



# Титановые сплавы для газотурбинных двигателей

Т.В. Павлова

О.С. Кашапов

*кандидат технических наук*

Н.А. Ночовная

*доктор технических наук*

Июль 2011

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 в 30-ти научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4-х 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 Международных салонов 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 Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Все материалы. Энциклопедический справочник»*, №5, 2012 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## Титановые сплавы для газотурбинных двигателей

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

Всероссийский институт авиационных материалов

*В статье рассмотрены этапы развития титановых сплавов для деталей авиационных двигателей. В обобщенном виде приведено сравнение технологии изготовления штамповок дисков, изготовленных из титановых сплавов, применяемых за рубежом и в нашей стране, и их механических свойств. Дана оценка путей совершенствования термомеханической и термической обработки жаропрочных титановых сплавов, а также перспектив их дальнейшего развития.*

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы, механические свойства, термическая обработка, штамповки дисков.

Исследование и разработка титановых сплавов для нужд авиационной техники, включая авиационные газотурбинные двигатели, продолжают на протяжении более 50 лет. Первоначально масса титановых деталей составляла 5–10% от общей массы газотурбинного двигателя, в современных конструкциях весовая доля титановых сплавов составляет около 40% [1]. Высокая удельная прочность и коррозионная стойкость титановых сплавов при температурах до 550–600°C сделали титановые сплавы основным конструкционным материалом для деталей компрессора газотурбинного двигателя.

До настоящего времени совершенствование титановых сплавов проводилось по двум основным направлениям, неразрывно связанным между собой: разработка и оптимизация композиции и химического состава сплавов, а также совершенствование технологии термомеханической и термической обработок полуфабрикатов и деталей. Коротко остановимся на основных этапах развития металлургии жаропрочных титановых сплавов.

Первым, широко применяемым серийным жаропрочным титановым сплавом, разработанным ВИАМ в 1957 г., в отечественной промышленности стал  $(\alpha+\beta)$ -сплав ВТЗ-1 ( $\text{Ti}-6,7\text{Al}-2,5\text{Mo}-1,8\text{Cr}-0,5\text{Fe}-0,25\text{Si}$ ). Сплав применяется для деталей ГТД, длительно работающих при температурах до  $450^\circ\text{C}$ . Вслед за этим для более высоких рабочих температур  $500$  и  $550^\circ\text{C}$  в 60-е годы были разработаны и внедрены  $(\alpha+\beta)$ -сплавы ВТ8 ( $\text{Ti}-6,8\text{Al}-3,5\text{Mo}-0,32\text{Si}$ ) и ВТ9 ( $\text{Ti}-6,8\text{Al}-3,2\text{Mo}-2,0\text{Zr}-0,3\text{Si}$ ).

Несколько позже, в связи с потребностью в повышении прочности при температурах до  $550^\circ\text{C}$ , для изделий военной техники был разработан  $(\alpha+\beta)$ -сплав ВТ25 ( $\text{Ti}-6,8\text{Al}-2,0\text{Mo}-2,0\text{Zr}-2,0\text{Sn}-1,0\text{W}-0,3\text{Si}$ ). Штамповки дисков из этого сплава изготавливаются методом  $\beta$ -деформации. В этот период за рубежом наибольшее распространение получил сплав IMI 550 ( $\text{Ti}-4,0\text{Al}-4,0\text{Mo}-2,0\text{Sn}-0,5\text{Si}$ ), длительно работающий при температурах до  $400^\circ\text{C}$ . Необходимо отметить, что для более высоких температур за рубежом применяют сплавы псевдо- $\alpha$ -класса. При этом сплав IMI 550 в новых двигателях за рубежом заменяют на  $(\alpha+\beta)$ -сплавы Ti-6246 ( $6,0\text{Al}-2,0\text{Sn}-4,0\text{Zr}-6,0\text{Mo}$ ) и Ti-17 ( $5,0\text{Al}-2,0\text{Sn}-2,0\text{Zr}-4,0\text{Mo}-4,0\text{Cr}$ ), не содержащие кремний [2–7].

В нашей стране развитие жаропрочных  $(\alpha+\beta)$ -сплавов было продолжено путем совершенствования наиболее перспективных композиций. В начале 70-х годов был разработан сплав ВТ25У, который применяется с равноосной микроструктурой и по сей день остается наиболее высокопрочным и жаропрочным  $(\alpha+\beta)$ -титановым сплавом среди всех отечественных и зарубежных титановых сплавов этого класса [3]. Например, сравнительные исследования штамповок дисков из сплавов ВТ25У, Ti-6246, Ti-17, Ti-6242S, проведенные под контролем специалистов фирмы «Snesta», показали, что сплав ВТ25У при температурах до  $550^\circ\text{C}$  является наилучшим по совокупности служебных характеристик (рис. 1, табл. 1) [8].

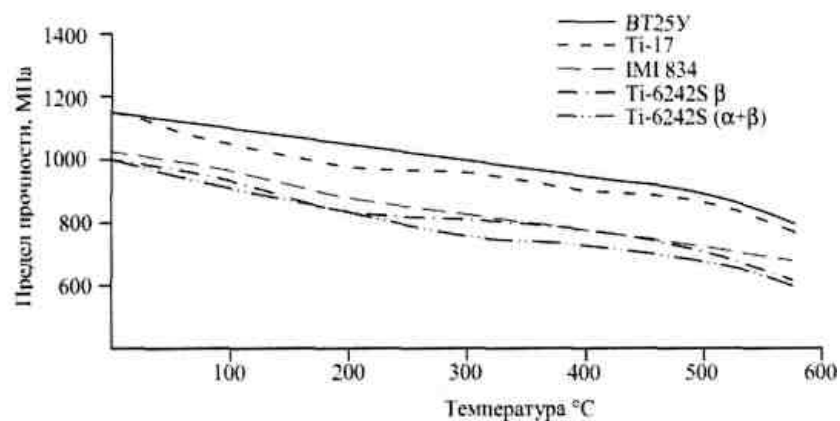


Рисунок 1. Предел прочности жаропрочных титановых сплавов для дисков ГТД в зависимости от температуры испытаний по данным «Снеста»

Таблица 1.

Усталостная прочность титановых сплавов для дисков ГТД по данным «Снеста»

Сплав	МЦУ <sub>50</sub> <sup>450</sup>	МЦУ <sub>50</sub> <sup>550</sup>	МнЦУ <sub>50</sub> <sup>450</sup>	МнЦУ <sub>50</sub> <sup>50</sup>
	N=10 <sup>4</sup> ц, f=1 Гц		N=2·10 <sup>7</sup> ц, f=100 Гц	
	МПа			
BT25Y	835	560	210	220
Ti-6242S (α+β)	790	–	–	–
Ti-6242S β	600	400	–	–
Ti-6246 (α+β)	–	–	180	–
Ti-6246 β	–	–	190	210
IMI 834	–	–	–	200

Примечание: Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) проводили при растяжении.

Развитие газотурбинных двигателей шло по пути постоянного повышения ресурса эксплуатации. Например, для двигателей четвертого поколения, предназначенных для пассажирской и транспортной авиации, ресурс работы увеличивался с 3000–6000 ч до 20000–30000 ч. Все большее внимание стало уделяться специальным свойствам материала: чувствительности к концентратору напряжений при различных видах испытаний, вязкости разрушения и другим характеристикам трещиностойкости.

Такие требования уже не могли удовлетворить сплавы первого поколения, которые, помимо этого, обладают относительно низкой термической стабильностью. Потребовались сплавы для вентилятора и

компрессора низкого давления, обеспечивающие комплексные требования по механическим и специальным свойствам.

Зарубежный опыт по применению сплава Ti-64 (Ti-6,0Al-4,0V-[0,15...0,18]O) для деталей двигателя показал, что применение простого технологичного сплава средней прочности для деталей вентилятора является в большинстве случаев экономически наиболее целесообразным. Поэтому к концу восьмидесятых годов в нашей стране начались активные работы по внедрению отечественного сплава, аналога ВТ6, для дисков и лопаток первых ступеней ротора ГТД. К этому времени сплав ВТ6 применялся в нашей стране в основном как конструкционный материал для деталей планера с гарантированным уровнем прочности  $\sigma_B^{20} \geq 830-900$  МПа (в зависимости от вида и массы полуфабриката). При этом было необходимо заменить жаропрочные ( $\alpha+\beta$ )-сплавы с гарантированным уровнем прочности  $\sigma_B^{20} \geq 960$  МПа. За счет корректировки химического состава сплава ВТ6 (Ti-6,5Al-4,8V-0,15O-0,2Fe), технологии термомеханической и термической обработок, удалось повысить гарантированный уровень прочности штамповок дисков и лопаток весом до 100 кг до  $\sigma_B^{20} \geq 930$  МПа. Кроме того, для обеспечения этого уровня прочности на штамповках с большой величиной сечения была внедрена технология, включающая охлаждение в воде после последней операции штамповки.

Сравнение свойств сплавов Ti-64 и ВТ6 для штамповок дисков приведено в табл. 2. Обоснованность выбора сплава ВТ6 как основного материала для деталей вентилятора была подтверждена результатами испытаний на птицестойкость, проведенными специалистами ЗМКБ «Прогресс» и ВИАМ. Было показано, что лопатки из сплава ВТ6 в большинстве случаев не разрушались, переводя энергию соударения в пластическую деформацию, в то же время лопатки из сплава ВТЗ-1 разрушались с нарушением сплошности отрыва фрагментов материала, что в конечном счете может привести к нелокализованному разрушению силовой установки.

Таблица 2.

## Механические свойства сплавов ВТ6 и Ti-64 для дисков ГТД

Сплав	$\sigma_{0,2}^{20}$ , МПа	$\sigma_B^{20}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_B^{350}$ , МПа	$\sigma_B^{400}$ , МПа	$\sigma_{100}^{350}$ , МПа
ВТ6 (штамповка, охлаждение на воздухе, отжиг)	940	970	14	42	755	735	670
ВТ6 (штамповка, охлаждение в воде, отжиг)	960	1005	12,5	40	760	740	700
Ti-64	850	900	15	37	725	700	650

Вместе с этим для рабочих температур более 350°C (до 500°C) был разработан сплав ВТ8-1 (Ti–6,5Al–3,5Mo–1,2Sn–1,2Zr–0,2Si), отличающийся от сплава ВТ8 более низким содержанием алюминия и кремния и небольшой добавкой олова и циркония. Сплав обеспечивает ресурс работы до 30000 ч при температуре 450°C. Пример штамповки диска компрессора низкого давления, изготовленной по серийной технологии, приведен на рис. 2.

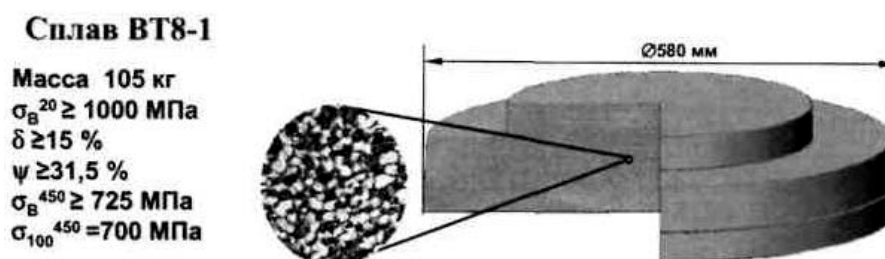


Рисунок 2. Штамповка диска из сплава ВТ8-1, изготовленная на ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»

Параллельно для лопаток компрессора была разработана модификация этого сплава ВТ8М-1 (5,5Al–3,8Mo–1,2Sn–1,2Zr–0,18Si). Основной задачей при разработке сплава для изготовления лопаток было повышение технологической пластичности материала при переходе от традиционной технологии изготовления лопаток к холодной вальцовке пера.

Композиция сплава ВТ8М-1 была подобрана таким образом, чтобы после закалки под вальцовку зафиксировать в фазовом составе материала  $\approx 70\%$  пластичной  $\alpha''$ -фазы. Это позволило увеличить допустимую степень деформации в холодную от 25–30% для сплавов ВТ3-1 и ВТ8 до 45% для сплава ВТ8М-1. Сплав ВТ8М-1 прекрасно зарекомендовал себя и при применении традиционной



технологии штамповки, обеспечивая повышение усталостной прочности, рабочего ресурса и трещиностойкости по сравнению со сплавами ВТ3-1 и ВТ8.

Помимо сплавов на основе  $(\alpha+\beta)$ -структуры, для деталей ГТД применяются сплавы псевдо- $\alpha$ -класса, содержащие небольшое количество  $\beta$ -фазы. Благодаря хорошей свариваемости и технологичности листы из среднелегированных псевдо- $\alpha$ -сплавов серии ОТ4 (система Ti–Al–Mn) и ВТ20 (Ti–6,6Al–2,0Zr–2,0V–1,5Mo) нашли широкое применение в конструкциях газотурбинных двигателей. Из этих сплавов также изготавливают крупные поковки и катаные кольца для корпусов, лопатки направляющего аппарата и другие детали.

Наиболее жаропрочным из серийных отечественных сплавов является псевдо- $\alpha$ -сплав ВТ18У (Ti–6,8Al–4,0Zr–2,5Sn–1,0Nb–0,7Mo–0,15Si). Сплав ВТ18У применяется в двигателе АЛ31Ф и его модификациях для семейства истребителей ОКБ «Сухого». Часть ротора КВД двигателя АЛ31Ф выполнена в виде сварного барабана, в котором пять ступеней – диски из сплава ВТ18У. Помимо дисков, из сплава ВТ18У изготавливаются направляющие и рабочие лопатки, исходной заготовкой для которых служит катаный пруток. Сплав был введен в эксплуатацию к середине 70-х годов и на тот момент времени превосходил зарубежные аналоги (например, сплав Ti–6242S – Ti–6,0Al–4,0Zr–2,0Sn–2,0Mo–0,08Si). Однако ситуация изменилась с разработкой за рубежом жаропрочных сплавов последнего поколения. По уровню механических свойств, жаропрочности и термической стабильности сплав уступает своим ближайшим зарубежным аналогам – сплавам IMI 834 (Ti–5,8Al–4,0Sn–3,5Zr–0,7Nb–0,5Mo–0,35Si–0,06C) и Ti–1100 (Ti–6,0Al–4,0Zr–2,8Sn–0,4Mo–0,45Si), разработанным к концу 80-х годов прошлого века.

Ввиду этого в России были продолжены исследования по поиску перспективных композиций новых сплавов и совершенствованию технологии получения полуфабрикатов. К началу 2000 г. ВИАМ совместно с ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» была разработана новая система легирования Ti–Al–Sn–Zr–Mo–Nb–W–Si–Fe–C (псевдо- $\alpha$ -сплав ВТ41). На опытно-

промышленных штамповках дисков, изготовленных из этого сплава методом  $\beta$ -деформации, был получен высокий комплекс механических свойств (табл. 3, 4). Позднее была разработана модификация сплава для изготовления штамповок и прутков с мелкозернистой глобулярно-пластинчатой микроструктурой.

Таблица 3.

Механические свойства зарубежных и отечественных сплавов для деталей ГТД

<i>Зарубежные сплавы</i>							
Тип сплава	$(\alpha+\beta)$ -сплавы				псевдо- $\alpha$ -сплавы		
Марка сплава	Ti-64	Ti-550	Ti-17	Ti-6246	Ti-6246S	Ti-1100	IMI 834
Максимальная рабочая температура, °C	350	400	400	450	540	600	600
Структурный эквивалент по содержанию Al (с учетом примесей) [7]	7,8	6,9	7	8,3	8,3	8,27	8,7
Структурный эквивалент по содержанию Mo [7]	3,25	4,2	10,5	6	2,1	0,44	0,7
Количество Si, % по массе	–	0,5	–	–	0,1	0,45	0,35
Область деформации	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$ $\beta$	$(\alpha+\beta)$ $\beta$	$(\alpha+\beta)$ $\beta$	$\beta$	$(\alpha+\beta)$
Термическая обработка (O – отжиг; З – закалка; С – старение)	O, O+C, $(\alpha+\beta)$ -З+С, $\beta$ -З+С	O+C	O+O+C, O+C	O+C, O+C+С, З+С, З+С+С	O+C	С, $\beta$ -O+C	З+С
Деформированные полуфабрикаты:							
$\sigma_E^{20}$ (мин), МПа	895*	1080	1080	1034	896	1000	1030
$\delta$ (мин), %	10	9	10	8	10	6	6
$\psi$ (мин), %	20	20	32	20	25	15	15
<i>Отечественные сплавы</i>							
Тип сплава	$(\alpha+\beta)$ -сплавы					псевдо- $\alpha$ -сплавы	
Марка сплава	BT3-1	BT8	BT8-1	BT9	BT25У	BT18У	BT41
Максимальная рабочая температура, °C	450	500	500	500	550	600	600
Структурный эквивалент по содержанию Al (с учетом примесей) [7]	7,5	7,7	8,3	8	8,9	9,15	9
Структурный эквивалент по содержанию Mo [7]	5,5	3,3	3,5	3,5	4,2	1,2	2,4
Количество Si, % по массе	0,3	0,32	0,2	0,3	0,18	0,14	0,35
Область деформации	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$	$(\alpha+\beta)$ $\beta$	$(\alpha+\beta)$ $\beta$
Термическая обработка	O+C	O+C	O+C	O+C	O+C	O	O+C, O, З+С
Штамповки дисков:							
$\sigma_E^{20}$ (мин), МПа	900	960	980	1030	1080	910	1030
$\delta$ (мин), %	10	10	10	8	8	7	6,5
$\psi$ (мин), %	25	25	25	22	18	15	12

\* При содержании кислорода  $0,15 \leq O \leq 0,2\%$ ; при содержании кислорода менее  $0,13\%$ ,  $\approx 830$  МПа.

Таблица 4.

## Служебные свойства жаропрочных титановых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Служебные характеристики					
		$\sigma_B^{600}$	МЦУ <sub>гл</sub> <sup>20</sup> , N=10 <sup>4</sup> ц	МЦУ <sub>гл</sub> <sup>600</sup> , N=10 <sup>4</sup> ц	МнЦУ <sub>гл</sub> <sup>20</sup> , N=2·10 <sup>7</sup> ц	$\sigma_{100}^{600}$	$\sigma_{0,2/100}^{600}$
		МПа					
BT18У	Штамповка	600	845	540	380	285	118
	Пруток			(550°С)	410	265	–
BT41 β	Штамповка	745	930	560	410	340	155
IMI 834	Штамповка	700	915	500	470–500 (N=10 <sup>7</sup> )	300	150
Ti-1100	Штамповка	690	880	630 (550°С)	500	350	175 (ε=0,1)

Существенным отличием жаропрочных псевдо-α-сплавов последнего поколения является переход от преимущественно твердорастворного упрочнения α-фазы к сочетанию эффективного дисперсионного и твердорастворного механизмов упрочнения. Это позволило значительно повысить уровень прочности в интервале рабочих температур и обеспечить достаточную жаропрочность материала с мелкозернистой микроструктурой. Таким образом, по прочностным характеристикам сплав BT41 находится на уровне высокопрочных (α+β)-сплавов (табл. 5, 6).

Таблица 5.

## Механические свойства штамповок и прутков из сплава BT41 с глобулярно-пластинчатой микроструктурой

Сплав	Полуфабрикат, режим термической обработки	Механические свойства					
		$\sigma_{0,2}^{20}$	$\sigma_B^{20}$	δ	ψ	$\sigma_B^{600}$	$\sigma_{100}^{600}$
		МПа		%		МПа	
BT41 (α+β)	Штамповки, O+C	1045	1100	9,2	12,5	685	295
	Штамповки, Z+C	1145	1215	8,0	13,5	735	
	Пруток, O+C	935	1015	18,0	40,0	635	275
	Пруток, O+C	1075	1120	12,0	32,0	715	

Таблица 6.

Служебные свойства прутков из сплава ВТ41  
после различных режимов термической обработки

Наименование характеристики	Минимальный уровень свойств		
	ВТ41, З+С	ВТ41, О+С	ВТ18У, О
$\rho (\sigma_B^H / \sigma_B^{TH})^*$	1,36	1,22	–
КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	18/20*	23/20*	23/–
МЦУ <sub>гп</sub> (20°C/600°C), МПа	960/550	1020/590	845/–
МнЦУ <sub>гп</sub> (20°C/600°C), МПа	510/370	560/410	410/–
МнЦУ <sub>н</sub> (20°C/600°C), МПа	235/157	180/–	165/–

\* На образцах с рабочей частью длиной  $l=5d$ , радиус надреза  $r=0,15$  мм.

Упрочняющая термическая из сплава ВТ41 с мелкозернистой структурой позволяет значительно повысить усталостную прочность материала (табл. 6). Более подробно влияние режимов термической обработки на свойства и фазовый состав сплава ВТ41 рассмотрены в работах [9, 10].

Подведение итогов развития жаропрочных титановых сплавов для газотурбинной техники удобно проиллюстрировать в виде диаграммы, приведенной на рис. 3.

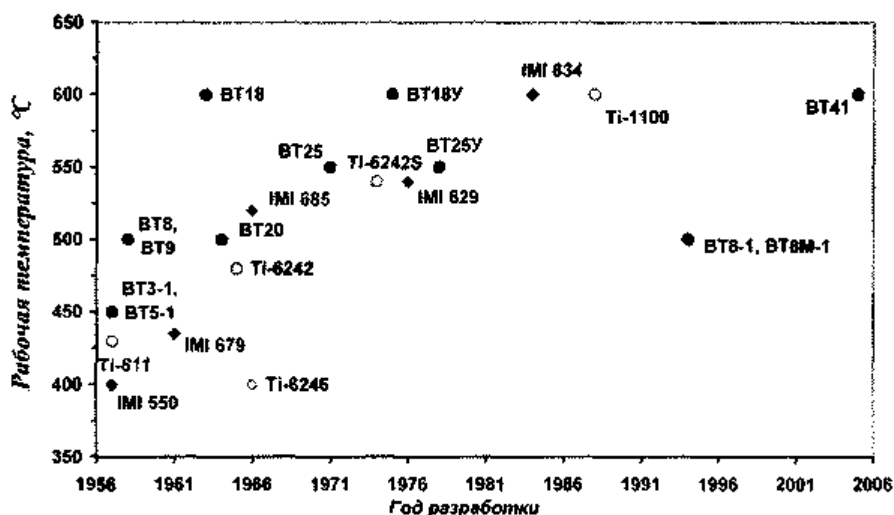


Рисунок 3. Температура применения жаропрочных титановых сплавов с учетом времени их разработки

При рассмотрении тенденций развития титановых сплавов применительно к деталям компрессора можно отметить новые технологические возможности по контролю технологических параметров

процесса штамповки дисков в металлургическом производстве. На первом этапе это позволило получать регламентированную глобулярно-пластинчатую микроструктуру на серийных штамповках дисков из сплавов ВТ8, ВТ9 и в меньшей степени – ВТЗ-1. Специалистами ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» совместно с ВИАМ и ВИЛС была проделана огромная работа по получению регламентированной структуры уже в предварительной заготовке (крупногабаритном кованом прутке).

Изначально при освоении технологии изготовления штамповок дисков высокотемпературную ступень термической обработки проводили при относительно низких температурах – 900–930°C, что было связано с получением удовлетворительных характеристик пластичности. По существу в настоящее время для всех жаропрочных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов, за исключением сплава ВТЗ-1, совершен переход от двухступенчатого стабилизирующего отжига к «мягкой закалке» с охлаждением на воздухе и последующим старением, а глобулярно-пластинчатая микроструктура (рис. 2) в полуфабрикатах из жаропрочных ( $\alpha+\beta$ )-сплавов стала основной. Регламентация микроструктуры обеспечила повышение стабильности механических свойств в полуфабрикатах из этих сплавов.

Контроль параметров термомеханической обработки полуфабрикатов позволяет успешно решать проблему повышения трещиностойкости материала за счет применения операций деформации в однофазной области. В настоящее время значительный объем публикаций зарубежных авторов посвящен именно этому вопросу. С точки зрения применения материала с пластинчатой микроструктурой необходимо отметить, что для штамповок с крупной структурой характерна более низкая пластичность. Существует также ряд особенностей технологического цикла их изготовления. Тем не менее за рубежом эти вопросы успешно решаются. Сегодня для вентиляторных штамповок, изготовленных методом  $\beta$ -деформации для различных зарубежных фирм (Snecma, GE, P&W), применяются двухфазные сплавы Ti-17, Ti-6246 и псевдо- $\alpha$ -сплав Ti-6242S (например, [11]). К

сожалению, в нашей стране технологические исследования в этой области прекратились в конце 80-х годов.

Другим значимым направлением в области металлургических технологий является получение надежных сварных соединений для ответственных деталей ГТД. Компанией MTU и другими фирмами активно ведутся работы по изготовлению сварных роторов и деталей компрессора сваркой трением. В качестве примера можно рассматривать сварной барабан КНД двигателя GE-90. Значительное количество публикаций посвящено сварке титановых сплавов с различными типами микроструктуры, а также титановых сплавов, относящихся к различным классам. Подобные исследования проводились специалистами ВИАМ в конце 80-х годов, например, положительные результаты были получены на сварных соединениях сплавов BT8-1 и BT25У, а также BT25У и BT18У.

Для создания двигателей 5-го поколения в нашей стране необходимо возобновлять и интенсифицировать исследования в этих областях и осваивать новые перспективные виды сварки – линейную и ротационную сварку трением. Эти технологии будут являться ключевыми при переходе от обычной конструкции ступени ротора к конструкции типа «блиск» и к центробежному колесу [12–15].

### **Список литературы**

1. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А. С. // Современные титановые сплавы и проблемы их развития. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–45.
2. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1994. P. 411–444.
3. TMC-0164. Timet DataSheet alloy 834. Timet, 2000. 3 p.
4. Titanium design and fabrication handbook for industrial applications. Timet, 1999. 40 p.
5. Timet alloys. Timet, 1997. 4 p.
6. Titanium alloy guide. RMI Titanium Company, 2000. 48 p.
7. Piyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. // Titanium 99. Science and technology. 1999. P. 53–60.
8. Vessel A., Guedou J.Y. // Там же. P. 1017–1022.

9. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. // *Металловедение и термическая обработка*. 2010. № 8. С. 30–34.
10. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №2. С. 8–13.
11. Barussaud A., Desvallees Y., Guedou J.Y. // *Titanium 95. Science and technology*. 1995. P. 1599–1608.
12. Wilfried Smarsly *Aero Engine Materials*. MTU. Munich, Germany. 2006.
13. Esslinger J. *Titanium in Aero Engine*. MTU. Munich, Germany. 2004.
14. Kosing O.E., Shart R., Schmuhl H.J. / *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2001: Land, Sea, and Air*. June 4–7. 2001. New Orleans, Louisiana, USA.
15. Klaus Steffen, Hans Wilhelm *Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Process*. Munich, Germany. 2001.