

УДК 620.1

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВИАСТРОЕНИИ

Виктория Александровна Крохина

Студентка 4 курса,

Кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Н.А. Ночовная,

доктор технических наук, начальник лаборатории титановых сплавов ФГУП «ВИИМ»

Введение

Сплавы на основе титана стали одними из важнейших конструкционных материалов. Их применение наиболее целесообразно в тех областях техники, где необходимо сочетание высокой удельной прочности и коррозионной стойкости: судостроении, авиации, химической промышленности и т.д. Специфика применения титановых сплавов в последние десятилетия состоит во все более широком использовании их в различных конструкциях, в том числе упругих элементов, что приводит к увеличению как объемов производства, так и сортамента полуфабрикатов и изделий.

Изученные к настоящему времени фазовые превращения в сплавах титана бесспорно лежат в основе технологии их механической и термической обработки, но приходится признать, что производство конкретных полуфабрикатов и изделий постоянно требует и будет требовать исследования и детализации закономерностей превращений. Структура и свойства сплава, а также различные виды термомеханической обработки могут оказать решающее влияние на возможности, например, окончательной упрочняющей обработки.

Ответственные сферы применения этих сплавов требуют дальнейшего повышения их эксплуатационных свойств за счет разработки новых режимов термической и термомеханической обработок, позволяющих получить уровень прочности в изделиях до 1400 МПа при удовлетворительных пластических и вязкостных характеристиках. К одним из наиболее перспективных титановых сплавов для данных целей следует отнести высокопрочный сплав - ($\alpha+\beta$) класса - BT23M.

Легирование титановых сплавов

Легирующие элементы оказывают различное влияние на температуру полиморфного превращения титана. Созданные на основе систем Ti – Al – V и Ti – Al – Mo или на их комбинации промышленные сплавы отличаются высокой термической стабильностью, поскольку ванадий и молибден являются изоморфными β – стабилизаторами, не образующими с титаном химических соединений и не приводящими к эвтектидным реакциям.

На рисунке 1 представлена классификация легирующих элементов на группы в зависимости от их действия.

Изменение содержания α – стабилизаторов и нейтральных упрочнителей не принимается во внимание при определении принадлежности сплавов к тому или другому классу. Эта классификация наиболее приемлема для оценки возможностей термической и термомеханической обработок титановых сплавов.

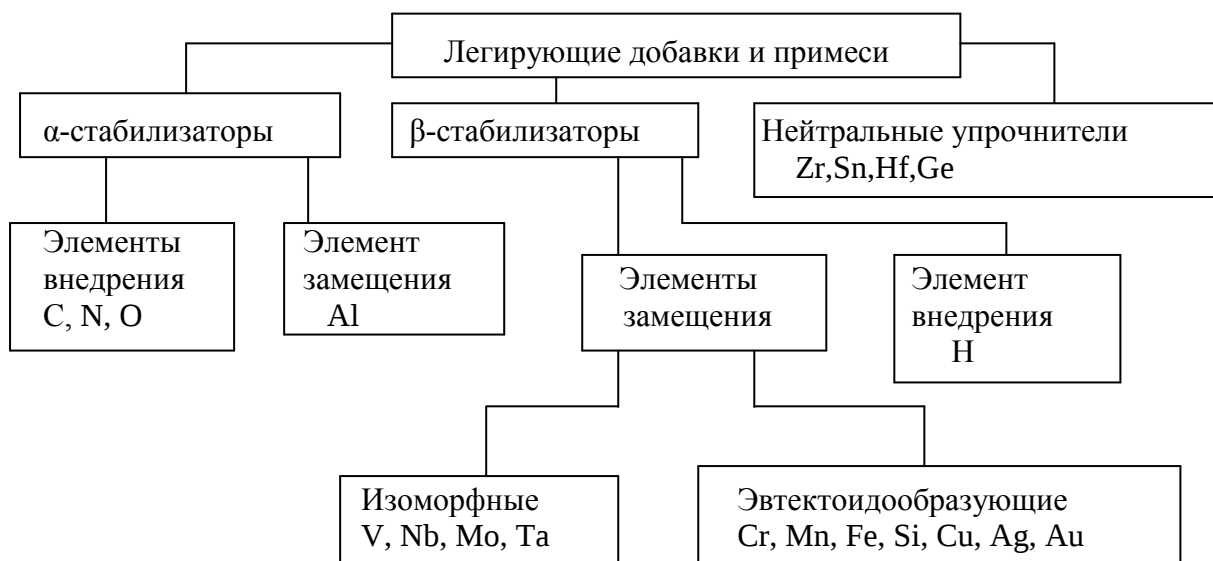


Рис. 1. Схема деления легирующих элементов и примесей на группы

К нулевому классу относятся сплавы с α -структурой, в которых отсутствует β -стабилизаторы. К этому классу относятся три марки технического титана: BT1-00, BT1-0, BT1 и сплавы, легированные алюминием и оловом: BT5(Ti-5% Al) и BT5-1(Ti-5%Al-2,5%Sn). Алюминий эффективно повышает прочностные характеристики, одновременно снижая пластичность. Его содержание в промышленных сплавах ограничивается 7%, так как дальнейшее увеличение алюминия ведет к охрупчиванию сплава.

К первому классу относятся малолегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа (псевдо α - сплавы). В них наряду с алюминием есть небольшое количество элементов, стабилизирующих β -фазу, в пределах, близких к растворимости в α -титане. К этому классу сплавов относятся сплавы OT4-0, OT4-1, OT4, BT4, содержащие от 1 до 5% Al и 0,8-2,0% Mn, и сплав BT20 (6% Al-2% Zr-1% Mo-1% V). Благодаря такому легированию получают предел прочности от 500 до 950 МПа.

Ко второму классу относятся среднелегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа: BT6С, BT6, BT14, BT23, BT23М (конструкционные) и BT3-1, BT8, BT9 (жаропрочные). Эти сплавы закаляют с температуры β -области на α' -фазу. В наиболее прочном свариваемом сплаве BT23 применено комплексное легирование четырьмя β -стабилизаторами при использовании более дешевых легирующих элементов - хром и железо.

К третьему классу относятся высоколегированные $\alpha+\beta$ - сплавы мартенситного типа. К этому классу сплавов может быть отнесен сплав BT16 и другие сплавы, закаливаемые с температуры β -области на α'' -фазу.

В целом стоит отметить, что $\alpha + \beta$ – титановые сплавы характеризуются большим разнообразием и сложностью фазовых превращений.

Среди высокопрочных титановых сплавов следует выделить высокопрочные и высокопластичные β - сплавы, представленные на диаграмме титан - β -стабилизаторы. Эти β - сплавы имеют пониженное количество алюминия, что обеспечивает им высокую пластичность (рисунок 2).

К четвертому классу относятся малолегированные β - сплавы: BT22, BT30 и BT19. При закалке с температуры β -области в этих сплавах фиксируется 100% механически и термически нестабильной β -фазы.

К пятому классу относятся среднелегированные β - сплавы, содержащие термически нестабильную β - фазу. К этому классу сплавов относятся сплавы: ВТ15, ИВТ1, ТС6, а также американский сплав В-120VCA.

К шестому классу высоколегированные β - сплавы, содержащие практически стабильную β -фазу. К этому классу сплавов относится сплав 4201(с 32% Mo).

В средне- и высоколегированных сплавах мартенситного типа упрочняющая термообработка приводит к повышению твердости. Наряду с распавшейся β - фазой, преобладающей в структуре этих сплавов, остается мартенситная игольчатая фаза.

Преимуществами $\alpha+\beta$ - сплавов по сравнению с β - сплавами являются: меньшее содержание в них дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, что снижает стоимость сплава; меньшая плотность и меньшая энергоёмкость при получении и термообработке полуфабрикатов и деталей. В общем виде принадлежность титановых сплавов к определённому классу представлена на рисунке 2.

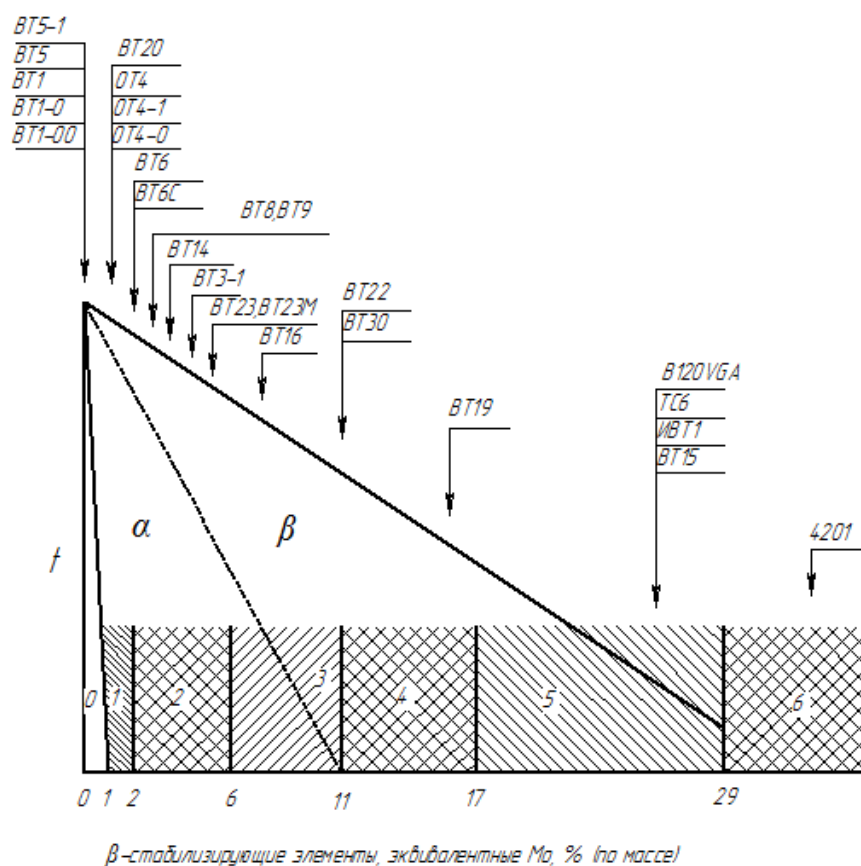


Рис. 2. Классификация титановых сплавов: 0 - 6- классы сплавов

Высокопрочные титановые сплавы

По особенностям механических и технологических свойств титановые сплавы могут быть разделены на три группы:

- высокопластичные (термически неупрочняемые) конструкционные сплавы;
- высокопрочные (термически упрочняемые) конструкционные сплавы;
- жаропрочные сплавы.

При создании сложных конструкций из высокопрочных титановых сплавов механические соединения заменяют сварными. В этом случае используют

автоматическую аргоно-дуговую и электронно-лучевую сварку и сварку в обитаемой камере.

На диаграмме Ti - β -стабилизаторы (рисунок 2) представлен ряд широко применяемых высокопрочных отечественных титановых сплавов с ($\alpha+\beta$) структурой. Их свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики высокопрочных конструкционных титановых сплавов с ($\alpha+\beta$) структурой

Сплав	Композиция легирования (содержание элементов, % по массе)	σ_b , МПа	Максимальная температура применения, °С	Тип полуфабриката
BT6	Ti-6Al-4V	900-950	350	Листы, плиты, прутки, поковки, штамповки
BT16	Ti-3Al-5Mo-5V	1000-1050	300	Прутки
BT22	Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	≥ 1080	350	Крупногабаритные штамповки и поковки
BT23	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,6Fe	≥ 1100	350	Листы, лента, фольга, плиты, прутки, поковки, штамповки, трубы, профили
BT23M	Ti-5,4Al-1,9Mo-4,2V-1Cr-0,4Fe	≥ 1150	350	Аналогичны сплаву BT23

Универсальный титановый сплав BT6 рекомендуется для деталей и узлов вентилятора и компрессора низкого (среднего) давления (диски, лопатки, детали статора, кольца, корпусные детали), работающих при температуре до 350°C неограниченно. Сплав отличается высокой технологичностью, однородностью химического состава, пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений, возможностью многоцелевого применения. Металлургические предприятия поставляют полуфабрикаты из сплава BT6 в виде катаных прутков, штамповок дисков, раскатных колец, штамповок лопаток, листов. Используется для изготовления балок и кронштейнов в самолете Ту-154, Ту-204 и др.

Сплав BT16 применяется для изготовления деталей крепления в таких самолетах, как Ту-160, Ту-144, Ту-154, Ту-204, Ту-334. Из него изготавливают болты методом холодной высадки в отожженном состоянии на высокопроизводительных автоматах. Накатка резьбы осуществляется также в холодном состоянии. Организовано массовое производство холодно-высаженного нормализованного крепежа из сплава BT16.

Сплав BT22 (Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe) - первый из рассматриваемых сплавов закритической концентрации (количество β - стабилизаторов эквивалентно 11,5% Mo). Он эффективно упрочняется при термической обработке и обладает достаточными

эксплуатационными свойствами, позволяющими применять его в конструкциях шасси самолета ИЛ-86, ИЛ-96, ИЛ-76. Наличие в сплаве большого количества β - стабилизаторов обеспечивает ему хорошую прокаливаемость и эффективное упрочнение в сечениях до 150 мм. Это позволяет проводить упрочняющую термообработку в заготовке, а затем изготавливать деталь путем механической обработки. В отличие от других β - сплавов он имеет повышенное содержание алюминия и применяется в виде поковок, штамповок, прутков при температуре до 350°C. Сплав ВТ22 используется для изготовления стенок и баков в самолете Ту-154, а также фитингов и арматуры в Ту-204.

Сплав ВТ23 - высокопрочный свариваемый титановый сплав с температурой применения от -196 до +400°C. Из этого сплава изготавливаются практически все виды полуфабрикатов: фольга 0,08 мм; лента 0,1 мм; листы 0,6 - 10 мм; плиты до 250 мм; поковки и штамповки массой до 3,5 т; трубы горячекатаные, холоднокатаные и переменного сечения; прессованные профили; прутки.

В конструкции космического аппарата "Буран" практически все нагруженные узлы выполнены из сплава ВТ23 в состоянии после одного старения. Это позволило исключить на машиностроительном заводе высокотемпературное с защитной атмосферой закалочное оборудование и снизить расход электроэнергии в 2 - 3 раза. Для эффективного упрочнения достаточна температура 450-500°C. Использование сплава ВТ23 и разработанных процессов позволило получить экономию сырьевых и энергетических ресурсов.

Сплав ВТ23 успешно применен в силовых конструкциях космического аппарата «Астрон». Из него изготовлены шаровые сварные баллоны, работающие под высоким внутренним давлением, с уровнем прочности $\sigma_B \geq 1200$ МПа. В конструкциях гидросамолета Бе-200 сплав ВТ23 применен для изготовления сварных и монолитных конструкций, в том числе для изготовления гидроаккумуляторов (рисунок 3).

Титановый высокопрочный свариваемый ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного типа ВТ23 успешно применен в конструкциях Як-55, Су-31, Су-26М и других. Ресурсные и циклические испытания узлов конструкций показали высокую надежность сплава в работе и его малую чувствительность к колебаниям параметров технологического процесса – термообработки, механической обработки и др.



Ракетно-космический комплекс "Энергия-Буран". Общая масса деталей, изготовленных из сплава ВТ23 после ВТМО, 6т (в "Бурани") и 14т (в "Энергии"): шпангоуты, балки, лонжероны и стыковочные узлы



Космический корабль "Астрон". Шаровые баллоны, изготовленные из сплава ВТ23 путем сверхпластической деформации (СПД), сварки и термоупрочнения ($\sigma_B \geq 1250$ МПа)



Гидросамолет Бе-200. Из сплава ВТ23 изготовлены гидроаккумуляторы и силовые детали



Спортивный самолет Су-29 (Су-26, Су-31, Су-31М, Су-31СК, Як-55). Из сплава ВТ23, с применением высокоскоростной закалки и старения, изготовлены детали шасси с $\sigma_B \geq 1250$ МПа

Рис. 3. Применение титанового сплава ВТ23 в конструкциях авиакосмической техники

Высокопрочный титановый сплав ВТ23М

Сплав ВТ23М является модификацией высокопрочного титанового сплава ВТ23 и имеет суженный диапазон легирования, что повышает стабильность механических свойств и характеристик работоспособности, а также снижает дисперсию механических свойств в 1,5 раза.

Усовершенствование высокопрочного хорошо свариваемого титанового сплава, обеспечивающего σ_B не менее 1100 МПа, σ_B *св.соед.* не менее 0,9 от σ_B *осн.мат.* и удельную прочность основного материала $\sigma_{B/\gamma} \geq 24$ кМ, что позволило:

- снизить массу конструкции на 40-50% по сравнению с конструкциями из сплава ОТ4;
- значительно повысить технологичность изготовления листовых конструкций в холодном и горячем состоянии.

Сплав ВТ23М является высокопрочным свариваемым ($\alpha+\beta$) -титановым сплавом универсального применения:

- из него изготавливают все виды полуфабрикатов, полученных прокаткой, ковкой, прессованием;
- из него изготавливают все типы конструкций – монолитные, сварные и паяные.

Температура применения сплава – от минус 196°С до плюс 400°С. Сплав может быть применен в отожженном и термически упрочненном состоянии: либо после одного старения, либо после двойного отжига с охлаждением на воздухе, либо после закалки в воде и старения. Таким образом, имеются широкие возможности по применению различных схем термообработки, обеспечивающих получение широкого диапазона прочностных характеристик.

Сплав обладает сочетанием высокой прочности и высоких характеристик трещиностойкости (K_{Ic}) основного материала и сварных соединений, значительно превосходящим по уровню этих характеристик зарубежные аналоги.

Сплав ВТ23М находится в области легирования сплавов, в которых при закалке из β - области фиксируется α'' - фаза (пластичный мартенсит). Поэтому закаленные или быстро охлажденные в процессе изготовления полуфабрикаты будут иметь высокий комплекс механических свойств, что предотвратит их растрескивание и разрушение, имеющее место у другого класса сплавов.

Из высокопрочного свариваемого титанового сплава ВТ23М универсального применения изготавливают различного типа и назначения силовые конструкции: лонжероны, шпангоуты, обшивка, емкости (шаровые и цилиндрические), баллоны, сотовые панели, закладные элементы композиционных конструкций и др.

Из сплава ВТ23М изготавливают практически все виды полуфабрикатов: фольгу 0,08 мм; ленту 0,1 мм; листы (0,6 – 10) мм; плиты до 250 мм; поковки и штамповки массой до 3,5 т; трубы горячекатаные, холоднокатаные и переменного сечения; прессованные профили; прутки. Полуфабрикаты поставляют по техническим условиям с гарантированным уровнем механических свойств.

Серийное изготовление из сплава ВТ23М фольги, ленты и листов свидетельствует о его высокой технологической пластичности. Этот универсальный комплекснолегированный сплав нового поколения может быть применен как для широкой номенклатуры полуфабрикатов, так и для различного типа конструкций.

Комплексное легирование сплава ВТ23М при уменьшенной концентрации молибдена и ванадия и отсутствии олова и циркония (по сравнению со сплавами США Trans X206, Trans 134) обеспечивает более низкую стоимость и меньшую плотность (4,57 г/см³).

Сплав ВТ23М является сплавом «мартенситного» типа (как и известные отечественные сплавы ВТ6, ВТ14 и сплавы США: 6-4, 6-6-2, Corona 5, Trans X206, Trans134), что позволяет использовать уже существующее оборудование для его термической обработки, деформации, сварки, механической обработки. Сплав ВТ23М с $(\alpha+\beta)$ - структурой обладает хорошей обрабатываемостью резанием, значительно превосходящей сплавы с β - структурой.

Высокопрочный свариваемый титановый сплав ВТ23М обладает на (200-300 МПа более высокой прочностью ($\sigma_B = 1100-1300$ МПа) и на 25 % более высокой вязкостью разрушения ($K_{Ic} \geq 93$ МПа.м^{1/2}), чем аналогичные зарубежные сплавы, а по стоимости ниже на 20 %, благодаря комплексному легированию с использованием недорогих легирующих элементов.

Применение сплава ВТ23М для изготовления такой различной по своему назначению номенклатуры деталей из одного вида полуфабрикатов стало возможным во многом благодаря применению технологии высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и технологии термической обработки. Указанные технологии позволяют варьировать, например, предел прочности листовых полуфабрикатов толщиной 1,5-3,5 мм от 980 до 1250 МПа. Достоинством сплавов этого класса является возможность варьирования температур как деформационной, так и термической обработки в достаточно широком интервале без риска снижения эксплуатационных характеристик и получения заданного комплекса свойств, отвечающих требованиям к различным деталям конструкции.

Высокопрочный титановый сплав ВТ23М планируется применять в перспективном истребителе нового поколения «ОКБ Сухого» взамен сплава ВТ23. Общий вес конструкций, изготовленных из сплава, составляет 17,66% от веса планера. Именно в изготовлении узлов и конструкций истребителя пятого поколения полностью реализованы возможности широкого варьирования свойств сплава для достижения наиболее оптимальных эксплуатационных характеристик, обеспечивающих заданный ресурс работы изделия.

Заключение

Сплав ВТ23М представляет собой логичное развитие современных высокопрочных титановых сплавов и является перспективным для применения в новых конструкциях и изделиях авиационно-космической техники. В связи с чем представляет интерес исследование структуры полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23М после различных режимов термической обработки, так как весьма актуальной задачей является разработка энергосберегающих технологий термической обработки, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 С.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: «МИСИС», 1999. - 416 С.
3. Макквиллэн М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах. М.: Металлургия, 1969.-190 С.
4. Фролов, К.В. Машиностроение. Энциклопедия // К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 2001. – 190 С.
5. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1979. - 228 С.
6. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных – титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности // Авиационные материалы и технологии: сб. науч. тр./ ФГУП «ВИАМ». – М., 2010, С.21- 22

7. *Чечулин Б.Б.* Титановые сплавы в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1977.- 248 С.
8. *Яковлев А.Л., Ночовная Н.А.* Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М. // Авиационные материалы и технологии. – 2013. - №4. – С. 8-13.
9. *Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А.* Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого». // Титан. – 2013. - №2. – С. 39-42