

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В данной статье рассматривается применение высокопрочных титановых сплавов (разработка В.Н. Моисеева, Ю.А. Грибкова, Ю.И. Захарова и др.).

По классификации титановых сплавов, предложенной В.Н. Моисеевым, сплав ВТ16 относится к $(\alpha+\beta)$ -сплавам мартенситного класса, сплав ВТ22 является сплавом переходного класса, а сплавы ВТ35 и ВТ32 относятся к псевдо- β -сплавам, т. е. к β -сплавам с метастабильной β -фазой.

Принципиальной отличительной особенностью сплавов переходного класса, и в частности сплава ВТ22, является максимальная степень гетерогенизации их структуры в отожженном состоянии по сравнению с другими $(\alpha+\beta)$ - и β -сплавами. Благодаря этому сплавы переходного типа обладают более высокой по сравнению с другими сплавами прочностью в отожженном состоянии.

Кроме того, высокая прочность сплавов переходного класса в термически упрочненном состоянии достигается при оптимальном соотношении доли упрочнения вследствие действия двух основных механизмов упрочнения, а именно путем легирования α - и β -твердых растворов и за счет распада метастабильной β -фазы с выделением дисперсных частиц α -фазы при старении. Оптимальность этого соотношения, а также сбалансированное легирование сплава изоморфными и эвтектоидообразующими β -стабилизирующими элементами обуславливает высокий уровень механических свойств сплавов переходного класса, и в частности сплава ВТ22.

Одним из существенных преимуществ сплавов переходного класса является возможность достижения высокой прочности в полуфабрикатах больших толщин. Эти сплавы при закалке с температур двухфазной области закаливаются на воздухе, что обусловлено достаточно высоким уровнем легирования этих сплавов β -стабилизирующими элементами. Коэффициент стабилизации β -фазы этих сплавов соответствует диапазону $K_{\beta}=1,1-1,4$. Благодаря этому возможно осуществление безокислительной мягкой упрочняющей термической обработки деталей и сварных узлов из сплава ВТ22 в аргоно-вакуумных печах, обеспечивающей получение гарантированного уровня прочности $\sigma_b \geq 1080$ МПа.

Типичный уровень механических свойств штамповок из сплава ВТ22, термически обработанных на гарантируемый уровень прочности 1080 МПа, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства штамповок из сплава ВТ22

Модуль упругости E , ГПа	Предел прочности σ_b	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
	МПа				
114,3	1130–1170	1050–1090	8–12	25–40	530

Приоритет в разработке высокопрочного свариваемого титанового сплава переходного класса принадлежит нашей стране. Кроме того, впервые в мировой практике такой сплав был широко применен в самолетных конструкциях также в нашей стране. В ВИАМ работы по исследованиям и внедрению этого сплава в изделия авиационной техники проводились под руководством С.Г. Глазунова и В.Н. Моисеева. Первый опыт масштабного применения сплава ВТ22 для изготовления силовых деталей и узлов планера был получен при создании уникального (даже по сегодняшним меркам) изделия Т-4 (изд. «100») – дальнего сверхзвукового ударного самолета, разработанного в ОКБ Сухо-

го. Опытные экземпляры этого самолета были построены, однако дальнейшие работы по самолету Т-4 были прекращены, но не по техническим, а по политическим причинам.

Вторым и решающим этапом в применении сплавов ВТ22, ВТ16 и ряда других титановых сплавов явилось создание транспортного самолета Ил-76. Большой опыт, накопленный при создании первых экземпляров и при освоении серийного производства этого самолета, в дальнейшем был использован применительно к другим самолетам КБ Ильюшина – Ил-86, Ил-96, Ил-96-300. Сплавы ВТ22 и ВТ16 были широко применены также в изделиях КБ Антонова, Яковлева, Микояна, Бериева. Сплав ВТ22 нашел широкое применение в конструкциях пассажирских, транспортных и маневренных самолетов для изготовления лонжеронов, нервюр, шпангоутов, балок, гидроцилиндров, деталей механизации крыла (кареток, монорельсов, закрылков и предкрылков, кронштейнов, качалок), а также ушковых болтов, компенсационных пружин в системе управления, силовых деталей и сварных узлов конструкции шасси.

В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом проявляется тенденция к расширению объема применения высокопрочных титановых сплавов в элементах силового набора крыла, хвостового оперения и фюзеляжа. Это связано с увеличением объема применения в новых изделиях углепластиковых композиционных материалов. С целью предотвращения в таких конструкциях контактной коррозии деталей из алюминиевых сплавов в паре с углепластиковыми, при проектировании таких самолетов алюминиевым сплавам предпочитают высокопрочные титановые сплавы, в том числе и сплав ВТ22.

Более подробно следует рассмотреть использование сплава ВТ22 в шасси самолетов. Этот сплав успешно применен в конструкциях шасси 10 марок самолетов, в том числе пассажирских и транспортных широкофюзеляжных самолетов Ил-76, Ил-86, Ил-96, Ил-96-300, Ан-124 («Руслан») и Ан-225 («Мрия»). Впервые в мировой практике высокопрочный титановый сплав был применен взамен стали в конструкции шасси среднемагистрального транспортного самолета Ил-76, а затем и среднемагистрального пассажирского самолета Ил-86. Кроме того, до настоящего времени только в нашей стране в шасси транспортных и пассажирских самолетов такие ответственные крупногабаритные детали, как траверсы, коромысла тележки и некоторые другие, применяются не в монолитном, а в сварном варианте. Это также обеспечивает дополнительное снижение массы и трудоемкости изготовления конструкций шасси.

Из сплава ВТ22 изготавливают такие детали шасси, как траверсы, подкосы, шлицшарниры, цапфы, рычаги разворота переднего шасси, коромысла тележки, тормозные рычаги, тяги, оси колес. На рис. 1 показаны детали из сплава ВТ22 конструкций шасси транспортных самолетов Ил-76 и Ан-124, а также пассажирского самолета Ил-96-300. Доля сплава ВТ22 в конструкциях шасси этих самолетов составляет соответственно 40, 27 и 35% (по массе). Общая масса деталей и сварных узлов из сплава ВТ22 составляет в самолетах Ил-96-300, Ил-76 и Ан-124 («Руслан») 290; 410 и 2430 кг соответственно. Снижение массы деталей и узлов шасси благодаря применению титанового сплава ВТ22 взамен стали составляет 15–20%.



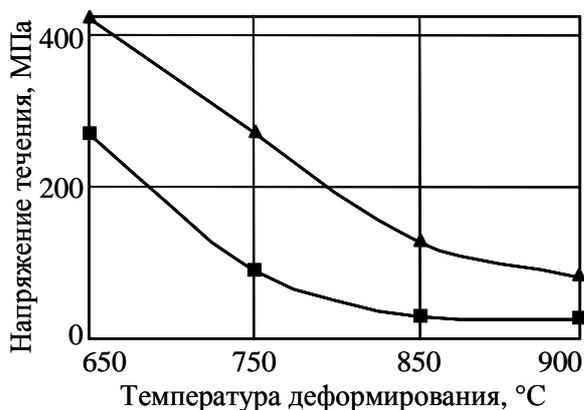
Рис. 1. Детали конструкций шасси самолетов из сплава ВТ22:
а – траверса носового шасси Ил-76; б – траверса основного шасси Ан-124; в – коромысло тележки шасси Ил-96-300

В отличие от высокопрочных сталей титановый сплав ВТ22, как и другие серийные титановые сплавы, не склонен к коррозионному растрескиванию (коррозии под напряжением) при длительной эксплуатации в климатических условиях, в связи с чем применение этого сплава особенно эффективно для шасси самолетов с большим ресурсом эксплуатации: 30–40 лет, а также для шасси самолетов-амфибий типа Бе-200.

На основе сплава ВТ22 в лаборатории титановых сплавов ВИАМ разработаны еще три сплава ВТ22И, ВТ37 и ВТ22ПТ.

Высокопрочный титановый сплав ВТ22И предназначен для изготовления точных штамповок (панелей, крышек люков, кронштейнов, рычагов, ушковых болтов) способом изотермического деформирования.

Сплав обладает высокой технологической пластичностью и деформируется с пониженными усилиями при штамповке в изотермических условиях. Это позволяет изготавливать точные штамповки сложной формы, используя менее дорогие материалы для изготовления штампов в связи с возможностью снижения температур деформирования



до 850–700°C. На рис. 2 представлена зависимость удельных давлений при изотермическом деформировании сплава ВТ22И от температуры деформирования в сравнении с параметрами обработки сплава Ti–6Al–4V (ВТ6).

Рис. 2. Зависимость удельных давлений при изотермическом деформировании сплавов ВТ22И (■) и ВТ6 (▲) от температуры деформирования

Применение сплава ВТ22И для изготовления штамповок способом изотермического деформирования обеспечивает возможность получения полуфабрикатов с однородной мелкозернистой структурой, с высоким и стабильным уровнем механических свойств, с припусками на механически обрабатываемых поверхностях до 0,5 мм, а на необрабатываемых поверхностях с допусками до $\pm 0,1$ мм. При этом достигается снижение стоимости штампов в 1,5 раза, увеличение коэффициента использования металла (КИМ) в 2 раза, снижение трудоемкости механической обработки деталей на 30–40%.

Сплав ВТ37 дополнительно к составу сплава ВТ22 легирован добавками олова и циркония. Такое дополнительное легирование обеспечивает этому сплаву повышенную прочность при температурах до 350°C, которая может быть реализована в деталях большей толщины – до 200 мм.

Сплав ВТ22ПТ дополнительно легирован углеродом и бором и изготавливается методом гранульной металлургии. Благодаря высокой скорости кристаллизации гранул при использовании этой технологии предотвращается выделение грубых частиц карбидов и боридов титана, особенно по границам зерен, в результате чего в охлажденных гранулах фиксируется пересыщенный углеродом и бором β -твердый раствор. При термической обработке, осуществляемой по специальному режиму, достигается внутризеренное выделение дисперсных частиц карбидов и боридов титана, дополнительно упрочняющих сплав. При этом эффект дополнительного повышения предела прочности отмечается как при комнатной, так и при повышенных температурах (до 400°C).

Высокопрочный сплав ВТ16 с большой эффективностью широко применен в самолетных конструкциях для изготовления деталей крепления – болтов, винтов, шпилек и др. Высокая эффективность применения этого сплава объясняется, во-первых,

тем, что прочностные характеристики деталей крепления из этого сплава близки к прочностным характеристикам стальных деталей крепления при значительно меньшей массе деталей из сплава ВТ16. Кроме того, масштабы применения деталей крепления в конструкции самолета весьма значительны. В большом самолете их количество измеряется сотнями тысяч. Производство таких деталей должно осуществляться с использованием высокопроизводительной технологии. Отличная технологическая пластичность сплава ВТ16 в отожженном состоянии обеспечила возможность реализации такой технологии. На высокопроизводительном оборудовании из прутковой заготовки сплава ВТ16 в холодную высаживается головка болта или винта, редуцируется стержень и хвостовик, накатывается резьба. Централизованное крупносерийное производство крепежа из сплава ВТ16 осуществляется на предприятии «Нормаль» (г. Нижний Новгород). На рис. 3 показаны различные типы деталей крепления из сплава ВТ16.



Рис. 3. Детали крепления из сплава ВТ16, изготовленные методом холодного деформирования

Механические свойства сплава ВТ16 и объем применения крепежа приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Механические свойства сплава ВТ16

Состояние материала	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ	Относительное сужение ψ	Сопротивление срезу $\tau_{ср}$, МПа	Степень осадки ϵ , %
		%			
Отожженное	815–930	≥ 14	≥ 60	630	75
Холодно-деформированное ($\epsilon=50\%$)	1030–1130	7–9	40–50	670–720	–

Таблица 3

Применение деталей крепления из сплава ВТ16 в самолетах АК им. С.В. Ильюшина и ОАО «Туполев»

Марка самолета	Тип самолета	Количество пассажиров, чел.	Масса деталей крепления в 1 самолете, кг
Ил-86	Среднемагистральный пассажирский	350	1890
Ил-96-300	Дальнемагистральный пассажирский	300	2130
Ту-204	Среднемагистральный пассажирский	210	940

В лаборатории титановых сплавов ВИАМ разработаны титановые псевдо- β -сплавы ВТ32 и ВТ35. Из этих сплавов могут быть изготовлены листы, лента, фольга. Отличительной особенностью этих сплавов является то, что они закаляются при весьма малых скоростях охлаждения с температуры заковки (4–10°С/мин). Благодаря этому упрочняющая термическая обработка деталей из сплавов ВТ32 и ВТ35 может проводиться в вакуумных печах или в печах с инертной атмосферой. При этом не требуется переноса деталей в закалочную среду. После заковки (отжига) в вакуумной печи эти сплавы обладают высокой технологической пластичностью в холодном состоянии, аналогичной технологической пластичности малолегированного сплава ОТ4-1 (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства псевдо- β -сплавов в отожженном состоянии

Марка сплава	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Технологические свойства		
			Вытяжка $K_{\text{выт}}$	Отбортовка $K_{\text{отб}}$	Гибка r_{min}
ВТ32	800–900	16–20	1,75–1,9	1,6–1,75	(2,3–2,6) s^*
ВТ35	750–850	18–21	1,7–1,85	1,6–1,7	(2,5–3,0) s^*
ОТ4-1	600–750	18–22	1,8–1,85	1,6–1,7	(2,0–2,5) s^*

* s – толщина листа.

После охлаждения деталей в печи (с выключенными нагревателями) до температур 480–540°С в этой же печи при необходимости может быть осуществлен процесс старения. Листовые детали сложной конфигурации из этих сплавов могут быть изготовлены по следующей технологической схеме: заковка в вакууме → листовая штамповка в холодном состоянии → старение в вакууме. Такая технологическая схема позволяет избежать остаточных напряжений при заковке, окисления и образования альфирированного слоя на поверхности, а также наводороживания при травлении с целью удаления окисленного слоя. При этом достигается предел прочности сплавов $\sigma_B \geq 1200$ МПа (табл. 5). Эти сплавы могут быть использованы для изготовления штампованных силовых элементов планера, сотовых паяных панелей (ВТ35), анкерных гаек, трубопроводов, в том числе раскатных патрубков и других деталей, длительно работающих при температурах до 350°С (рис. 4).

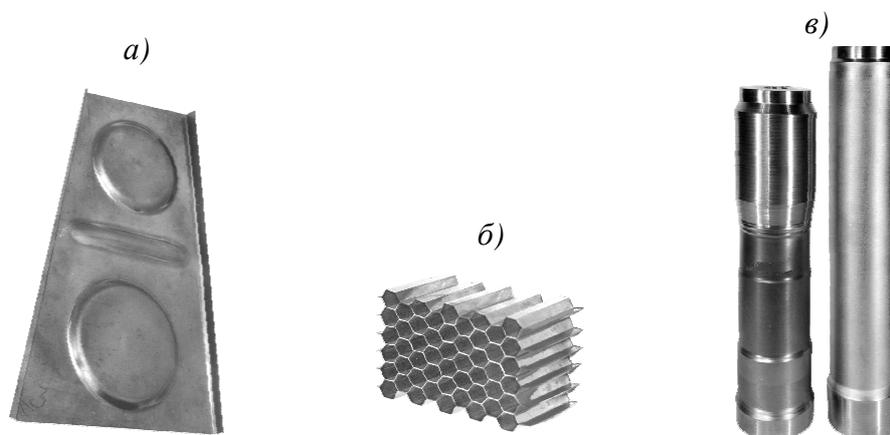


Рис. 4. Детали из сплава ВТ32, изготовленные методом холодной деформации: а – штампованная нервюра; б – сотовый наполнитель; в – трубная заготовка, полученная методом ротационного выдавливания (толщина стенки 1,5 мм, длина – более 1000 мм)

Механические свойства псевдо- β -сплавов после упрочняющей термической обработки в аргоно-вакуумных печах

Марка сплава	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Длительная прочность σ_{100}^{300} , МПа
BT32	1200–1300	1160–1230	5–9	960
BT35	1200–1300	1100–1220	6–9	980

Одним из значимых этапов в работе лаборатории явился широкий комплекс исследований, направленных на обеспечение высокого ресурса работы сварных трубопроводов из малолегированных свариваемых титановых сплавов OT4-0 и OT4-1. Результаты этих исследований обеспечили успешное применение высокотехнологичных сплавов OT4-0 и OT4-1 для изготовления сварных воздушных трубопроводов противообледенительной системы (ПОС) и системы кондиционирования воздуха (СКВ) многих изделий отечественной авиационной техники. По этим трубопроводам под давлением передается в различные зоны самолета воздух с температурой до 350°C. Общая длина весьма разветвленной системы таких трубопроводов в больших самолетах измеряется сотнями метров. На рис. 5 показана система воздушного трубопровода ПОС транспортного самолета, а на рис. 6 – элемент такого трубопровода, изготовленный из сплава OT4-0. Существенное влияние на работоспособность воздушных трубопроводов оказывают напряжения, возникающие от линейного термического расширения труб. Известно, что уровень термических напряжений прямо пропорционален коэффициенту линейного расширения и модулю упругости материала. В этом отношении титановые сплавы, коэффициент линейного расширения и модуль упругости которых почти вдвое меньше, чем у сталей, обладают значительными преимуществами перед сталями. Кроме того, по характеристикам удельной статической и усталостной прочности сплавы OT4-0 и OT4-1 превосходят сталь типа 12X18H10T, применяемую для воздушных трубопроводов. Применение титановых сплавов в воздушных трубопроводах систем ПОС и СКВ обеспечило снижение массы этих конструкций на 40% (по сравнению со сталью).

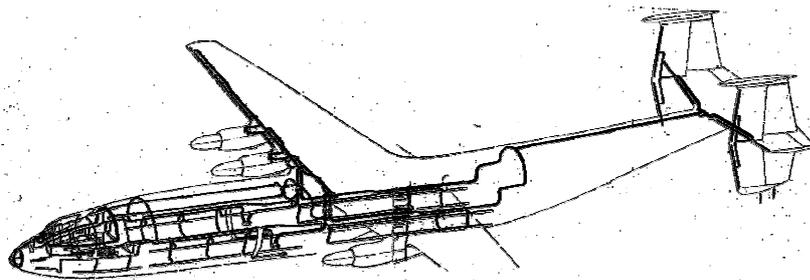


Рис. 5. Схема сварного воздушного трубопровода из сплава OT4-0 противообледенительной системы широкофюзеляжного транспортного самолета

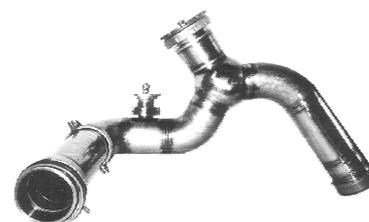


Рис. 6. Элемент воздушного трубопровода из сплава OT4-0

Таким образом, приведенные примеры использования титановых сплавов, в авиационных конструкциях разработанных в лаборатории, свидетельствуют о высокой эффективности их применения в современных самолетах, а также о перспективности их применения в новых изделиях авиационной техники.