

УДК 669.055:669.295

А.И. Хорев

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ
ПО ТИТАНОВЫМ СПЛАВАМ ДЛЯ «БУРАНА»
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ**

Проведен комплекс фундаментальных и прикладных работ, направленных на создание титановых сплавов, технологий их производства и технологий изготовления деталей авиационной, ракетной и космической техники на машиностроительных заводах. Разработаны теории: комплексного легирования; микролегирования; термической и термомеханической обработок; текстурного упрочнения; создания композиционных материалов с внешним и внутренним армированием высокопрочными нитями; создания многослойных и плакированных композиционных материалов.

Ключевые слова: титановые сплавы, комплексное легирование, микролегирование, термомеханическая обработка, текстурное упрочнение.

A complex of fundamental and applied research projects aimed at development of titanium alloys as well as their process engineering and technologies for production of aviation-, rocket- and space-purposed components by engineering plants was implemented. Theories of complex alloying, microalloying, thermal and thermomechanical treatments, textural strengthening, design of composite materials with outer and inside reinforcement with high-strength fibers, multilayered and clad composite materials were created.

Key words: titanium alloys, complex alloying, microalloying, thermomechanical treatment, textural strengthening.

Титан справедливо называют металлом космической эры. Важнейшим этапом эффективного освоения титановых сплавов явилось их применение в конструкции универсальной ракетно-космической системы «Энергия» и орбитального корабля многоразового использования «Буран» (рис. 1).



Рис. 1. Ракетно-космический комплекс «Энергия–Буран»

Титановые сплавы являются символом современности создаваемых конструкций. По уровню прочности и надежности титановых сплавов, а также объему их применения в значительной мере судят об эффективности и весовом совершенстве летательных аппаратов. В работе над материалами для «Бурана» были решены важнейшие принципиальные задачи, в частности достигнута высокая прочность применяемых сплавов, что дало возможность сократить массу металлической конструкции комплекса «Энергия–Буран» на 20–30%.

Применению титановых сплавов в этих конструкциях предшествовал комплекс исследований по разработке сплавов и технологии деформационной и термической обработки [1–3].

Ученые ВИАМ (совместно с ВИЛС и ВСМПО) на протяжении 50 лет вели конкурентную борьбу (с разработчиками США, Англии, Германии, Японии и других стран) и не только добились паритета качества разработок, но и обеспечили большие преимущества ряда отечественных титановых сплавов над зарубежными. Особенно четко эти преимущества проявились при создании высокопрочных конструкционных сплавов. Одним из наиболее ярких представителей этого класса сплавов является сплав ВТ23, разработанный автором статьи специально для эффективного применения в «Буране».

Создание высокопрочных конструкционных сплавов стало возможным благодаря глубоким теоретическим исследованиям, проведенным под руководством автора статьи в ВИАМ, в результате которых были созданы теоретические основы [1–3]:

– комплексного легирования титановых сплавов, обеспечивающего получение высокого и однородного твердорастворного упрочнения;

– микролегирования, которое изменяет морфологию структуры на всех стадиях ее формирования;

– многофакторного (твердорастворного, дисперсионного, интерметаллидного) механизма упрочнения;

– термической обработки одно-, двух- и трехстадийной, формирующей требуемый фазовый состав, размер и форму фазовых составляющих;

– многофазного упрочнения различными фазами, в том числе и переменного химического состава;

– текстурного упрочнения и формирования требуемого улучшенного комплекса механических свойств в заданном направлении;

– формирования конструкций, исключающих образование «пиков» напряжений от концентраторов и дефектов поверхности и обеспечивающих максимальную реализацию потенциала используемого сплава.

При создании ракетно-космической системы был выполнен большой комплекс научно-практических работ, таких как:

– разработка титановых сплавов ВТ23Л (для листов), ВТ23К (для прутков, поковок, штамповок, плит), ВТ23_{св-1} и ВТ23_{св-2} (для сварочных проволок), ВТ20 (для листов и штамповок);

– разработка термомеханических параметров изготовления всей номенклатуры полуфабрикатов;

– разработка (совместно с ВСМПО) более 20 технических условий на полуфабрикаты различного типа из сплава ВТ23: листы толщиной 0,8–10,5 мм, ленту 0,1–1,0 мм, фольгу 0,08 мм, плиты 11–160 мм, прутки диаметром 10–150 мм, профили, трубы холоднокатаные цилиндрические и конусные с переменным сечением, горячекатаные трубы, штамповки и поковки массой до 3,5 т;

– создание процессов термической обработки и технологии изготовления сварных и монолитных конструкций [1–3].

Разработанные сплавы и технологические процессы защищены 56 авторскими свидетельствами.

Результатом выполненных исследований явилась возможность повышения целого комплекса эксплуатационных свойств конструкционных сплавов, в частности уровня прочности на 20–25%, который для сплава ВТ23 достигает 1300 МПа.

В конструкции космического аппарата «Буран» титановые сплавы ВТ23, ВТ20, ВТ6, ВТ5-1 и другие были применены для изготовления основных силовых конструкций (рис. 2):

– двух шпангоутов наиболее нагруженной области хвостовой части космоплана (сплав ВТ23);

– шпангоутов в области перехода от кабины к грузовому отсеку (сплав ВТ23);

– крыльев;

– емкостей и деталей, работающих на трение;

– рамок остекления;

– каркаса створок отсека полезного груза (сплав ВТ23);

– сотовых конструкций руля управления;

– раскосов для фермовых конструкций крыла и части фюзеляжа под грузовым отсеком.

В конструкции космического аппарата 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.

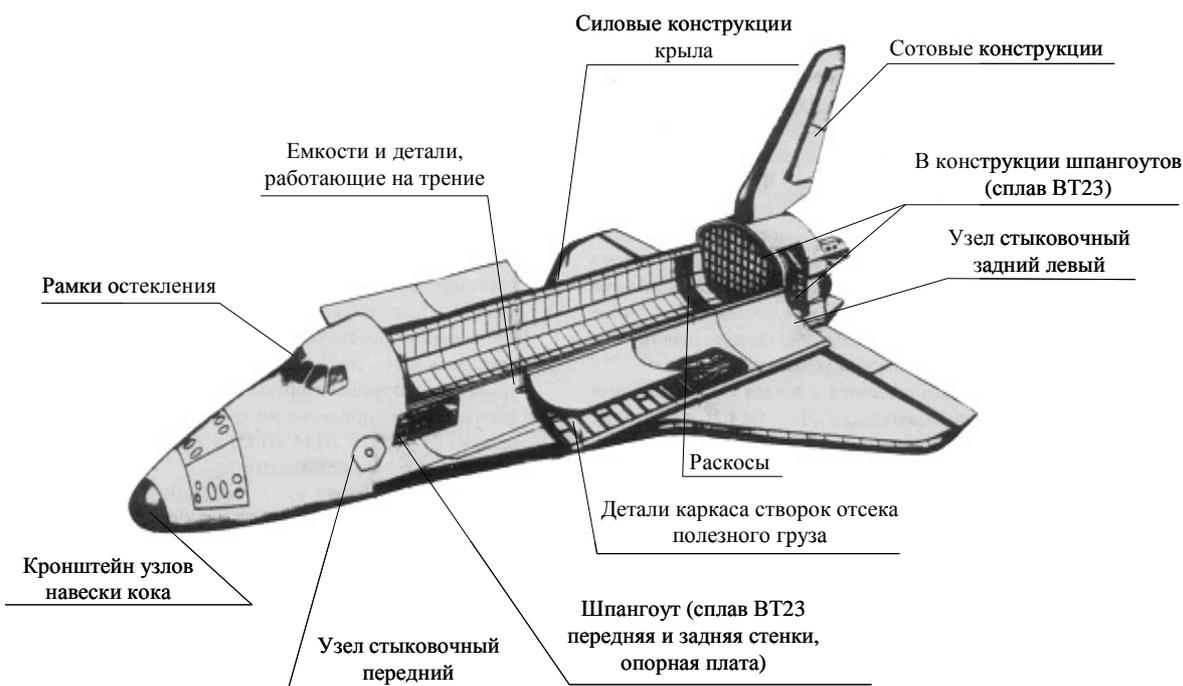


Рис. 2. Применение титановых сплавов в конструкции изделия «Буран»

Изготовление сварных узлов конструкции из высокопрочного комплекснолегированного сплава ВТ23 с $\sigma_{\text{в}}=1200\text{--}1300$ МПа позволило снизить их массу на 25–35%.

Масса всех конструкций из титановых сплавов на одном изделии «Энергия» составляет 18 т, в том числе 14 т – из высокопрочного сплава ВТ23, а на одном изделии «Буран»: 6,8 т, в том числе 6 т – из высокопрочного сплава ВТ23.

Использование сплава ВТ23 и разработанных процессов позволило получить экономию сырьевых и энергетических ресурсов: снижение массы деталей и узлов космического комплекса «Энергия–Буран» на 20–30%; сокращение цикла термической обработки в 2 раза и уменьшение расхода электроэнергии в 2–3 раза [1–3].

Работа по конструкционным титановым сплавам была отмечена премией Правительства Российской Федерации за 2003 г. (руководитель работы А.И. Хорев) [1–3].

Совершенный космический корабль – летательный аппарат исключительной формы и конструкции, в котором воплощены мечты и многолетний труд целого поколения конструкторов, металлургов и металлургов. Выполненные автором данной статьи фундаментальные и прикладные работы являются научным и практическим подтверждением правильной стратегии развития конструкционных титановых сплавов по следующим направлениям: применение комплексного легирования, микролегирования, термической и термомеханической обработки, а также текстурного упрочнения. Важнейшим достижением является разработка композиционных материалов на основе титана с внешним и внутренним армированием высокопрочными волокнами, а также создание слоистых композиционных материалов из титановых сплавов разного уровня прочности. По рассматриваемым проблемам после успешного запуска комплекса «Энергия–Буран» была продолжена углубленная работа по титановым сплавам применительно к требованиям летательных аппаратов нового поколения.

В результате проведения автором данной статьи комплекса фундаментальных и прикладных работ созданы и разработаны [4–33]:

– теория комплексного легирования титановых сплавов;

– высокопрочные свариваемые титановые сплавы универсального применения ВТ23, ВТ23Л, ВТ23К, ВТ23М, ВТ43, ВТ19, ВТ19-1;

– теория легирования присадочных материалов для сварки титановых сплавов;

– присадочные материалы, обеспечивающие высокую прочность сварных соединений;

– теория микролегирования, в том числе редкоземельными металлами. Предложены сплавы с гадолинием (ВТ38, ВТ23-1, ВТ43-1, ВТ19-1), обладающие повышенной прочностью, жаропрочностью и жаростойкостью;

– основы термической обработки конструкци-

онных и специальных титановых сплавов и созданы новые процессы упрочняющей термической обработки;

– теория термомеханической обработки (ТМО) титановых сплавов и различные технологические схемы и способы осуществления ТМО;

– процессы низкотемпературной и высокотемпературной термомеханических обработок, которые обеспечили повышение конструкционной прочности и трещиностойкости на 20–30%;

– теория текстурного упрочнения реальных конструкций (шаровых баллонов, цилиндрических оболочек и емкостей) из титановых сплавов, работающих в условиях двухосного растяжения;

– новые процессы изготовления промышленных полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ6С, ВТ14, ВТ23, ВТ23М, ВТ43 и других, которые обеспечили получение заданной кристаллографической текстуры и повышение прочности при двухосном растяжении на 20–40%;

– технические условия на серийную поставку продольно-поперечно катаных листов из сплавов ВТ6С, ВТ14, ВТ23 с текстурным упрочнением; впервые текстурное упрочнение реально применено в серийном производстве при создании тормозных дисков из сплава ВТ14, изотропных в плоскости листа и с повышенным сопротивлением деформации по толщине листа; текстурное упрочнение применено при создании шаровых баллонов из сплавов ВТ6, ВТ6с, ВТ23, ВТ5-1, ВТ5-1кт, успешно примененных в различного класса ракетах и космических аппаратах;

– теория и перспективные направления создания композиционных материалов на основе титана (ВТ23, ВТ23М, ВТ14, ВТ16, ВТ6, ВТ6ч, ВТ6с) с внешним армированием. Достигнута удельная прочность $\sigma_{\text{вк}}/d=48\text{--}50$ км (усл. ед.) (с цилиндрической оболочкой из сплава ВТ23);

– технология изготовления тонкостенных шаровых баллонов из сплава ВТ23 с внешним армированием высокопрочными волокнами, которые успешно применены при создании последних ступеней ракет, где снижение массы конструкции особенно важно;

– теория создания слоистых композиционных материалов на основе титана. Достигнута ее практическая реализация при изготовлении малочувствительных к поверхностным дефектам многослойных и плакированных листовых полуфабрикатов (например, листы сплавов ВТ23 и ВТ14, плакированные сплавами ВТ1-0 и ВТ1-00);

– технические условия на серийную поставку листов из сплавов ВТ23 и ВТ14, плакированных сплавом ВТ1-0 (трехслойных композиций);

– сплавы с заданной макро-, микро-, субструктурой, наноструктурой и кристаллографической текстурой, которые обеспечили заданный уровень механических свойств и эксплуатационных характеристик комплексно-легированных сплавов ВТ23, ВТ23Л, ВТ23К ($\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ МПа), ВТ23М,

BT23МЛ, BT23МК ($\sigma_b \geq 1150$ МПа) и BT43, BT43Л, BT43К (термически упрочнены на два уровня прочности $\sigma_b \geq 1250$ МПа, $\sigma_b \geq 1350$ МПа) и др.; определены служебные характеристики сплавов BT23, BT23М, BT43, BT18У (листы), BT38 и др.;

– новые прогрессивные технологические процессы производства монолитных и сварных конструкций из сплавов BT23, BT23М, BT43, BT38, BT18У, BT14, BT6, BT6ч, BT6с, BT20 и др.

Применение созданных сплавов и процессов в конструкциях новой техники обеспечит снижение массы конструкции на 20–30%, повышение их ресурса в 3–5 раз и эксплуатационной надежности на 25–35%, снижение стоимости конструкции на 15–20% [4–33].



Рис. 3. Транспортировка корабля «Буран»

Титановые ($\alpha+\beta$)-сплавы BT23, BT23М, BT43 с высокой и сверхвысокой прочностью и сплав BT38 высокотемпературного применения (до 600°C) будут главными конструкционными сплавами, которые предназначены для перспективных конструкций авиационной, ракетной и космической техники в ближайшие 15 и более лет [34–39].

Автором данной статьи разработаны: 127 титановых сплавов (в том числе 25 промыш-

ленных, 7 опытно-промышленных сплавов, 7 композиционных материалов на основе титана); 250 прогрессивных технологических процессов производства всех типов полуфабрикатов и технологий изготовления монолитных, сварных и паяных конструкций, которые защищены 377 патентами и авторскими свидетельствами (более 220 из них применены при создании конструкций, 74 вошли в состав лицензий на изготовление конструкций за рубежом).

Результаты фундаментальных и прикладных работ опубликованы автором в 4 монографиях, в более чем 250 статьях и брошюрах.

Разработанные автором перспективные титановые сплавы и прогрессивные технологические процессы применены более чем в 100 изделиях авиационной, ракетной, космической и другой техники, в том числе в «Буране» (рис. 3), «Энергии» и в новейших летательных аппаратах:

– маневренном самолете пятого поколения Т-50 для наиболее ответственных конструкций широко применены комплексно-легированные свариваемые сплавы BT23 и BT23М, а также более 70 технологических процессов производства всех типов полуфабрикатов и технологий создания монолитных, сварных и паяных конструкций. Разработанные сплавы и прогрессивные процессы защищены автором статьи 75 патентами и авторскими свидетельствами [1, 2, 4–33]. По номенклатуре деталей и узлов, изготовленных из сплава BT23, конструкция самолета Т-50 значительно превосходит «Буран»;

- гражданском самолете «Сухой–Super Jet 100»;
- конструкциях «Тополь М» и «Булава»;
- системе ГЛОНАСС с масштабным использованием шаровых баллонов из сплава BT23 [1–33].

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов: Учеб. пособие. М.: Машиностроение. 1979. 228 с.
2. Хорев А.И. Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов: Учеб. пособие. М.: Воениздат. 1979. 256 с.
3. Хорев А.И. Опыт применения титановых сплавов в народном хозяйстве. М.: ЦНИИТЭМС. 1977. 37 с.
4. Хорев А.И., Хорев М.А. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития //Материаловедение. 2005. №7. С. 25–34.
5. Хорев А.И. Создание теории термической обработки и текстурного упрочнения перспективных титановых сплавов //Материаловедение. 2009. №4. С. 28–36.
6. Хорев М.А. Структурно-фазовые состояния и надежность сварных соединений титановых сплавов. М.: ВИАМ. 1991. 107 с.
7. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и микролегирования и разработка титановых сплавов //Материаловедение. 2009. №6. С. 30–40.
8. Хорев А.И. Механические свойства сварных соединений ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов //Цветные металлы. 2006. №1. С. 77–82.
9. Хорев А.И. Основы теории термической, термомеханической обработки и текстурного упрочнения титановых сплавов //Цветные металлы. 2008. №9. С. 79–85.
10. Хорев А.И. Комплексное легирование и термическая обработка титановых сплавов //Сварочное производство. 2007. №6. С. 5–10.
11. Хорев А.И. Высокопрочный титановый сплав BT23 и его применение в перспективных сварных конструкциях //Сварочное производство. 2008. №9. С. 3–8.
12. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей узлов авиакосмической техники //Сварочное производство. 2009. №3. С. 13–23.
13. Хорев А.И. Комплексное легирование и микролегирование титановых сплавов //Сварочное производство. 2009. №6. С. 21–30.

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.
15. Хорев А.И. Основные направления создания высокопрочных и высоконадежных композиционных материалов на основе титана //Технология машиностроения. 2007. №5. С. 9–16.
16. Хорев А.И. Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов //Технология машиностроения. 2007. №8. С. 5–10.
17. Хорев А.И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций //Технология машиностроения. 2007. №12. С. 5–13.
18. Хорев А.И. Легирование и термическая обработка ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности //Технология машиностроения. 2009. №12. С. 5–13.
19. Хорев А.И. Легирование, термическая и термомеханическая обработка β -сплавов титана высокой прочностью //Технология машиностроения. 2010. №1. С. 5–14.
20. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава ВТ23 универсального применения //Вестник машиностроения 2006. №9. С. 40–46.
21. Хорев А.И. Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2008. №5. С. 32–36.
22. Хорев А.И. Теоретические и практические основы получения сверхпрочных титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2009. №9. С. 22–29.
23. Хорев А.И. Повышение конструкционной прочности термически и термомеханически упрочняемых титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2010. №5. С. 26–34.
24. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности //Вестник машиностроения. 2010. №7. С. 32–39.
25. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных β -сплавов титана высокой прочности //Вестник машиностроения. 2010. №8. С. 43–50.
26. Хорев А.И. Новые самолеты фирмы «Туполев» в российском небе //Титан. 2004. №1(14). С. 30–32.
27. Хорев А.И. Хорев М.А. Титановые сплавы: применение и перспективы развития //Титан. 2005. №1(16). С. 40–53.
28. Хорев А.И. Новый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами //Титан. 2006. №1(18). С. 47–52.
29. Хорев А.И. Теория и практика создания современных конструкционных титановых сплавов //Титан. 2007. №2(21). С. 26–38.
30. Хорев А.И. Обеспечение высокой и сверхвысокой прочности титановых сплавов при ее стабильности //Технология машиностроения. 2011. №9. С. 5–10.
31. Хорев А.И. Научные основы достижения высокой и сверхвысокой конструкционной прочности свариваемых титановых сплавов //Сварочное производство. 2011. №9. С. 14–26.
32. Хорев А.И. Фундаментальные исследования легирования титановых сплавов редкоземельными металлами //Вестник машиностроения. 2011. №11. С. 17–22.
33. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по термической и термомеханической обработке титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2011. №11. С. 12–17.
34. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
35. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
36. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
37. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Перспективные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники». М.: ВИАМ. 2002. С. 11–32.
38. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 206–212.
39. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития //Труды ВИАМ. 2013. №2. (электронный журнал).