

Таким образом, разработанные защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для титановых сплавов обеспечивают повышение в 2–5 раза жаростойкости, многократное повышение эрозионной стойкости (в зависимости от угла атаки пылевоздушного потока) и защитный эффект в общеклиматических и во всеклиматических условиях. Дальнейшие исследования и разработки ионно-плазменных покрытий на титановых сплавах будут направлены на повышение рабочих температур композиции основа–покрытие выше 600°C, что обеспечит защиту нового титанового сплава ВТ41 и сплавов на интерметаллидной основе. Увеличение доли применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции деталей ГТД способствует снижению удельной массы двигателя.

В.Г. Анташев, О.С. Кашанов, Т.В. Павлова, Н.А. Ночовная

СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА

Уже практически полвека титановые сплавы занимают прочное положение в конструкциях различных типов газотурбинных авиационных двигателей. К настоящему времени объем их применения составляет до 36% от массы двигателя, при этом основная масса потребления приходится на наиболее ответственные детали компрессора низкого и высокого давления – лопатки и диски.

Основными достоинствами титановых жаропрочных сплавов, подтвержденными многолетней эксплуатацией двигателей, являются высокие удельные характеристики прочности, жаропрочности и коррозионная устойчивость, обеспечившие высокую надежность и весовую эффективность двигателей.

На рис. 1 схематически показаны области применения различных титановых сплавов в зависимости от температуры рабочей зоны двигателя, а в табл. 1 – основные показатели их свойств.

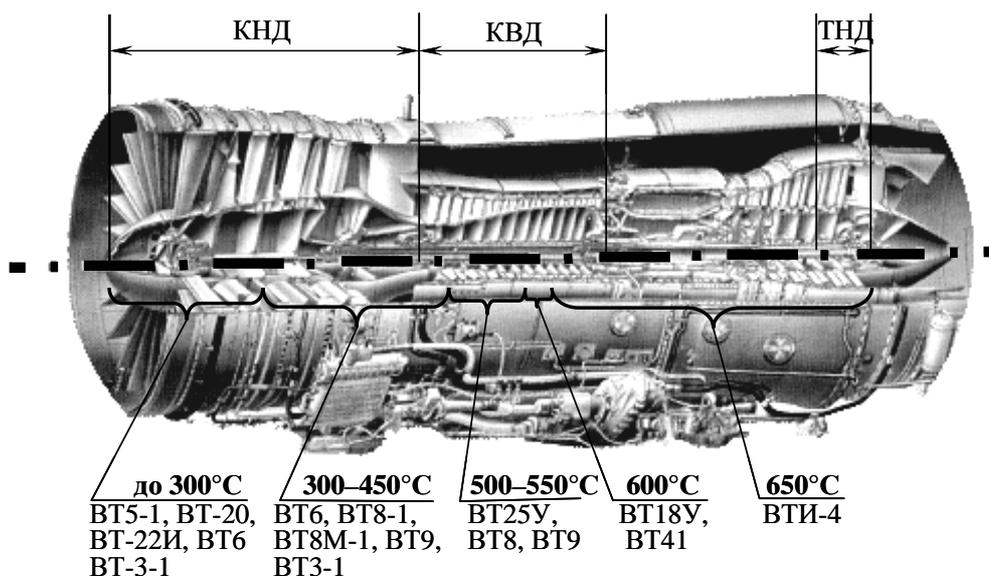


Рис. 1. Области применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции компрессора ГТД

Механические свойства различных титановых сплавов

Сплав	Предел прочности σ_b , МПа	Длительная прочность		Область применения
		температура испытания, °С	σ_{100} , МПа	
BT6	950	300	646	Детали и узлы вентилятора и КНД
BT20	950	450	630	Листовые и корпусные детали КНД и КВД
BT3-1	960	450	660	Детали и узлы КНД и КВД
BT8	960	500	441	Лопатки и диски КВД
BT9	1030	550	392	То же
BT18Y	910	600	290	-<<-

Длительная эксплуатация деталей компрессора выявила как достоинства традиционных жаропрочных титановых сплавов, так и их недостатки. Из числа недостатков следует отметить два главных, которые особенно ярко проявились при изменении экономических условий производства, – низкий ресурс работы деталей и относительно низкий уровень технологических свойств существующих жаропрочных титановых сплавов, что существенно усложняет и удорожает производство и эксплуатацию деталей.

Ресурс деталей из-за недостаточной термической стабильности традиционных титановых сплавов не превышает 15000 ч, в то время как для изделий гражданской авиации по сегодняшним нормам требуется более 30000 ч. При этом технология производства деталей столь дорога, что использование титановых полуфабрикатов ставит на грань экономической целесообразности производство авиационных двигателей.

С учетом этих обстоятельств была разработана новая серия титановых жаропрочных сплавов, обладающих более высокой термической стабильностью, заметно лучшими технологическими свойствами. При этом оказалось возможным повысить и их эксплуатационные свойства.

Новые рекомендуемые титановые сплавы для различных зон компрессора ГТД представлены на рис. 1, а их основные свойства – в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства титановых сплавов для компрессора ГТД

Сплав	Предел прочности σ_b , МПа	Длительная прочность		Область применения
		температура испытания, °С	σ_{100} , МПа	
BT22И	1100–1200	350	–	Детали и узлы вентилятора и КНД
BT8M-1	1000	450	615	Лопатки КВД
BT8-1	980	450	665	Диски КВД
BT25Y	1080	550	450	Лопатки и диски КВД
BT41	1030	600	335	То же
BTИ-4	1100	650	330	-<<-

Более подробное сравнение свойств старых и новых жаропрочных титановых сплавов приведено на рис. 2–4.

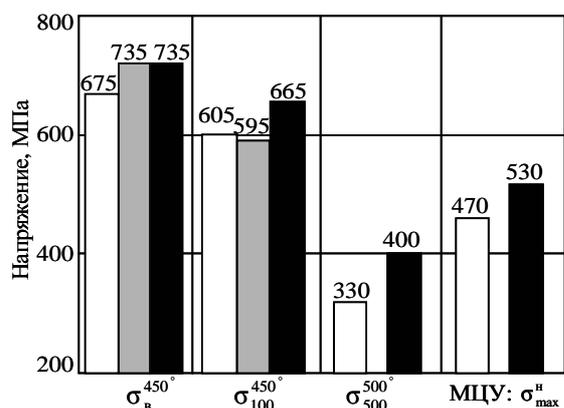


Рис. 2. Сравнение свойств используемых серийно титановых сплавов: VT3-1 (□), VT8 (▒) и рекомендуемого нового сплава VT8-1 (■) для штамповок дисков (для МЦУ: $N=1 \cdot 10^4$ цикл; $K_f=3,35$; $r_H=0,25$ мм; $R=0$; $f=10$ Гц)

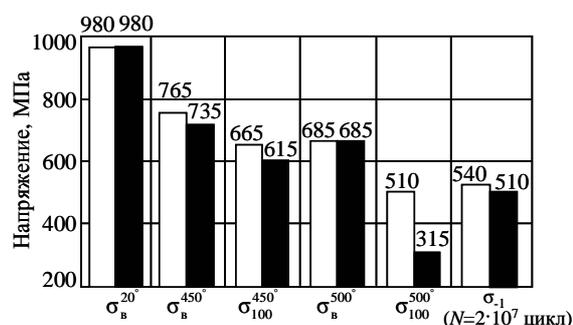


Рис. 3. Сравнение свойств серийного титанового сплава VT8M (■) и рекомендуемого нового сплава VT8M-1 (□) (пруток – заготовка для лопатки – со степенью деформации в холодную 40 и 45% для сплавов VT8M и VT8M-1 соответственно)

Приведенные на рис. 2–4 сравнительные диаграммы отчетливо показывают, что новые жаропрочные титановые сплавы имеют преимущества по целому ряду показателей жаропрочных свойств. Их применение в изделиях авиационной техники тем более целесообразно, что они рассчитаны на длительный ресурс работы.

Особое внимание следует обратить на сплав VT41, который создан для замены сплава VT18У, поскольку сплав VT18У совершенно незаслуженно и бездоказательно получил репутацию ненадежного сплава.

Жаропрочный титановый сплав VT18У был разработан к концу 70-х гг. XX в. и широко применяется для изготовления дисков и лопаток КВД, работающих вплоть до температуры 600°C. Уникальность этого сплава состоит в том, что уже с начала 80-х гг. он успешно применяется в двигателях АЛ-31Ф, находящихся в эксплуатации и по сей день не только в России, но и за рубежом. Несколько позже сплав стал применяться в двигателе ПС-90. Весь этот период зарубежные псевдо-α-сплавы этого класса применяются лишь ограниченно в интервале температур 450–500°C.

Свойства	Квоты превосходства, %, сплава VT41 в сравнении со сплавом VT18У
$\sigma_B^{600^\circ}$, МПа	28,5
$\sigma_{100}^{600^\circ}$, МПа	15,5
$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$, МПа	30
МЦУ: σ_{max} (при $N=1 \cdot 10^4$ цикл; $R=0$; $f=10$ Гц) гладкие образцы*	10,5/15
образцы с надрезом* ($K_f=3,35$; $r_H=0,25$ мм)	30/21

* В числителе – при 20°C, в знаменателе – при 550°C.

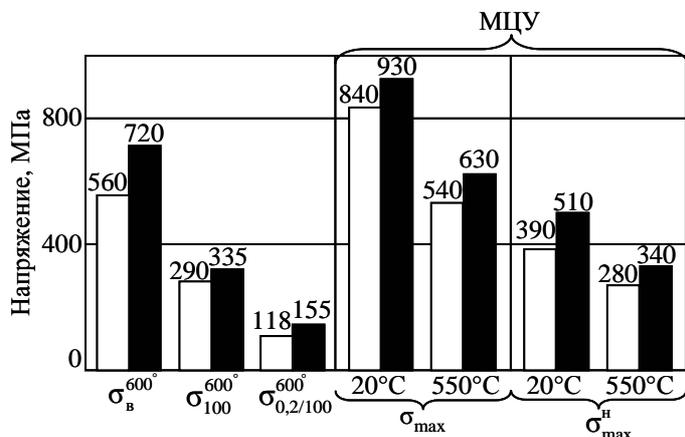


Рис. 4. Сравнение свойств серийного титанового сплава VT18У (■) и нового сплава VT41 (□) для штамповок дисков и квоты превосходства нового сплава (при испытании на МЦУ:

$N=1 \cdot 10^4$ цикл; $R=0$; $f=10$ Гц; $K_f=3,35$; $r_H=0,25$ мм)

Новый сплав ВТ41, предназначенный для работы при температуре до 600°С, был паспортизован в 2005 г.

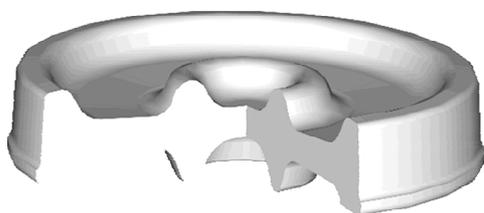
Приведенные данные показывают (см. рис. 4), что по всем исследованным прочностным, жаропрочным и усталостным характеристикам новый сплав превосходит находящийся в длительной эксплуатации сплав ВТ18У. Это превосходство значительно и достигается по показателям сопротивления ползучести, малоциклового усталости и пределу прочности 30%. Сплав обстоятельно обследован при различных режимах деформации и термообработки применительно к изготовлению штамповок дисков, и это дает основания для его рекомендации к внедрению в промышленность. Химический состав сплава и параметры его структуры при получении штамповок диска деформацией в β -области приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 3

Химический состав сплавов ВТ18У и ВТ41

Сплав	Содержание легирующих элементов, % (по массе)									
	Ti	Al	Sn	Zr	Nb	Mo	W	Si	Fe	C
ВТ18У	Основа	6,2–7,3	2,0–3,0	3,5–4,5	0,5–1,5	0,4–1,0	–	0,1–0,25	–	–
ВТ41		5,8–6,6	2,5–4,5	2,0–4,0	0,8–2,5	0,8–1,5	0,35–0,8	0,25–0,45	0,06–0,13	0,05–0,1

а)



б)



Параметры структуры сплава после β -деформации			
размер макрозерна, мм	размер, мкм, структурных микросоставляющих		
	пластины α -фазы	силициды Ti_5Si_3	оторочка α -фазы на границах зерна
0,04–0,08	0,6–2,5	0,1–0,6	1,0

Рис. 5. Опытно-промышленная штамповка диска (деформация в β -области) из сплава ВТ41 (а), структура полотна диска (б – $\times 1000$; 3–4% β -фазы) и параметры структуры

Эксплуатационные свойства нового сплава не только превышают таковые для сплава ВТ18У, но и практически по всем показателям выше, чем свойства лучшего зарубежного жаропрочного титанового сплава аналогичного класса IMI834. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные свойства отечественного и лучшего зарубежного жаропрочных титановых сплавов

Сплав	Полуфабрикат	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{500}^{550^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$	(МЦУ/МнЦУ): σ_R^* , МПа, при $N=2 \cdot 10^4 / N=2 \cdot 10^7$ цикл
		МПа						
ВТ41	Штамповка	1030	945	720	335	390	155	930/410
IMI834(Англия)	(β -деформация)	1000	910	640	340	–	140	915/–

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

С конца 90-х гг. XX в. в титановой лаборатории ВИАМ велась работа по созданию интерметаллидных сплавов нового поколения, имеющих более высокую температуру эксплуатации и жаропрочность, но обладающих технологической пластичностью.

В 2002 г. был паспортизован сплав ВТИ-4, созданный на базе алюминидов титана с орторомбической структурой. Из этого сплава в опытно-промышленном порядке были изготовлены листовые полуфабрикаты, что свидетельствует о возможности его пластической деформации с целью получения различных деформированных полуфабрикатов. Сплав ВТИ-4 работоспособен до температуры 650°C, и его длительная прочность при этой температуре (σ_{100}^{650}) составляет 360 МПа. Физические и механические свойства сплава ВТИ-4 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Механические свойства интерметаллидного сплава ВТИ-4

Температура испытания, °С	d , кг/м ³	E , ГПа	σ_b , МПа	δ	ψ	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
				%		
20	5100	125	1100	6	7	35
600	–	–	1000	12	–	–

Таким образом, в настоящее время созданы новые жаропрочные титановые сплавы практически для всех деталей и ступеней компрессора ГТД, которые по своим свойствам пригодны для двигателей шестого поколения.

Вместе с тем вопросы трудоемкости изготовления полуфабрикатов, энергоемкости процессов выплавки слитков и их деформации, а следовательно, и цен титановых деталей остаются в значительной степени нерешенными. Запредельная цена полуфабрикатов требует очень быстрых и радикальных решений в области совершенствования технологии переработки титана. Необходимо резко сократить количество переходов при деформации, использовать для выплавки слитков индукционные печи с секционным кристаллизатором, создать и внедрить изотермические технологии деформации. Все это должно быть сделано не в ущерб качеству полуфабрикатов и в возможно более короткие сроки. Рынок диктует свои условия и свои сроки.