

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ САМОЛЕТО-, РАКЕТО- И СУДОСТРОЕНИЯ

А.И. Хорев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ И РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Введение

К 55-летию лаборатории титановых сплавов ВИАМ можно отметить, что в авиакосмической и ракетной технике применяются титановые сплавы, разработанные только в ВИАМ, а процессы изготовления конструкций из титановых сплавов и обработок давлением составляют основу технологий, обеспечивших прогресс современных летательных аппаратов.

В результате работы по научному направлению «Конструкционные и специальные титановые сплавы» была создана теория комплексного легирования титановых сплавов и разработана серия сплавов с α -, псевдо- α -, ($\alpha+\beta$)- и β -структурой. Разработаны основы термической и термомеханической обработок, а также текстурного упрочнения титановых сплавов; предложены многофазные и многофакторные механизмы упрочнения, обеспечивающие получение высокого уровня и стабильности механических свойств. Созданы основы обработки конструкционных титановых сплавов давлением и предложены технологические процессы изготовления полуфабрикатов, обеспечивающие получение однородного структурно-фазового состояния в объеме металла. Разработаны технологические процессы изготовления монолитных, сварных и паяных конструкций, обладающих высоким ресурсом и надежностью. Созданы, с широким (до 96%) применением титановых сплавов, летательные аппараты: ракеты различного назначения, обеспечившие ядерное сдерживание в военном противостоянии; космические аппараты, демонстрирующие успехи отечественной науки; маневренные и спортивные самолеты – лучшие в мире [1–14].

Титановые сплавы являются символом современности создаваемых конструкций. По уровню прочности и надежности титановых сплавов, а также объему их применения в летательных аппаратах в значительной мере судят о современности ЛА, их эффективности и весовом совершенстве. Конструкционные сплавы, из которых изготавливают листы и другие типы полуфабрикатов, отличающиеся хорошей свариваемостью, должны занять достойное место при создании современных самолетов, космических аппаратов и ракет. Они позволят резко повысить коэффициент использования дорогостоящих титановых сплавов и снизить стоимость конструкций. Это, наряду с повышением весовой эффективности, ресурса и надежности, является важнейшей задачей [1–14].

Влияние комплексного легирования на механические, технологические и экономические характеристики титановых сплавов

На диаграмме Ti– β -стабилизаторы (представлены в эквивалентных содержаниях молибдена величинах) приведен ряд разработанных конструкционных титановых сплавов (рис. 1, а). Чтобы определить место каждого сплава при изготовлении современных конструкций, следует установить общие закономерности изменения основных механических, технологических и экономических характеристик в зависимости от легирования сплава и его фазового состава.

Автором установлено, что с увеличением количества β -стабилизирующих элементов (Mo+V+Cr+Fe) в сплавах [11, 12]

– стоимость шихтовых материалов для выплавки слитков при увеличении количества β -стабилизаторов на величину, эквивалентную содержанию 1% молибдена, возрастает на 5%;

- увеличивается неоднородность химического состава слитка, которая возрастает в большей мере у слитков большего диаметра;
- снижается температура ($\alpha \rightleftharpoons \beta$)-превращения и уменьшается технологичность деформации, особенно в ($\alpha + \beta$)-области;
- повышается плотность сплава;
- увеличивается химическая неоднородность в металле шва сварного соединения, особенно при сварке больших толщин;
- увеличивается энергоёмкость и трудоёмкость термообработки из-за повышения стабильности β -фазы, требующей более сложной и длительной термообработки;
- ухудшается обрабатываемость резанием из-за увеличения количества вязкой β -фазы и налипания сплава на режущую кромку;
- увеличивается дисперсия механических свойств, обусловленная химической неоднородностью и неоднородностью распада метастабильных фаз;
- увеличивается трудоёмкость изготовления деталей;
- уменьшается температурный интервал применения сплавов [7]:

Сплавы	Температурный интервал применения, °С
α -сплав	
BT5-1	от -253
псевдо- α -сплавы	
BT18У, BT38	до +600
($\alpha + \beta$)-сплавы:	
BT6ч.	-196÷+450
BT23, BT23М, BT43	-196÷+400
β -сплавы:	
Ti-10-2-3	-50÷+300
BT19, BT19-1	-50÷+250
BT15, BT15-1	-40÷+150.

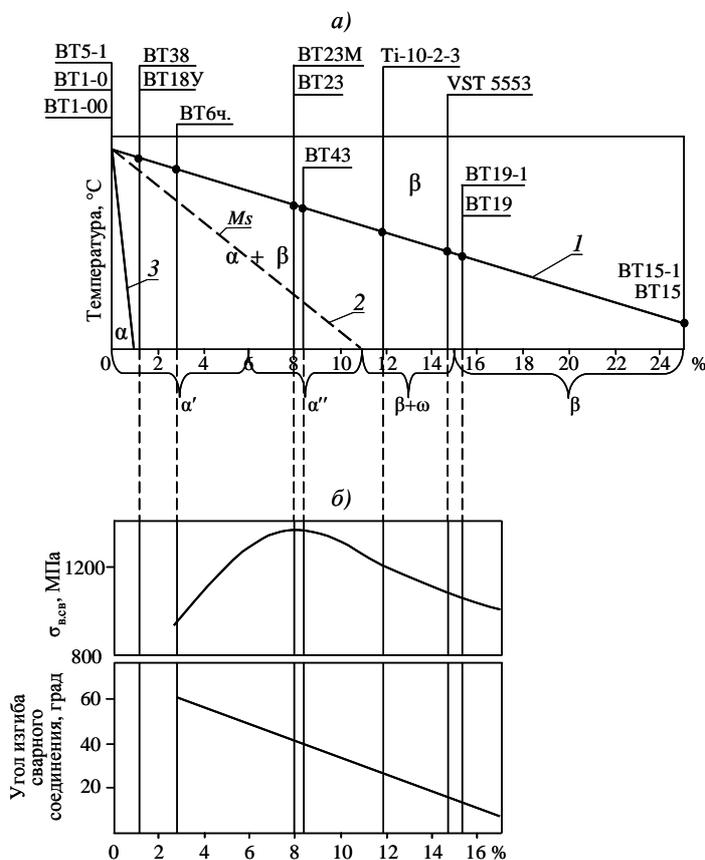


Рис. 1. Влияние комплексного легирования (по оси абсцисс – количество β -стабилизаторов, условно эквивалентное содержанию молибдена) на фазовый состав сплавов (а) и механические свойства сварных соединений титановых сплавов в термически упрочненном состоянии (б):

1, 2 – граница полиморфного и мартенситного (M_s) превращения соответственно; 3 – граница между α - и ($\alpha + \beta$)-твердыми растворами

На рис. 1, б показаны кривые изменения механических свойств сварных соединений в зависимости от количества β -стабилизирующих элементов в сплавах с 3% алюминия (от ВТ6ч. до ВТ19 – см. рис. 1, а).

В термически упрочненном состоянии пластичность сварных соединений, оцениваемая углом изгиба α при радиусе изгиба, равном толщине листа ($r=t$), с увеличением концентрации β -стабилизирующих элементов непрерывно снижается, а предел прочности сварного соединения проходит через максимум, соответствующий сплаву Ti–3Al–1,8Mo–3,4V–0,8Cr–0,6Fe (типа ВТ23). Этот сплав, содержащий β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 7–8% Mo, при высокой прочности сварного соединения ($\sigma_{в.св}=1380$ МПа) обладает удовлетворительной пластичностью металла шва и зоны термического влияния ($\alpha_{св}=40$ град). Этой концентрации соответствует максимальный эффект увеличения прочности от применяемой высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и максимальный уровень прочности, а также максимальное значение K_{1c} [11–12].

С увеличением легирования в сплавах, охлажденных с высоких температур после окончания деформации полуфабрикатов, фиксируются α' -, α'' -, ($\beta+\omega$)- и β -фазы (см. рис. 1, а). В области сплавов, в которых наряду с β -фазой фиксируется хрупкая ω -фаза, возможно растрескивание полуфабриката в процессе охлаждения, что потребовало принятия специальных мер при изготовлении экспериментальных листов. Сплавы, находящиеся в области фиксации пластичной α'' -фазы (типа ВТ23) сохраняют высокую пластичность независимо от условий охлаждения, что очень важно при изготовлении полуфабрикатов и деталей.

Научное и практическое обоснование изложенного представлено в опубликованных автором 4 монографиях и более чем в 200 научных статьях, приоритет разработок подтвержден 334 авторскими свидетельствами и патентами, более 200 из которых применено (74 из них вошли в состав лицензий, проданных за рубеж).

На основе исследований трех-, четырех-, шести- и восьмикомпонентных систем легирования разработаны конструкционные (листовые) свариваемые титановые сплавы с псевдо- α - (ВТ18У, ВТ38), ($\alpha+\beta$)- (ВТ6ч., ВТ23, ВТ23М, ВТ43) и β -структурой (ВТ19) и др., композиционные материалы (КМ) на основе титановых сплавов, многостадийные технологии обработки сплавов давлением и технологии применения сплавов в монолитных, сварных и паяных конструкциях.

Конструкционные псевдо- α -сплавы ВТ18У и ВТ38

На основе созданной теории легирования титановых сплавов и предложенного многофакторного механизма упрочнения (твердорастворный + дисперсионный + интерметаллидный + упрочнение химическими соединениями) разработаны конструкционные листовые титановые сплавы ВТ18У и ВТ38 высокотемпературного применения.

В сплаве ВТ38 достигнуто предельное легирование α -твердого раствора и регламентированное распределение интерметаллидных фаз (α_2) и химических соединений (силицидов и др.) путем микролегирования с целью модифицирования структуры редкоземельным элементом гадолинием (0,05–0,2%).

Применены новые термомеханические режимы изготовления полуфабрикатов и ВТМО, предельно сокращающие высокотемпературный нагрев, что обеспечивает более дисперсное распределение интерметаллидных, химических и твердорастворных дисперсных фаз.

Созданы новый процесс изготовления листов толщиной 0,8–1,2 мм из сплавов ВТ18У и ВТ38 высокотемпературного применения и процессы преобразования струк-

туры, обеспечивающие повышение жаропрочности. Тонкие листы (0,8–1,2 мм) из сплава ВТ38 обладают высокими жаропрочными характеристиками: $\sigma_{100}^{600^\circ} = 240$ МПа, $\sigma_{0,2/100}^{600^\circ} = 60$ МПа, превышающими свойства при 600°C наиболее жаропрочного отечественного листового сплава ВТ20 в 3–6 раз (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Жаропрочность листов сплавов ВТ38, ВТ18У и ВТ20				
Сплав	$\sigma_{100}^{500^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{500^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$
	МПа			
ВТ38	600	240	290	60
ВТ18У	580	190	270	40
ВТ20	480	95	160	10

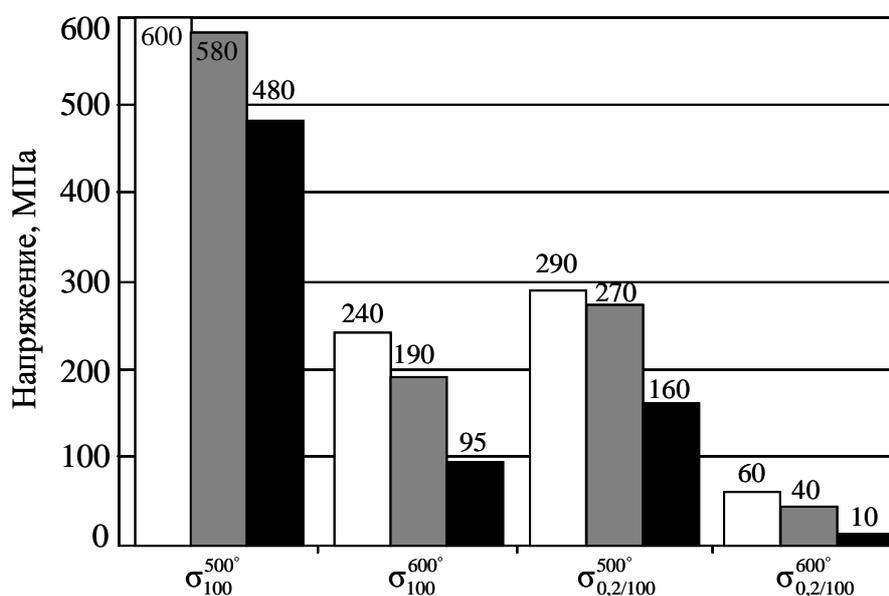


Рис. 2. Сравнение жаропрочных свойств листов новых сплавов ВТ38 (□), ВТ18У (■) и серийного сплава ВТ20 (■)

Сплав ВТ38 при температуре 20°C имеет следующие механические свойства: $\sigma_B = 970$ МПа; $\delta_5 = 8\%$.

При 500 и 600°C сплав ВТ38 по своим механическим характеристикам превосходит на 40–50% все лучшие листовые зарубежные сплавы, при этом могут быть получены листы толщиной 0,8 мм (вместо 3,0 мм у зарубежных), что позволяет повысить весовую эффективность конструкций. Сплав ВТ38 целесообразно применять при температуре до 600°C в конструкциях носовых обтекателей, обшивки двигателей, рулях управления ракет и космических аппаратов, в композиционных материалах и конструкциях.

Конструкционный ($\alpha + \beta$)-сплав ВТ6ч., закаливающийся на α' -фазу

Изучены структурно-фазовые состояния зон сварных соединений сплава ВТ6ч., выполненных ААрДЭС (листы) и ЭЛС (плиты) [10]. Показано, что для достижения однородного структурно-фазового состояния в зонах сварных соединений (шов, зона тер-

мического влияния (ЗТВ), основной металл (о.м.)), выполненных ЭЛС, и устранения структурных (внутренних) концентраторов напряжений необходимо проводить отжиг при температуре 850°C, т. е. на 100°C выше, чем для сварных соединений, выполненных ААрДЭС. Сплав ВТ6ч. широко применяется при создании сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144 для изготовления балок, кронштейнов и других силовых деталей и узлов. Сплав ВТ6ч. рекомендован для применения в новом самолете фирмы «Гражданские самолеты Сухого».

Конструкционные ($\alpha+\beta$)-сплавы ВТ23, ВТ23М, ВТ43, закаливающиеся на α'' -фазу

Создана теория комплексного легирования титановых сплавов и разработан комплексно-легированный ($\alpha+\beta$)-сплав ВТ23 универсального применения [1–2].

Основные принципы комплексного легирования сводятся к следующему:

– повышение прочности α - и β -твердых растворов и уменьшение разности в их прочности;

– легирование β -стабилизирующими элементами противоположного распределения ($K_{\beta}>1$ и $K_{\beta}<1$) при дендритной ликвации с целью обеспечения постоянства суммарного количества β -стабилизирующих элементов в разных зонах дендритов;

– легирование изоморфными и эвтектоидообразующими элементами в соотношении от 2:1 до 1:1 (выраженном в эквивалентных содержанию молибдена величинах).

Область и состав легирования сплава ВТ23 определили следующие положительные факторы: максимальная прочность сварных соединений; максимальная эффективность ВТМО; максимальное значение характеристики K_{1c} основного материала и сварных соединений; сравнительно невысокая стоимость; пониженная энергоемкость; высокая технологичность при сварке и термической обработке.

Из сплава ВТ23 изготавливают все виды полуфабрикатов с гарантированно высоким уровнем механических свойств: фольга и лента (0,08–1,0 мм), плиты ковато-катаные (11–160 мм), штамповки (массой до 1,5 т), поковки (массой до 3,5 т), прутки катаные ($\varnothing 25$ –150 мм), профили, трубы горяче- и холоднокатаные.

Из сплава ВТ23 могут быть изготовлены все конструкции самолета: от сотовых паяных панелей из фольги и обшивки из листов до балок, лонжеронов, шпангоутов из плит, поволоков и штамповок. Поэтому его следует рассматривать как универсальный сплав широкого применения. Он технологичен при обработке резанием и давлением, энергетически малоемко и имеет сравнительно невысокую стоимость.

В процессе охлаждения полуфабрикатов при металлургическом производстве в ($\alpha+\beta$)-сплавах ВТ23, ВТ23М и ВТ43 образуется пластичная α'' -фаза. Наличие в сплаве пластичного мартенсита α'' делает сплав работоспособным, даже если не проводили заключительных термических обработок, что подтвердило исследование эксплуатационных характеристик в таком состоянии. Это категория титановых сплавов, менее чувствительных к нарушениям технологических процессов при изготовлении полуфабрикатов и конструкций.

Сплав ВТ23 обладает после ВТМО (состояние после горячей прокатки иковки) и старения высоким уровнем прочности и трещиностойкости основного материала ($\sigma_b \geq 1080$ МПа, $K_{1c} = 93$ –120 МПа·м^{1/2}) и сварных соединений ($\sigma_b \geq 970$ МПа, $K_{1c} \geq 86$ –93 МПа·м^{1/2}).

Сплав ВТ23 применен в конструкциях ракетной, космической и авиационной техники – для изготовления шаробаллонов, днищ, лонжеронов, балок, шпангоутов и других силовых деталей, в том числе в конструкциях шаровых баллонов, работающих

при высоком внутреннем газовом давлении, с пределом прочности $\sigma_B \geq 1300$ МПа, что является максимальным реализованным в мире уровнем прочности.

Следует отметить, что поковки и штамповки сплава ВТ23 массой до 3,5 т широко применялись при создании конструкций ракет, определивших баланс сил в ядерном соревновании. Широкий интервал рабочих температур (от -196 до $+400^\circ\text{C}$) определил широту применения сплава ВТ23. Сплав ВТ23 успешно работает в космосе при -130°C , а также в сосудах высокого давления при -196°C .

Сплав был применен в конструкции космических аппаратов, длительно работающих при температуре до 400°C и кратковременно – при температуре $500\text{--}600^\circ\text{C}$. Он мог бы быть рассмотрен для изготовления лопаток и других деталей вентилятора двигателя, особенно при создании пустотелых и композиционных лопаток.

Важнейшим достижением безусловно следует считать создание из сплава ВТ23 гетерогенной брони для бронезилетов, спасшей жизнь тысячам наших военнослужащих в горячих точках планеты.

Разработан сплав ВТ23М с более узким пределом легирования (в диапазоне легирования сплава ВТ23), который должен обладать еще большей, чем сплав ВТ23, стабильностью механических свойств.

При создании маневренных самолетов нового поколения возникла необходимость значительного повышения весовой эффективности используемых материалов. Было предложено вместо листов сплава ОТ4-1 ($\sigma_B=590$ МПа, $\sigma_{B,св}=530$ МПа), применяемого для изготовления обшивки и люков Су-27, использовать листы сплава ВТ23М ($\sigma_B=1100$ МПа, $\sigma_{B,св}=990$ МПа). Разработанная продольно-поперечной прокатки обеспечила получение базисной текстуры у листов сплава ВТ23М, что в свою очередь повысило их технологическую пластичность при штамповке. Уровень прочности основного металла и сварных соединений листов сплава ВТ23М (по сравнению со сплавом ОТ4-1) повышен на 80% (рис. 3).

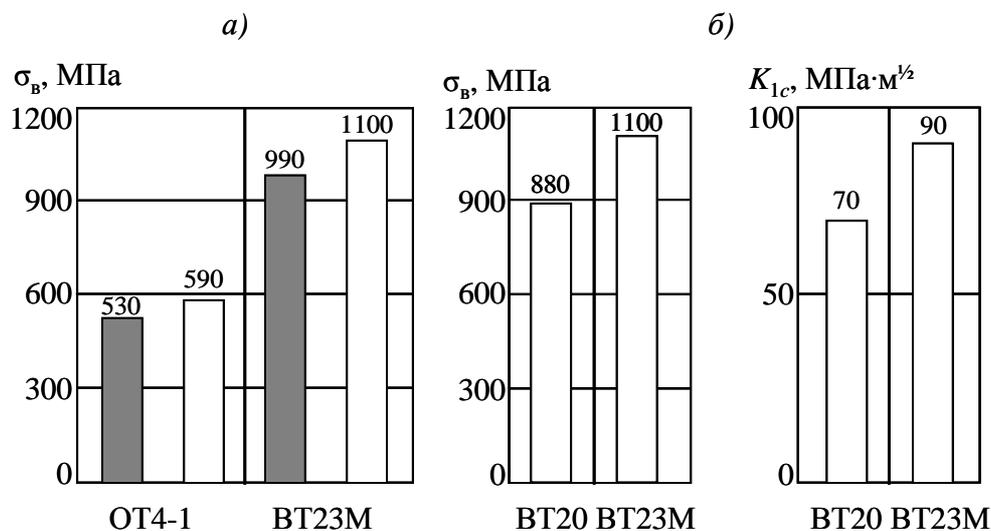


Рис. 3. Сравнение механических свойств (предела прочности σ_B основного металла (□) и сварного соединения (■) и вязкости разрушения K_{1c} сплава ВТ23М и сплавов ОТ4-1 и ВТ20:

а – листы; *б* – плиты, штамповки, поковки

Вместо поковок, плит и штамповок из сплава ВТ20 ($\sigma_B \geq 880$ МПа, $K_{1c} \geq 70$ МПа·м^{1/2}), применяемого в маневренных самолетах (Су-27), был предложен также сплав ВТ23М ($\sigma_B \geq 1100$ МПа, $K_{1c} \geq 90$ МПа·м^{1/2}) с уровнем прочности на 25% более высоким при большем (на 30%) значении характеристики трещиностойкости K_{1c} (см. рис. 3).

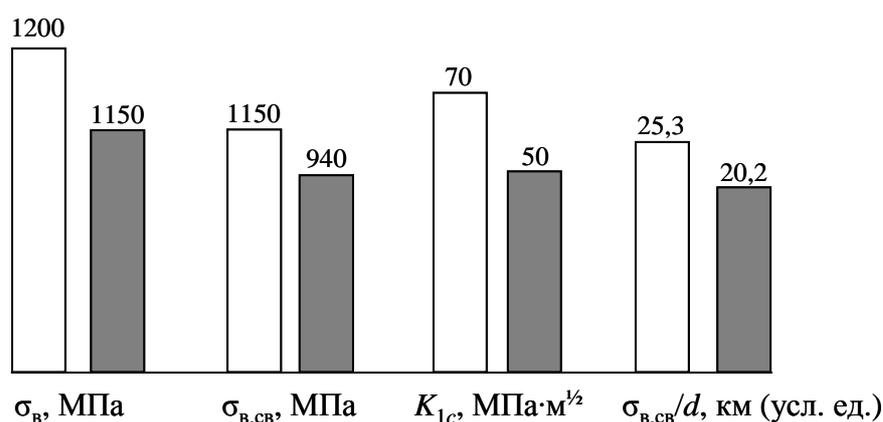
Сплавы ВТ23 и ВТ23М внесены в чертежно-конструкторскую документацию как основные сплавы для изготовления перспективного маневренного самолета, при этом масса всех конструкций из этих сплавов будет составлять более 20%. Эти сплавы рекомендованы также для применения в ближне-среднемагистральном самолете (БСМС).

Разработан новый комплексно-легированный ($\alpha+\beta$)-титановый сплав ВТ43 – на основе предложенной теории комплексного легирования.

Сплав ВТ43 содержит легирующие элементы с коэффициентом распределения при дендритной ликвации >1 и <1 . Суммарное количество β -стабилизаторов в осях и межосных объемах постоянно, что обеспечивает однородное упрочнение. Прочность и микротвердость α - и β -твердых растворов также близки, что является важным фактором комплексного легирования.

Благодаря комплексному легированию ($\alpha+\beta$)-сплава с включением в его состав дополнительных легирующих элементов, повышающих прочность и жаропрочность, достигнуты служебные характеристики, превосходящие свойства всех лучших зарубежных и отечественных аналогов (рис. 4). Сварные соединения при $\sigma_{в.св} \geq 1150$ МПа ($\sigma_{в.св}/\sigma_{в} = 0,95$) имеют высокие значения характеристик трещиностойкости: $K_{1c} \geq 70$ МПа·м^{1/2}.

По сравнению со сплавом Ti-10-2-3 (США: $\sigma_{в.св} = 940$ МПа; $\sigma_{в.св}/\sigma_{в} = 0,82$; $K_{1c} = 50$ МПа·м^{1/2}) аналогичного применения сплав ВТ43 обладает на 22% большей прочностью сварных соединений, большей (на 40%) трещиностойкостью (K_{1c}) и большей удельной прочностью сварных соединений на 25% (см. рис. 4).



Квоты превосходства, %, сплава ВТ43 по сравнению со сплавом Ti-10-2-3 (США) по уровню свойств		
$\sigma_{в.св}$ (МПа)	K_{1c} (МПа·м ^{1/2})	$\sigma_{в.св}/d$ (км)
22	40	25

Рис. 4. Сравнение механических свойств ($\alpha+\beta$)-сплава ВТ43 (□; $d=4540$ кг/м³) и сплава Ti-10-2-3 (США; ■; $d=4650$ кг/м³)

Плотность сплава ВТ43 ($d=4540$ кг/м³) значительно ниже, чем у сплава Ti-10-2-3 ($d=4650$ кг/м³), что очень важно для достижения более высокой удельной прочности и большей весовой эффективности конструкции.

Производство и переработка сплава ВТ43 (по сравнению со сплавом Ti-10-2-3 (США)) отличается (рис. 5):

– меньшей на 20–30% стоимостью за счет меньшего (в 2,5 раза) содержания дорогостоящего и дефицитного ванадия и меньшего брака благодаря большей структурной однородности, обусловленной большей химической однородностью и меньшей дисперсией температуры полиморфного превращения;

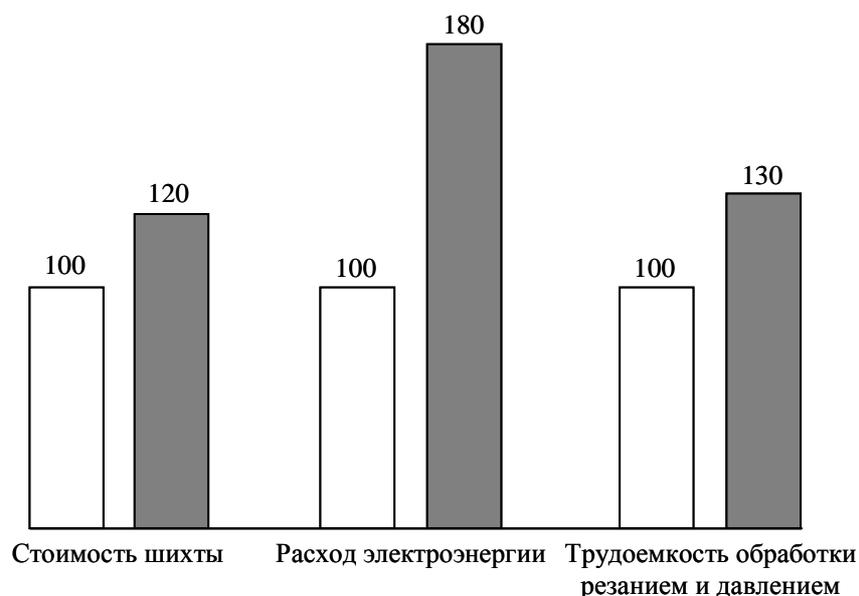


Рис. 5. Сравнение технологических параметров нового $(\alpha+\beta)$ -сплава VT43 (□) и β -сплава Ti-10-2-3 (■)

- меньшей на 30% трудоемкостью обработки сплава давлением, так как имеет высокую температуру полиморфного превращения $T_{п.п}=920^{\circ}\text{C}$ (на 130°C выше, чем у сплава Ti-10-2-3), что уменьшает сопротивление деформации, особенно при деформации в $(\alpha+\beta)$ -области;

- меньшим на 40% расходом электроэнергии при упрочняющей термообработке вследствие меньшей стабильности β -фазы и за счет возможности исключить высокотемпературный нагрев под закалку при проведении ВТМО, рекомендуемой для сплава VT43;

- образованием при охлаждении в воде или на воздухе пластичной α'' -фазы, – поэтому полуфабрикат из сплава VT43 в состоянии поставки обладает высоким комплексом свойств (в сплаве Ti-10-2-3 образуется хрупкая ω -фаза).

Сплав VT43 может быть применен:

- в отожженном состоянии ($\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ МПа);
- после обработки по схеме ВТМО (горячедеформированное состояние + старение) в сечении до 150 мм ($\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ МПа);
- в закаленном на воздухе или в воде (после черновой механической обработки) состоянии с последующим старением ($\sigma_{\text{в}}$ составляет ≥ 1200 МПа и ≥ 1300 МПа соответственно);
- в малых сечениях для кратковременного ресурса эксплуатации при закалке в воде и низкотемпературном старении, обеспечивающем многофазное упрочнение ($\sigma_{\text{в}} \geq 1500$ МПа);
- сплав может быть упрочнен до уровня прочности $\sigma_{\text{в}} \geq 2100$ МПа.

Сплав VT43 рекомендуется для изготовления гидроаккумуляторов и силовых конструкций самолетов, космических аппаратов и ракет, введен в чертежно-конструкторскую документацию БСМС.

Конструкционные титановые β -сплавы

К β -сплавам относятся сплавы, фиксирующие при контроле микроструктуры 100% β -фазы (ω -фаза в микроструктуре не обнаруживается) при закалке в воде из β -области. Это сплавы, легированные β -стабилизирующими элементами в количестве больше критического ($C_{\text{кр}}$). Этот класс сплавов можно разделить по фазовому составу при закалке из β -области на $(\beta+\omega)$ - и β -сплавы.

На первом этапе работы были созданы β -титановые сплавы, содержащие β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 25% содержания молибдена (BT15, BT15-1, TC6). С использованием β -сплавов (BT15 и TC6) удалось создать ряд уникальных цилиндрических конструкций с применением поперечной прокатки, которые успешно прошли испытания в изделиях ракетной техники.

На втором этапе работ по β -сплавам в ВИАМ было проделано огромное количество системных исследований по макро- и микролегированию (исследованы основной материал и сварные соединения более 300 β -сплавов), термической и термомеханической обработке. Однако реализовать достойное применение в конструкциях этот безусловно интересный класс материалов не удалось. Были предложены и сформулированы направления улучшения механических свойств β -сплавов, которые должны были определить выбор оптимального β -сплава, более успешного в применении.

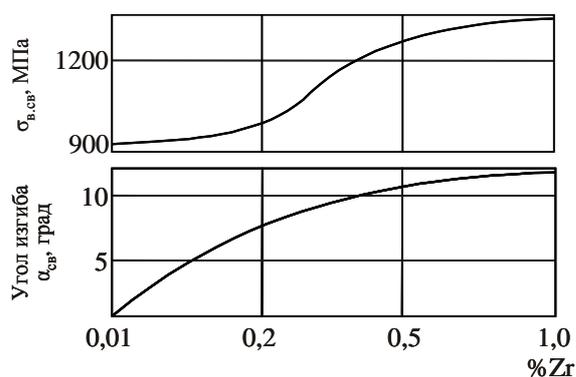


Рис. 6. Влияние легирования цирконием на предел прочности и угол изгиба (при $r=t$) сварного соединения сплава BT19

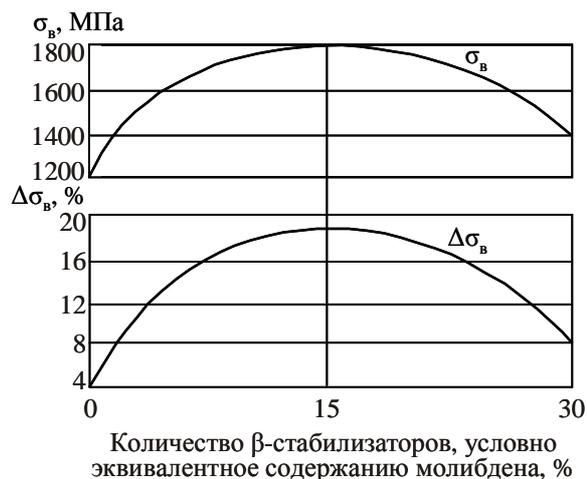


Рис. 7. Влияние легирования на предел прочности титановых сплавов после НТМО и эффективность повышения прочности ($\Delta\sigma_{\text{в}}$) при НТМО по сравнению с упрочняющей термической обработкой (УТО)

Уровень механических свойств, технологичность и стоимость зависят от следующих факторов:

- эффекта комплексного легирования, – установлено, что увеличение легирования β -сплавов от одного до двух и четырех β -стабилизаторов обеспечило повышение прочности с 1150 до 1250 и 1400 МПа соответственно, при сохранении достаточной пластичности ($\delta=7-8\%$);

- эффекта микролегирования, который, как было установлено, проявляется при введении циркония, гафния и РЗМ (оптимальный результат достигается при введении 1% Zr – рис. 6);

- эффекта низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО), – исследование различных систем сплавов показало, что максимальная прочность и максимальный эффект $\Delta\sigma_{\text{в}}=[(\sigma_{\text{в(НТМО)}}-\sigma_{\text{в(УТО)}})/\sigma_{\text{в(УТО)}}]\cdot 100\%$ (УТО – упрочняющая термообработка), полученный от НТМО, достигнуты для β -сплавов, содержащих β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном содержанию 15% молибдена (рис. 7);

- эффекта отсутствия хрупкой ω -фазы, – фазовый анализ показал, что при содержании β -стабилизаторов больше количества, эквивалентного содержанию 15% молибдена, хрупкая ω -фаза, которая доставляет много неприятностей, связанных с резкой потерей

пластичности и вязкости при термических и других циклах производства полуфабрикатов и конструкций, отсутствует (см. рис.1, а);

– эффекта пластификации (отсутствие распада метастабильной β -фазы) при медленном охлаждении в вакуумных печах при производстве полуфабрикатов и конструкций (сплавы, содержащие β -стабилизаторы в количестве большем, чем эквивалент содержания 15% молибдена);

– сплав должен быть менее легированным, менее энергоемким и значительно дешевле, чем сплав ВТ15.

В результате исследования основного материала и сварных соединений установлено, что максимальный совокупный эффект улучшения механических свойств установлен для β -сплава ВТ19, содержащего β -стабилизирующие элементы в количестве,

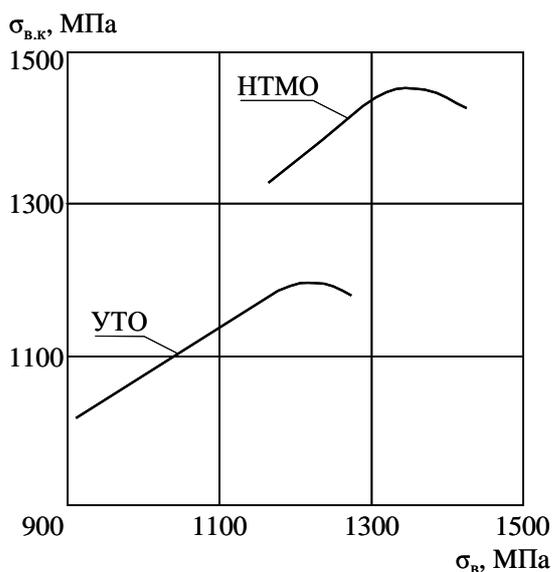


Рис. 8. Зависимость конструкционной прочности ($\sigma_{в,к}$) цилиндрических емкостей из сплава ВТ19 от предела прочности при осевом растяжении $\sigma_{в}$ после обработки по режимам НТМО и УТО

эквивалентном содержанию 15–16% молибдена, и 1% циркония [1–2]. Исследовали влияние различных режимов упрочняющей термической обработки (УТО) и низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) на механические свойства образцов при осевом растяжении ($\sigma_{в}$) и двухосном растяжении ($\sigma_{в,к}$) цилиндрических емкостей, подвергнутых испытанию на внутреннее давление до разрушения. Сплав ВТ19 показал наибольшее упрочнение при НТМО, о чем свидетельствуют результаты испытания цилиндрических емкостей ($\sigma_{в,к}=1450$ МПа) (рис. 8).

Для дальнейшего улучшения механических свойств было предложено вместо закалки из β -области, проводить закалку из $(\alpha+\beta)$ -области с температуры $T_{пл}-20^{\circ}\text{C}$. Наличие первичной α -фазы обеспечивает более однородный распад при старении, а присутствие более стабильной β -фазы дает дополнительные гарантии предотвращения образования хрупкой ω -фазы. Из β -сплава ВТ19 были изготовлены: цилиндрические тонкостенные емкости – путем холодной поперечной прокатки кольцевых заготовок; тарельчатые пружины – путем холодной штамповки из листов. Сплавы с β -структурой рекомендуются для применения в конструкциях, где холодная деформируемость играет решающее значение. Анализ титановых β -сплавов дает основание считать, что комплексно-легированный сплав ВТ19 является оптимальным среди других β -сплавов (например, по сравнению с Ti-10-2-3, США) как по механическим, так и по экономическим характеристикам.

Содержание в сплаве Ti-10-2-3 большого количества железа (2%) железа приводит к неоднородному распределению его в литой структуре металла шва: 1,4–1,6% – в осях дендритов и 2,4–2,6% – в межосных объемах. Значительно бóльшая химическая неоднородность легирующих элементов, особенно железа, наблюдается в слитках. Это приводит в свою очередь к различной температуре полиморфного превращения разных зон, неоднородному их упрочнению и большой неоднородности механических свойств сплава Ti-10-2-3 и более низкому их уровню, чем у сплава ВТ19.

Следует отметить, что легирование железом β -сплавов, даже в небольшом количестве (до 0,5%), приводит к тому, что в приграничных зонах концентрация его может

быть в 3–4 раза больше, чем средняя концентрация, что приводит к резкому снижению эксплуатационных свойств, особенно сварных соединений.

Сплав VST5553 (β -сплав, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном содержанию 14,7% Mo), легированный 1% Zr, как и сплав VT19 (содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном содержанию 15,5% Mo, и 1% Zr), имеет преимущество перед сплавом Ti-10-2-3 (США).

Композиционные материалы на основе титана

Созданы теоретические и практические основы разработки перспективных композиционных материалов (КМ) на основе титановых сплавов: осуществлен всесторонний подход к рассматриваемой проблеме, включающий создание конструктивных титановых сплавов, разработку технологии производства полуфабрикатов и конструкций КМ, создание процессов изготовления КМ [9].

Разработана многослойная композиция, состоящая из 4 слоев сплава VT23 и 5 слоев сплава OT4, обладающая большей конструкционной прочностью ($\sigma_{в.к}$), большим увеличением прочности при двухосном растяжении по сравнению с осевым ($\sigma_{в.к}/\sigma_{в}$), меньшей чувствительностью к надрезу, о чем свидетельствуют высокие значения характеристик $\sigma_{в.к}^H$, $\sigma_{в.к}^H/\sigma_{в.к}$ а также большими значениями характеристик трещиностойкости (КСТ) и ударной вязкости (КСУ), чем монолитный сплав VT23 (табл. 2).

Исследованы композиционные материалы с внутренним армированием, состоящие из слоев фольги толщиной 0,08 мм разработанных сплавов VT23, VT16, VT6С и VT1-0 и слоев волокон SiC и B+SiC. Следует отметить, что фольга из сплава VT23 ($\sigma_{в}=1100$ МПа) является в настоящее время самой прочной в мире фольгой. Максимальный уровень жаропрочности получен для разработанного композиционного материала, состоящего из фольги сплава VT23 (80%) и волокон SiC (20%): $\sigma_{в}^{20^\circ}=980$ МПа, $\sigma_{в}^{500^\circ}=720$ МПа, модуль упругости $E=185$ ГПа, плотность $d=4100$ кг/м³. Разработан композиционный материал, состоящий из фольги сплава VT23 (80%) и волокон B+SiC (20%), который имеет следующие характеристики: $\sigma_{в}^{20^\circ}=990$ МПа, $\sigma_{в}^{500^\circ}=610$ МПа, $E=195$ ГПа, $d=3600$ кг/м³.

Таблица 2

Механические свойства монолитного (VT23) и многослойного композиционного (VT23+OT4) материалов

Материал	Вид термообработки	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{в.к}/\sigma_{в}$	$\sigma_{в.к}^H$, МПа	$\sigma_{в.к}^H/\sigma_{в.к}$	КСТ		КСУ	
						МДж/м ²			
Сплав VT23 – монолитный лист (1,8 мм)	Отжиг	1250	1,14	1114	0,88	0,22	0,37		
	Закалка + старение	1375	1,1	1017	0,74	0,18	0,23		
VT23 (0,34 мм × 4 слоя) + OT4 (0,1 мм × 5 слоев)	Отжиг	1290	1,27	1219	0,94	0,32	0,47		
	Закалка + старение	1570	1,21	1360	0,87	0,27	0,38		

Разработан композиционный материал (конструкция) с внешним армированием, состоящий из термически упрочненной цилиндрической емкости сплава VT23 ($\sigma_{в.к}=1400$ МПа), оплетенной различным типом волокон. Максимальный уровень конструкционной прочности получен для композиционной конструкции цилиндрической

емкости из сплава ВТ23, внешне армированной пластиком ВНИВЛОН. Такая композиционная конструкция показала рекордно высокую конструкционную прочность $\sigma_{в.к}=2160-2250$ МПа и удельную прочность $\sigma_{в.к}/d=48-50$ км.

Многостадийная обработка конструкционных титановых сплавов давлением

Для сплавов ВТ23, ВТ23М, ВТ43, ВТ6ч. и др. предложена многостадийная температурно-деформационная обработка давлением, включающая:

- две стадии нагрева в β -области и последующие всесторонние деформации с изменением направления деформирования, что обеспечивает заваривание различно ориентированных дефектов в виде пор и несплошностей, усреднение химического состава и уменьшение величины β -зерна;

- две фазовые перекристаллизации, заключающиеся в горячей деформации при температуре $(\alpha+\beta)$ -области с последующей деформацией при температуре β -области, что обеспечивает получение однородной мелкозернистой β -структуры;

- регламентированную деформацию в $(\alpha+\beta)$ -области без последующих нагревов, что обеспечивает сохранение эффекта ВТМО, улучшение состояния границ зерен и внутризеренной структуры.

Сплавы ВТ23, ВТ23М, ВТ43 и ВТ6ч. и др., обработанные давлением по данной технологии, имеют высокий уровень прочности и трещиностойкости при высокой стабильности механических свойств. По результатам исследований разработаны инструкции по производству и применению титановых сплавов ВТ23, ВТ23М (ПИ.1.2.107–2006) и ВТ43 (ПИ.1.2.744–2006) [13, 14]. Следует особенно отметить, что при нагреве перед правкой в области температур, близких к температуре полиморфного превращения, происходит огрубление структуры и исключается положительный эффект ВТМО. Это приводит к резкому снижению эксплуатационных характеристик, особенно тех, которые достигаются только при проведении ВТМО. Деформация слитка в одном направлении (без всесторонних ковок) приводит к большой химической и структурно-фазовой неоднородности, а также неоднородности механических свойств по длине полуфабриката при их значительной анизотропии. В этом случае механические свойства образцов, взятых из одной зоны, не будут характеризовать механические свойства всего полуфабриката, а будут характеризовать лишь свойства материала в данной зоне.

Если эффект улучшения структуры и механических свойств при первой всесторонней ковке и первой фазовой перекристаллизации принять за 100%, то при последующих второй (повторной), третьей и четвертой стадиях проведения данного процесса эффект улучшения будет ориентировочно составлять 80, 60 и 40% соответственно.

Следует отметить, что исключение одной операции всесторонней ковки и одной операции фазовой перекристаллизации может уменьшить стоимость полуфабриката на 5% и стоимость детали на 0,5–1%, но при этом ресурс работы конструкций снизится в два и более раза, а возможно это приведет и к преждевременному разрушению. Поэтому следует воздержаться от шагов по снижению трудоемкости изготовления полуфабрикатов путем исключения отдельных стадий обработки сплавов давлением.

Разработчиками могут быть предложены рекомендации, направленные на дальнейшее повышение однородности химического состава, улучшение структурно-фазового состояния и повышение механических свойств титановых сплавов в процессе обработки их давлением, а также на снижение энергоемкости процессов изготовления полуфабрикатов и их термической и термомеханической обработок.

Применение титановых сплавов в авиационной, космической и ракетной технике

Разработанные на основе теории легирования титановые сплавы, получаемые с использованием термической и термомеханической обработок, а также текстурного упрочнения, успешно реализованы при создании более 70 конструкций летательных аппаратов. На рис. 9 и 10 приведены примеры наиболее эффективного применения конструкционных титановых сплавов в авиакосмической и ракетной технике [5–7].

Конструкционный комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 широко применен при создании ракетно-космического комплекса «Энергия–Буран» (см. рис. 9, а). Общая масса деталей, изготовленных из сплава ВТ23 после ВТМО, 6 т – в «Буране» и 14 т – в «Энергии»: сотовые панели (из фольги), обшивка (из листов), шпангоуты, балки, лонжероны и стыковочные узлы из плит поковок и штамповок [6].

В космическом корабле «Астрон» применен сплав ВТ23 для изготовления шаровых баллонов путем сверхпластической деформации (СПД), сварки и термического упрочнения. Шаровые баллоны обладают высокой конструкционной прочностью $\sigma_{в.к} \geq 1250$ МПа (см. рис. 9, б) [8]. Следует отметить, что такого типа баллоны могут быть применены также с внешним армированием.

В сверхзвуковом пассажирском самолете Ту-144 широко применен сплав ВТ6ч. при изготовлении монолитных и сварных конструкций. Общая масса деталей, изготовленных из конструкционных титановых сплавов, составляет 7,5 т. Из титановых сплавов изготовлены балки, кронштейны, перегородки и другие детали (см. рис. 9, в).

В маневренном самолете Су-27 монолитные и сварные силовые конструкции изготовлены из сплава ВТ20. Для изготовления люков и обшивки применен сплав ОТ4-1. Ракеты специального назначения сделаны из сплава ВТ14 в термически упрочненном состоянии, при этом масса узлов ракет, выполненных из сплава ВТ14, составляет 90% от общей массы (см. рис. 9, г).

В гидросамолете Бе-200 эффективно используется ряд титановых сплавов (ВТ22, ОТ4, ОТ4-1), в том числе и сплав ВТ23 в сварных конструкциях (см. рис. 9, д) – детали шасси, гидроаккумуляторы и трубопроводы.

Успешно применен с высокой весовой эффективностью сплав ВТ23 для изготовления шасси спортивного самолета Су-29 (см. рис. 9, е), а также шасси самолетов Су-26, Су-31, Су-31М, Су-31СК, Як-54 и Як-55. Из сплава ВТ23 с применением высокоскоростной закалки и старения изготовлены шасси рессорного типа с $\sigma_{в} \geq 1250$ МПа. Из сплава ВТ23 также изготовлены хвостовые шасси и закладные элементы для композиционных конструкций.

Конструкционные титановые сплавы, технологические процессы производства полуфабрикатов и технологии применения успешно реализованы при создании космической техники.

Титановые сплавы ВТ14 и ВТ6С в термически упрочненном состоянии применены при создании космического аппарата «Луна» (см. рис. 10, а) и спускаемого аппарата «Луна» (см. рис. 10, б), что обеспечило снижение массы на 40 кг.

При создании космических аппаратов «Марс» (см. рис. 10, в) и спускаемого аппарата «Марс» (см. рис. 10, г) применены сплавы ВТ14, ВТ16, ВТ6С, высокотемпературная термомеханическая обработка, местный отжиг сварных соединений, находящиеся в утолщенных зонах. Применение сплавов обеспечило снижение массы космического аппарата на 300 кг.

Для изготовления космического аппарата «Венера» (см. рис. 10, д) и спускаемого аппарата «Венера» (см. рис. 10, е) были применены сплавы ВТ14 и ВТ6С и присадочная проволока для сварки ВТ2св, а также различные методы упрочняющей терми-

ческой и термомеханической обработки; обеспечено снижение массы космического аппарата на 250 кг. Следует особо отметить, что в спускаемом аппарате «Венера» масса титановых конструкций составляет 96%, что является максимальным использованием титановых сплавов в конструкциях.



Рис. 9. Применение титановых сплавов и технологических процессов в авиакосмической и ракетной технике:

а – ракетно-космический комплекс «Энергия–Буран»; *б* – космический корабль «Астрон»; *в* – сверхзвуковой пассажирский самолет Ту-144; *г* – самолет Су-27; *д* – гидросамолет Бе-200; *е* – спортивный самолет Су-29

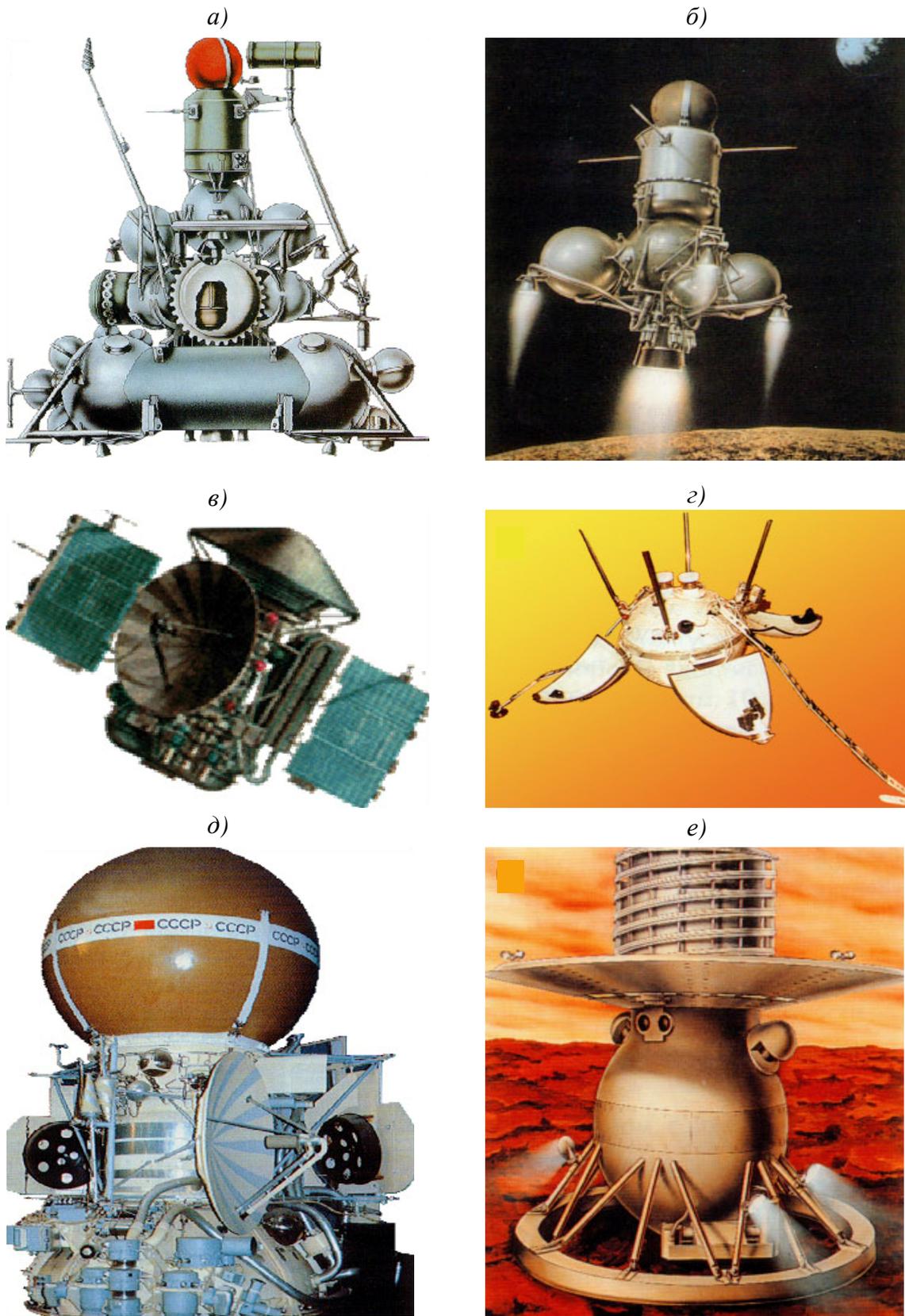


Рис. 10. Применение титановых сплавов и технологических процессов в космической технике:

а, б – космический аппарат «Луна» и спускаемый аппарат «Луна»; *в, г* – космический аппарат «Марс» и спускаемый аппарат «Марс»; *д, е* – космический аппарат «Венера» и спускаемый аппарат «Венера»

Специального применения сплавы BT5-1 и BT5-1кт с α -структурой рекомендованы для работы при температуре -253°C . Предел прочности этих сплавов 750 МПа, и перспектива повышения прочности α -сплавов такого типа путем легирования незначительна. Предложена технология создания в этом сплаве текстурного упрочнения, которая позволила повысить прочность при двухосном растяжении сплава на 40% (до 1150 МПа). Это важнейшее научное и практическое решение позволило: повысить коэффициент запаса прочности или снизить массу шаровых баллонов, работающих под внутренним давлением газа (материал баллона работает в условиях двухосного растяжения).

К 55-летию лаборатории титановых сплавов представлена работа (научный руководитель А.И. Хорев), выполненная за последние три года [12–14]. Отличительной особенностью этой работы является то, что новые сплавы и созданные технологические процессы сразу были введены в чертежно-конструкторскую документацию на изготовление новых изделий: из сплава BT23M будет изготовлено до 20% конструкций изделия Т-50; из сплавов BT43 и BT23M – до 15% конструкций самолета БСМС; из сплава BT38 – вся обшивка изделия «Байкал» (предприятия ГКНПЦ им М.В. Хруничева). Научно-исследовательская работа, завершившаяся разработкой паспорта на новый высокопрочный титановый сплав BT43 и созданием семи технологических процессов, удостоена 2-го места при подведении в ВИАМ итогов конкурса за 2006 г. [7–14].

Предыдущий этап работы по конструкционным титановым сплавам был отмечен премией Правительства Российской Федерации за 2003 г. (руководитель работы – профессор, доктор технических наук А.И. Хорев) – за 55 лет работы лаборатории титановых сплавов ВИАМ разработки этой лаборатории впервые удостоены такой высокой награды.

Заключение

Направление создания новых титановых сплавов путем применения комплексного макро- и микролегирования в настоящее время является доминирующим, так как оно обеспечивает получение высоких эксплуатационных свойств основного материала и сварных соединений в конструкциях в широком диапазоне температур от -253 до $+600^{\circ}\text{C}$. Сочетанием комплексного макролегирования с микролегированием основного материала и присадочной проволоки для сварки можно достичь значительного эффекта при создании сплавов и сварных конструкций из них. Исследования различных систем сплавов в широком диапазоне легирования: по пластической деформации, термической и термомеханической обработке, текстурному упрочнению, технологии штамповки, в том числе и в условиях сверхпластичности, открыли перспективу более рационального использования титановых сплавов в конструкциях. Эффект улучшения механических свойств обусловлен уменьшением размеров первичных β -зерен, улучшением состояния границ, существенным измельчением внутризеренной структуры, дисперсным равномерным распадом при старении, изменением характера распределения примесей и легирующих элементов, повышением плотности дислокации и уменьшением областей когерентного рассеивания. Наиболее эффективны способы упрочнения, при которых дисперсное упрочнение превалирует над упрочнением фазовым наклепом. Для получения конструкционных титановых сплавов высокой удельной прочности при комнатных и повышенных температурах необходимо сочетание металлургических и технологических факторов воздействия на структуру, специального для титановых сплавов конструирования и технологии изготовления изделий. Всесторонний подход может обеспечить более успешное и более широкое применение титановых сплавов в современных конструкциях авиакосмической и ракетной техники.

Успешно ведутся работы по специальным титановым сплавам: для криогенной техники, негорючим и особо высокой коррозионной стойкости. Созданные титановые сплавы BT5-1, BT5-1кт, BT6, BT23, BT23M могут успешно использоваться в узлах и деталях, работающих при криогенных температурах.

Созданы теоретические основы комплексного легирования, термической и термомеханической обработок, а также текстурного упрочнения титановых сплавов [1–14]. Это позволило разработать перспективные конструкционные титановые сплавы, прогрессивные процессы термической и термомеханической обработки, что обеспечило эффективное применение титановых сплавов в космонавтике, авиации и ракетной технике. В процессе научной и практической работы по проблеме «Конструкционные и специальные титановые сплавы» автором статьи решены следующие задачи и разработаны [7–14]:

- теория комплексного легирования титановых сплавов;
- серия комплексно легированных высокопрочных свариваемых титановых сплавов универсального применения;
- теория легирования присадочных материалов для сварки титановых сплавов;
- серия присадочных материалов, обеспечивших высокую прочность сварных соединений;
- основы термической обработки конструкционных титановых сплавов и созданы новые процессы упрочняющей термической обработки с использованием высокоскоростной и градиентной закалок;
- теория термомеханической обработки титановых сплавов и созданы различные технологические схемы и способы осуществления ТМО;
- процессы низкотемпературной и высокотемпературной термомеханических обработок, обеспечившие повышение конструкционной прочности и трещиностойкости на 20–30%;
- теория текстурного упрочнения титановых сплавов;
- новые процессы изготовления полуфабрикатов, обеспечивающие заданную кристаллографическую текстуру и повышение прочности при двухосном растяжении на 20–40%;
- перспективные направления создания композиционных материалов на основе титана и достигнута удельная прочность $\sigma_{в.к}/d=48–50$ км;
- теория создания слоистых композиционных материалов на основе титана и достигнута ее практическая реализация при изготовлении малочувствительных к поверхностным дефектам материалов;
- создание заданной кристаллографической текстуры, субструктуры, макро- и микроструктуры, обеспечили заданный уровень механических свойств и эксплуатационных характеристик сплавов BT23 ($\sigma_{в} \geq 1100$ МПа), BT23M ($\sigma_{в} \geq 1150$ МПа) и BT43 ($\sigma_{в} \geq 1250$ МПа), а также сплавов BT5-1, BT6, BT14, BT15, BT19, BT18У, BT38 и др.;
- определены служебные характеристики конструкционных титановых сплавов BT23, BT23M, BT43, BT19, BT19-1, BT49, BT18У(Л), BT38 и др.;
- созданы технологические процессы производства монолитных и сварных конструкций из сплавов BT23, BT23M, BT43, BT19, BT19-1, BT49, BT18У(Л), BT38 и др.;
- представлены примеры эффективного применения созданных сплавов и процессов в самолетах, космических аппаратах и ракетах (достигнуто снижение массы конструкций на 20–30%, повышен их ресурс в 3–5 раз и эксплуатационная надежность на 25–35%, а также снижена стоимость конструкций на 15–20%).

По рассмотренной в статье проблеме автором разработано 24 промышленных и 6 опытно-промышленных титановых сплавов, 7 композиционных материалов на основе титана и создано 230 технологических процессов; опубликованы 4 монографии, более 200 статей, получены 330 патентов и авторских свидетельств на изобретения, более 200 из которых применено в промышленности, 74 вошло в состав лицензий, проданных за рубеж.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов.– М.: Машиностроение, 1979, 228 с.
2. Хорев А.И. Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов.– М.: Воениздат, 1979, 256 с.
3. Хорев А.И. Опыт применения титановых сплавов в народном хозяйстве.– М.: ЦНИИТЭМС, 1977, 37 с.
4. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. и др. Металловедение титана и его сплавов. – М.: Metallurgy, 1992, 352 с.
5. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспективы их развития //В сб.: Авиационные материалы и технологии, 2002, с. 11–32.
6. Хорев А.И. Титан – это авиация больших скоростей и космонавтика //Технология легких сплавов, 2002, №4, с. 92–97.
7. Хорев А.И. Механические свойства сварных соединений ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов //Цветные металлы, 2006, №1, с. 77–83.
8. Хорев А.И. Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами //Титан, 2006, №1(18), с. 47–52.
9. Хорев А.И. Перспективные направления создания композиционных материалов на основе титана //Труды Международной конференции «Ti-2006», Ассоциация «Титан», 2006, с. 328–335.
10. Хорев М.А. Структурно-фазовое состояние и надежность сварных соединений титановых сплавов.– М.: ВИАМ, 1991, 107 с.
11. Хорев А.И. Разработка титановых сплавов методом комплексного легирования //ФХММ, 2006, т. 42, №5, с. 45–50.
12. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава ВТ23 универсального применения //Вестник машиностроения, 2006, № 9, с. 40–46.
13. Хорев А.И. Теория и практика разработки конструкционных слоистых материалов из титановых сплавов //Труды Международной конференции «Ti-2006», Ассоциация «Титан», 2006, с. 336–341.
14. Хорев А.И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов //Технология машиностроения, 2007, №2, с. 29–34.

*С.В. Скворцова**

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Полуфабрикаты из титановых сплавов, особенно листовые, характеризуются анизотропией физико-механических свойств, которые в значительной степени определяются кристаллографической текстурой α -фазы.

Текстура полуфабрикатов или изделий может формироваться в процессе холодной, теплой или горячей деформации, в ходе протекания процессов рекристаллизации или фазовых превращений и оказывать существенное влияние на технологические и эксплуатационные свойства.

* РГУ МАТИ им. К.Э. Циолковского.