



Титан в России

В.Н. Моисеев

доктор технических наук

Март 2005

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.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Металловедение и термическая обработка металлов», №8, 2005г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Титан в России

В.Н. Моисеев

Всероссийский институт авиационных материалов

Изложена история развития титановых сплавов в России. Рассмотрены конструкционные, жаропрочные титановые сплавы, а также сплавы с интерметаллидным упрочнением. Проанализировано влияние химического состава и структуры на свойства сплавов, описана технология их обработки. Приведены примеры использования титановых сплавов в различных отраслях отечественной промышленности.

Введение

Начало работы с титаном как с конструкционным материалом следует отнести к 1951–1952 гг., когда было выпущено правительственное постановление о создании лаборатории титана во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ). Это было вполне логично, поскольку титан предназначался в первую очередь для использования в авиакосмической технике.

Одной из особенностей титана является его активная способность взаимодействовать с газами атмосферы и многими другими химическими элементами. Это отложило существенный отпечаток на развитие технологии производства титана и его использование в современном машиностроении.

В России первый промышленный металлический титан в виде пористой массы (губки) был получен на Подольском химико-металлургическом заводе и предназначался для ВИАМ. Титановая губка была использована для освоения технологии плавки слитка, его деформации, термической обработки и других технологических операций.

Разработка окончательной технологии получения титановых сплавов была завершена в ВИАМ в конце 1954 г. Она заключалась в электродуговой плавке расходуемого электрода в вакууме или защитной атмосфере (аргоне). Расходуемый

электрод представлял собой цилиндрическую прессованную заготовку различного диаметра длиной до 2 м из титановой губки и легирующих элементов. Такая технология позволила получать слитки из титановых сплавов удовлетворительного химического состава с минимальным загрязнением примесями и труднорастворимыми включениями различного вида. Иногда для уменьшения колебаний химического состава осуществлялся двойной переплав слитков. Технология производства слитков титановых сплавов, разработанная в конце 1954 г., является основной до настоящего времени как в России, так и за рубежом.

В России получили развитие два основных класса титановых сплавов – конструкционные и жаропрочные.

Конструкционные титановые сплавы, обладающие достаточной пластичностью, предназначались для эксплуатации при средних температурах – до 350–450°C. Жаропрочные титановые сплавы разрабатывались для изделий авиационного двигателестроения, работающих при температурах 500–600°C. Имеются и другие группы титановых сплавов, различающиеся по специальным характеристикам.

Развитие конструкционных титановых сплавов началось с использования технического титана нескольких марок, имеющих разную степень чистоты по примесям, главным образом кислороду и азоту.

Впервые в России из технического титана в ВИАМ было изготовлено сварное изделие. Оно представляло собой беспилотную крылатую ракету «Буря», оснащенную сбрасываемыми топливными баками из нержавеющей стали. Ракета «Буря», разработчиком которой являлось «КБ Лавочкина», выпускалась в течение 1954–1957 гг.

Одновременно с работами по конструкционным титановым сплавам в ВИАМ проводили исследования по созданию жаропрочных титановых сплавов, первыми из которых были сплавы ВТ2 и ВТ3.

Сплав ВТ2 выплавляли методом тигельной индукционной плавки в графитовом тигле. Недостатком полученного металла было наличие в нем включений углерода. Этот метод выплавки и сплав ВТ2 промышленного применения не получили.

Сплав ВТЗ изготовляли методом электронно-дуговой плавки расходного электрода. Однако сплав имел низкую термическую стабильность из-за образования эвтектоида при длительном нагреве под напряжением. Вследствие этого он был унифицирован и под маркой ВТЗ-1 широко используется до настоящего времени в промышленности.

Следует отметить, что развитие и совершенствование титановых сплавов в начале и середине 60-х гг. прошлого века осуществлялось ускоренными темпами. Это было связано с тем, что перед учеными и производственниками была поставлена задача опередить США в создании и запуске космического корабля для посадки на лунную поверхность. Титану отводилась существенная роль в качестве конструкционного материала для элементов этого корабля.

Если первое изделие «Буря» изготовляли исключительно из технического титана с временным сопротивлением разрыву $\sigma_{\text{в}}=500$ МПа, то через 7 лет в «Луноходе» уже использовали высокопрочные титановые сплавы ВТ14, ВТ16, ВТ22 с $\sigma_{\text{в}}=1100\text{--}1200$ МПа.

В этот же период в России интенсивно проводили работы по использованию титановых сплавов в различных отраслях народного хозяйства, в первую очередь в авиакосмической промышленности.

Разработкой титановых сплавов для нужд своих отраслей занимались многие научно-исследовательские институты. К наиболее успешным следует отнести работы института металлургии Академии наук СССР под руководством профессора Н.И. Корнилова, ЦНИИ КМ «Прометей» под руководством профессора Г.И. Капырина, Гиредмета под руководством профессора Г.П. Даниловой и др. Тем не менее основной научно-исследовательской организацией-разработчиком титановых сплавов и технологии их обработки являлся ВИАМ. Практически вся номенклатура титановых сплавов разработана и паспортизована в этом институте. Он является одним из основных разработчиков технологических инструкций по обработке и применению титановых сплавов в российской металлургической промышленности.

В настоящее время российская промышленность обладает полной номенклатурой титановых сплавов, не уступающей наиболее развитым западным странам – США, Великобритании и др.

Обладая мощной производственной базой изготовления полуфабрикатов из титановых сплавов на Верхне-Салдинском металлургическом комбинате, наша промышленность имеет широкие возможности по их эффективному использованию в отечественном машиностроении.

Сопоставление номенклатуры и областей применения промышленных российских и зарубежных титановых сплавов показало отсутствие принципиальных различий. Структура сплавов представляет собой α - и β -твердые растворы на основе различных легирующих элементов. Допускается (особенно в жаропрочных титановых сплавах) наличие небольшого количества химических соединений (интерметаллидов) для повышения жаропрочности сплава при условии, что это не приведет к существенному снижению его пластичности.

Различие отечественных и зарубежных твердорастворных сплавов заключается чаще всего в использовании разных легирующих элементов, стабилизирующих α - и β -фазы.

Новый импульс в развитии промышленных титановых сплавов может быть реализован в связи с интенсивными исследованиями в России и за рубежом титановых сплавов с интерметаллидным типом упрочнения. Это могут быть как высокопрочные, так и жаропрочные сплавы. Некоторые успехи в этом направлении уже имеются.

Чтобы характеризовать современные российские титановые сплавы, их подразделяют на группы по областям применения или уровню механических свойств и структуре.

Конструкционные титановые сплавы

Эти сплавы можно условно разделить на высокопластичные, средней прочности и высокопрочные термически упрочняемые. Общая особенность

конструкционных сплавов – их структура представляет собой исключительно α - и β -твердые растворы как в отожженном и термически упрочненном состояниях, так и после эксплуатации при повышенных температурах и под напряжением. Они обладают высокой термической стабильностью и при эксплуатации сохраняют характеристики, свойственные конструкционным материалам: свариваемость, способность к пластической деформации и др.

Высокопластичные титановые сплавы (табл. 1) предназначены главным образом для производства листов, тонкостенных труб, профилей и других полуфабрикатов, изготавливаемых путем интенсивной пластической деформации. Для этих сплавов допускается умеренная пластическая деформация в холодном состоянии.

Таблица 1.

Химический состав и гарантированные механические свойства конструкционных титановых сплавов

Марка сплава	Средний химический состав, %	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ_5 , %
		МПа		
Высокопластичные титановые сплавы (лист толщиной 0,5–10 мм, пруток диаметром до 60 мм)				
BT1-00	Нелегированный титан	400	270	25
BT1-0	Нелегированный титан	500	380	20
OT4-0	Ti–0,8 Al–0,8 Mn	550	480	20
PT-7M	Ti–2,2 Al–2,5 Zr	500	380	20
OT4-1	Ti–1,5 Al–1,0 Mn	600	500	20
OT4-1B	Ti–1,5 Al–1,2 V	600	500	20
Титановые сплавы средней прочности (лист толщиной 0,5–10 мм, пруток диаметром до 60 мм)				
OT4	Ti–4,2 Al–1,6 Mn	700	650	11
OT4-B	Ti– 4,2 Al–1,8 V	700	650	12
PT-3B	Ti–4,2 Al–1,6 V	700	650	11
BT5-1	Ti–5,2 Al–2,5 Sn	800	750	10
BT6	Ti–6,0 Al–4,4 V	920	850	10
BT20	Ti–6,5 Al–1,2 Mo–1,3 V	950	900	10
Высокопрочные титановые сплавы (поковки диаметром до 60 мм)				
BT-14	Ti–4,5 Al–3 Mo–1 V	1120	1020	6
BT16	Ti–2,8 Al–5 Mo–5 V	1100	1000	12
BT23	Ti–5,5 Al–2 Mo–4,5 V–1 Cr–0,7 Fe	1190	1050	6
BT22	Ti–5,0 Al–5 Mo–5 V–1 Cr–1 Fe	1200	1100	6
BT22И	Ti–2,5 Al–5 Mo–5 V–1 Fe–1 Cr	1150	1050	8
BT22M	Ti–5,5 Al–5 Mo–5 V–1 Fe–1 Cr–2,5 Zr–1,5 Sn	1200	1100	6
BT35	Ti–3,0 Al–1,5 Mo–1,5 V–3 Sn–3 Cr	1200	1100	6
BT32	Ti–2,5 Al–8 Mo–8 V–1,2 Cr–1,2 Fe	1200	1100	6
BT15	Ti–3,0 Al–7 Mo–11 Cr	1200	1150	4

Титановые сплавы OT4-1 и OT4-1B являются аналогами. Различие заключается только в том, что в первом сплаве β -фаза стабилизирована

марганцем, а во втором – ванадием, который был дефицитным металлом на начальном этапе работ по созданию этих сплавов.

Сплавы средней прочности. Эта группа условно охватывает сплавы с временным сопротивлением разрыву в отожженном состоянии $\sigma_B=700-1000$ МПа (табл. 1).

Сплавы ОТ4 и ОТ4-В являются аналогами и используются по усмотрению заказчика полуфабрикатов. Сплав ПТ-38, близкий по химическому составу к сплаву ОТ4-В, применяется главным образом в изделиях судостроительной промышленности.

Высокопрочные термически упрочняемые титановые сплавы. Это легированные β -стабилизирующими элементами сплавы, способные упрочняться путем закалки и старения.

В отожженном состоянии они обладают умеренной пластичностью, а после закалки и старения приобретают повышенную прочность ($\sigma_B>1000$ МПа) за счет твердорастворного упрочнения.

Средний химический состав и гарантируемые механические свойства высокопрочных конструкционных титановых сплавов в термически упрочненном состоянии представлены в табл. 1.

Следует отметить, что высокопрочные титановые сплавы иногда используют в отожженном состоянии. Это связано с особенностями технологических операций при изготовлении изделий, в первую очередь сварных.

Жаропрочные титановые сплавы

К жаропрочным титановым сплавам относят твердорастворные α - и β -титановые сплавы, в которых содержится некоторое количество химического соединения, позволяющего повысить характеристики жаропрочности без существенного снижения их пластичности. Элементами, образующими с титаном химические соединения, которые повышают их жаропрочность, являются Al, Si, C, V и некоторые другие.

Следует отметить, что роль этих химических соединений до сих пор слабо изучена и их возможности не использованы в полной мере.

Существенно повышают жаропрочность сплавов этого типа и твердые растворы, образуемые с такими элементами, как Al, Zr, Sn и др. В табл. 2 приведены химический состав и механические свойства жаропрочных промышленных титановых сплавов в отожженном состоянии в порядке увеличения в их структуре количества β -фазы, а в табл. 3 – характеристики жаропрочности.

Таблица 2.

Химический состав и механические свойства жаропрочных титановых сплавов (пруток диаметром 10–100 мм)

Марка сплава	Средний химический состав, %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	Ресурс, ч
		МПа		%		
BT18У	Ti–6,7 Al–4 Zr–2,5 Sn–0,7 Mo–1 Nb	1000	930	10	20	500 (550–600°C)
BT36	Ti–6,2 Al–3,6 Zr–2,0 Sn–0,7 Mo–5,0 W–0,15 Si	1050	950	5	8	
BT8	Ti–6,3 Al–1,2 Zr–1,2 Sn–3,2 Mo–0,15 Si	1050	970	9	25	600 (500°C)
BT9	Ti–6,4 Al–1,5 Zr–3,0 Mo–0,25 Si	1050	980	9	25	500 (500°C)
BT8М	Ti–5,4 Al–1,2 Zr–1,2 Sn–4,0 Mo–0,15 Si	1050	980	10	25	
BT3-1	Ti–6,5 Al–2,5 Mo–1,5 Cr–0,5 Fe–0,3 Si	1000	930	10	30	2000 (450°C)
BT25	Ti–6,5 Al–3,7 Zr–1,7 Sn–4,0 Mo–1,0 Fe–0,2 Si	1050	950	10	20	3000 (550°C)

Примечание. В скобках даны предельные температуры эксплуатации.

Таблица 3.

Характеристики жаропрочности отожженных титановых сплавов

Марка сплава	σ_B^t , МПа			σ_{100}^t , МПа			$\sigma_{0,2/100}^t$, МПа		
	500°C	550°C	600°C	500°C	550°C	600°C	500°C	550°C	600°C
BT18У	880	825	770	675	500	315	370	120	110
BT36	750	700	650	680	520	335	440	260	–
BT8	750	720	680	525	390	–	250	100	–
BT9	805	715	685	570	–	–	350	160	–
BT3-1	670	600	540	400	–	–	280	–	–
BT25У	875	825	675	725	440	240	360	170	70

Обозначения: σ_B^t – временное сопротивление разрыву при температурах $t=500, 550, 600^\circ\text{C}$; σ_{100}^t – предел длительной прочности за 100 ч; $\sigma_{0,2/100}^t$ – предел текучести при испытаниях на длительную прочность за 100 ч.

Сплавы с интерметаллидным типом упрочнения

В последние годы большое внимание уделяется титановым сплавам, содержащим в своей структуре большее или меньшее количество химического соединения различного типа. В настоящее время имеется несколько направлений создания и использования сплавов со специальными свойствами, представляющими интерес для современного машиностроения.

К ним следует отнести жаропрочные сплавы на основе алюминидов титана Ti_3Al и $TiAl$ (табл. 4); сплавы на основе никелида титана с эффектом запоминания формы, имеющие достаточно высокие характеристики пластичности (табл. 5); сплавы эвтектического типа, рекомендуемые как «пожаробезопасные» для изготовления дисков, лопаток и корпусов самолетных двигателей (табл. 6). Структура «пожаробезопасных» сплавов состоит в значительной мере из эвтектоида, который имеет низкую температуру плавления и предотвращает перегрев деталей и конструкций, способный вызвать загорание металла в экстремальной ситуации. В качестве низкоплавких эвтектоидообразующих элементов используют Cu , Fe и др. Для повышения прочности и жаропрочности эти сплавы дополнительно легируют Al , Sn , Zr , Mo , V и др. К таким материалам относятся, например, сплавы $Ti-35\% V-50\% Cr$, которые используются как «пожаробезопасные» в литом состоянии.

Таблица 4.

Химический состав и механические свойства сплавов на основе алюминидов титана

Марка сплава	Средний химический состав, %	E , ГПа	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	σ_{100}^{650}	σ_{100}^{700}	σ_{100}^{800}
			МПа			МПа		
ВТИ-1	$Ti-15 Al-22 Nb-1,5 Zr-1,5 Mo$	128	950	860	4,0	380 (650)	350 (560)	–
Опытный	$Ti-48 Al-2 Nb-2 Cr$	165	650	550	2,0	–	350 (480)	180 (480)

Обозначения: σ_{100}^{650} , σ_{100}^{700} , σ_{100}^{800} – предел длительной прочности при 650, 700, 800°C за 100 ч.

Примечание. В скобках даны значения временного сопротивления разрыву, полученные при соответствующих температурах испытания на длительную прочность.

Таблица 5.

Химический состав и механические свойства сплавов на основе никелида титана

Марка сплава	Химический состав, %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	KCU , МДж/м ²	$t_{в.ф.}$, °С	$\sigma_{возв.}$, МПа
		МПа				
ТН1	Ti-(53,5–56,5)Ni	600–900	150–200	0,3–0,4	-10÷+90	300
ТН1К	Ti-(53,5–56,5) Ni-(2,0–4,5) Fe	500–900	100–250	0,3–0,5	-160÷-80	400
ТНМЗ	Ti-(48,0–52,5) Ni-(3,0–6,0) Cu	600–700	150–250	0,4–0,6	+80	200

Обозначения: $t_{в.ф.}$ – температура восстановления формы; $\sigma_{возв.}$ – напряжение возврата.

Примечание. Все сплавы имели $\delta_5=15-20\%$; $\psi=15-20\%$.

Таблица 6.

Механические свойства титановых сплавов эвтектического типа

Марка сплава	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_{100}^{350}	σ_{100}^{450}	σ_{100}^{500}	σ_{-1}
	МПа		%		МПа			
ВТТ1 (пруток)	950–1150	900–1100	4–8	10–20	720–760	550–600	300	450–480
ВТТ3 (лист)	600–750	420–460	10–12	–	320	–	–	380

Обозначения: σ_{100}^{350} , σ_{100}^{450} , σ_{100}^{500} – пределы длительной прочности при 350, 450, 500°С за 100 ч.

Примечание. Предел выносливости σ_{-1} определяли на базе $N=10^7$ цикл.

Титановые сплавы с интерметаллидным типом упрочнения, структура которых гетерогенизирована химическими соединениями или представляющая собой исключительно химические соединения, должны иметь более высокие свойства, чем традиционные титановые сплавы на основе твердых растворов.

Следует считать, что развитие жаропрочных и высокопрочных титановых сплавов будет осуществляться именно в этом направлении.

Некоторые вопросы развития технологии обработки титановых сплавов

Наряду с разработкой титановых сплавов различного назначения существенное внимание уделялось решению проблем их обработки.

Так, в ВИАМ проводились работы по исследованию термической стабильности жаропрочных титановых сплавов при повышенных температурах и рабочих напряжениях.

В результате таких исследований выявлены положительная роль легирования жаропрочных сплавов эвтектоидообразующими элементами и

пути повышения термической стабильности сплавов за счет повышения стабильности β -фазы твердорастворными элементами – Mo, V, Nb. Эти представления использованы при создании сплава ВТЗ-1, до сих пор широко применяемого в промышленности.

Был разработан новый класс конструкционных титановых сплавов – псевдо- α -сплавы с более высокой технологической пластичностью, чем у α -титановых сплавов. Повышение пластичности псевдо- α -сплавов достигалось за счет образования небольшого количества пластифицирующей β -фазы в α -матрице. На этой основе разработаны серия конструкционных сплавов ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ПТ-3В и некоторые другие, нашедшие широкое применение в промышленности.

Значительным достижением в области металловедения и термической обработки титановых сплавов следует считать разработку сплавов переходного типа, содержащих в структуре примерно равное количество α - и β -фаз. Такие сплавы позволяют получить максимальный упрочняющий эффект от закалки и старения за счет образования большого количества дисперсных частиц при старении. На такой основе создана серия высокопрочных промышленных титановых сплавов – ВТ22, ВТ22И, ВТ22М и др. Научно-исследовательские работы в этом направлении были удостоены премии П.П. Аносова Российской академии наук.

Отечественным достижением в области металловедения следует считать оригинальный способ производства деталей крепежа (болты, винты, заклепки) из специального высокопластичного титанового сплава ВТ16, который можно деформировать в холодном состоянии осадкой до 70%.

После операций высадки головки, редуцирования стержня и накатки резьбы достигается $\sigma_v \geq 1050$ МПа. Это позволяет получить выигрыш в весе при замене стальных деталей на титановые, особенно в авиакосмической технике, не менее чем на 30%. Кроме того, деформационный наклеп поверхностных слоев металла позволяет улучшить характеристики сопротивления усталости деталей или конструкций не менее чем на 35%.

Дальнейшие исследования в этом направлении позволили интенсифицировать изучение фактора инженерии поверхности титановых сплавов, поскольку состояние поверхности оказывает существенное влияние на работоспособность деталей и конструкций, особенно высоконагруженных.

Комплекс работ по созданию технологии производства высокоресурсных деталей крепежа из титановых сплавов был удостоен премии Совета Министров РФ.

Следует также отметить успехи в разработке самозакаливающихся титановых сплавов. Проблема заключалась в том, что при использовании высокопрочных титановых сплавов для изготовления сложных деталей и крупногабаритных конструкций, как правило, операцию закалки следует осуществлять в воде. Это резко осложняет технологию производства изделий из-за значительных поворотов при закалке.

Были разработаны высоколегированные титановые сплавы типа VT35 и VT32, самозакаливающиеся при охлаждении садки вместе с печью со скоростью $>6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. После проведения старения этих сплавов по обычному режиму можно достичь $\sigma_{\text{в}}=1200\text{--}1300$ МПа. Такая обработка осуществляется на готовых изделиях в печах с защитной атмосферой или в вакууме.

Применение титановых сплавов

Наиболее крупный потребитель титановых сплавов в настоящее время – авиакосмическая промышленность. В последние годы значительно увеличилось применение титана и его сплавов в химическом, транспортном, пищевом машиностроении, судостроении, оборудовании для нефтегазовой промышленности, медицине, строительстве и других областях.

В авиакосмической промышленности используются главным образом высокие удельная прочность и жаропрочность титановых сплавов, а в других областях машиностроения одной из основных причин применения титана является его высокая коррозионная стойкость.

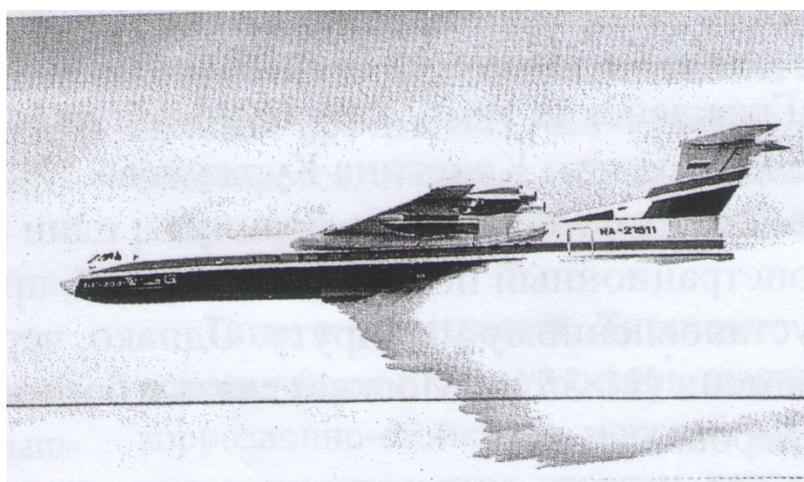
Существенное влияние на области применения титановых сплавов в промышленности оказывает цена титановых полуфабрикатов.

Титан в самолетостроении. Основные требования, предъявляемые к материалам для самолетостроения, – высокие характеристики удельной прочности и жаропрочности, сопротивления усталостным нагрузкам, трещиностойкости и достаточная коррозионная стойкость. Большое значение при изготовлении самолетных деталей и конструкций имеет также технологичность титановых сплавов – пластичность при деформации, свариваемость, обрабатываемость механическими, химическими методами и др.

Титановые сплавы широко применяются в деталях и конструкциях самолетов КБ С.В. Ильюшина, А.Н. Туполева, О.К. Антонова, Г.М. Бериева и др. (см. рисунок). Доля деталей из титановых сплавов составляет от 4 до 12% от веса планера.



Транспортный самолет Ил-76



Самолет-амфибия Бе-200, используемый для тушения пожаров



Самолет Ту-334



Истребитель МиГ-29



Истребитель Су-27



Истребитель Су-30МКИ

Примеры современных самолетов, в которых используются высоконагруженные детали (шасси, крылья, крепления, шпангоуты, лонжероны), изготовленные из титановых сплавов ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ6, ВТ14, ВТ16, ВТ22 и др.

Особенно эффективно применение титановых сплавов в самолетном двигателе. Все основные детали и конструкции двигателя, работающие в интервале температур от 150 до 550–600°С (диски, лопатки, корпуса и др.), могут быть изготовлены из жаропрочных титановых сплавов.

Использование титановых сплавов вместо сталей в двигателях самолета позволяет уменьшить массу деталей на 30–40%.

Титан в ракетостроении. Ракетостроение наряду с авиастроением является крупным потребителем титана. Особенность применения титана в ракетостроении – возможность использования сплавов с более высокой прочностью, чем в самолетостроении. Это объясняется главным образом меньшим ресурсом работы ракетных конструкций по сравнению с авиационными.

Титан в судостроении. Титановые сплавы широко используются в судостроении, главным образом как коррозионностойкие в морской воде материалы с удовлетворительным уровнем характеристик прочности. Из титановых сплавов изготавливают обшивку судов, гребные винты, теплообменники и другое судовое оборудование. Как правило, используют

низко- и среднепрочные титановые сплавы, хорошо сваривающиеся всеми видами сварки и обладающие хорошей технологической пластичностью.

Существует специальная номенклатура титановых сплавов для судостроения, включающая в себя сплавы ПТ-7М, ПТ-3В и другие с гарантированным временным сопротивлением разрыву, не превышающим $\sigma_B=800$ МПа.

Титан в химическом машиностроении и других отраслях промышленности. Титановые сплавы широко применяются во многих отраслях промышленности при изготовлении емкостной аппаратуры для хранения агрессивных жидкостей (кислотностью рН 3,5), уксусной, соляной кислот. Они используются для конструкций башен, адсорберов, теплообменной аппаратуры, фильтров, запорной аппаратуры и другого оборудования, работающего в агрессивной среде. Титановые сплавы пригодны для работы при криогенных температурах.

Выводы

Титан и его сплавы представляют собой далеко не в полной мере применяемые в современном машиностроении материалы. В настоящее время открываются широкие перспективы для создания титановых сплавов на основе использования интерметаллидов, позволяющих достичь высоких характеристик прочности и жаропрочности, а также других важных свойств. Безусловно, в ближайшие годы будут продолжаться интенсивные исследования в области разработки новых сплавов на основе титана. Гарантией этого являются регулярные международные конференции по проблемам титана.