44–48.
10. Tang F., Nakazawa S., Hagiwara M. The effect of quaternary additions on the microstructures and mechanical properties of orthorhombic Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloys //Material Science and Engineering A329-331. 2002. P. 494–498.
11. Germann L., Banerjee D., Guedou J.Y., Strudel J.-L. Effect of composition on mechanical properties of newly developed Ti<sub>2</sub>AlNb-based titanium aluminide //Intermetallics. 2005. №13. P. 920–924.
12. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications /Ed. by Leyens C., Peters M. Wiley –VCH. Germany. 2003. 51 p.

13. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана /В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 196–205.
14. Хаджиева О.Г., Илларионов А.Г., Попов А.А. Влияние водорода на процессы структурообразования и деформируемость сплава на основе орторомбического алюминиды титана //Титан. 2012. №4. С. 21–26.
15. Nochovnaya N., Izotova A., Alexeev E., Ivanov V. Opportunities of increase of mechanical properties of the deformed semifinished products from Ti–Al–Nb system alloys /In: Ti-2011. Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. 2011. V. 2. P. 1383–1386.
16. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года /В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 1–7.
17. Каблов Е.Н. ВИАМ. Направление главного удара //Наука и жизнь. 2012. №6. С. 14–18.
18. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 157–166.