



УДК 669.018.29:669.295

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ ПО
КОНСТРУКЦИОННЫМ ТИТАНОВЫМ СПЛАВАМ И
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ**

А.И. Хорев

доктор технических наук

Февраль 2013

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 «Труды ВИАМ»,
№2, 2013 г.

А.И. Хорев

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ ПО КОНСТРУКЦИОННЫМ ТИТАНОВЫМ СПЛАВАМ 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.I. Khorev

FUNDAMENTAL AND APPLIED PROJECTS ON TITANIUM ALLOYS AND PERSPECTIVE AREAS OF THEIR DEVELOPMENT

A complex of fundamental and applied research projects aimed at titanium alloys development as well as their process engineering and technologies of aviation, rocket and space parts production have been carried out. There were designed theories of complex alloying, microalloying, thermal and thermomechanical treatments, textural strengthening, composite materials with outer and inside reinforcement by high-strength fibers, multilayered and plated composite materials.

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

Основные потребители титановых сплавов – авиационная, космическая, ракетная техника, машиностроение. Практически нет ни одной современной конструкции, в которой бы самые ответственные задачи не выполняли титановые сплавы. Титан применяется для изготовления баллонов, емкостей, оболочек, обшивки, шпангоутов, лонжеронов, балок и других деталей и узлов новой техники. Высокая прочность, малая плотность, высокая удельная прочность, широкий температурный интервал применения титановых сплавов позволяют значительно снизить массу конструкций и повысить надежность их работы. Хороший пример легкости и надежности конструкции – бронезилеты из сплава ВТ23. Спортивный инвентарь из этого сплава и других конструкционных титановых сплавов также отличается высокой легкостью и надежностью.

Следует особенно отметить, что применение композиционных материалов при создании большого количества деталей авиационной и ракетно-космической техники невозможно без титановых сплавов (ВТ23, ВТ23М, ВТ43), которые целесообразно применять как закладные элементы композиционных конструкций.

Титановые сплавы также широко применяются в морском судостроении и морской авиации, так как высокая коррозионная стойкость делает их незаменимым материалом для обшивки корпусов. Титан, благодаря своим высоким свойствам, находит применение в химической промышленности, приборостроении, медицине [1-33].

Фундаментальные и прикладные работы

В настоящее время разработаны конструкционные и специальные титановые сплавы с различным уровнем прочности. Серийно производятся все виды полуфабрикатов, которые металлургическая промышленность России поставляет на внутренний и в большей мере на внешний рынок. Сегодня можно констатировать, что титановая металлургия России, самая мощная в мире, не утратила своих позиций и готова обеспечить титановыми сплавами все самые современные отечественные разработки конструкторов новой техники. Эта уверенность основана также на проведенных автором результатах исследований по конструкционным и специальным титановым сплавам [1-33]. Уровень этих разработок, созданные сплавы, технологии изготовления полуфабрикатов и конструкций обеспечивают более высокие значения эксплуатационных характеристик конструкционных и специальных титановых сплавов, чем у зарубежных сплавов.

Ниже представлены основные результаты фундаментальных и прикладных работ по созданию титановых сплавов, по разработке технологических процессов произ-

водства различного типа полуфабрикатов и процессов изготовления монолитных, сварных и паяных конструкций из различного типа полуфабрикатов титановых сплавов, опубликованные автором практически за последние 5 лет [1-33].

В результате проведения автором статьи комплекса фундаментальных и прикладных работ созданы и разработаны:

- 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 и предложены сплавы с гадолинием (ВТ38, ВТ23-1, ВТ43-1, ВТ19-1), обладающие повышенной прочностью, жаропрочностью и жаростойкостью;
- основы термической обработки конструкционных и специальных титановых сплавов и созданы новые процессы упрочняющей термической обработки;
- теория термомеханической обработки 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 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 (BT23, BT23M, BT14, BT16, BT6, BT6ч, BT6с) с внешним армированием и достигнута удельная прочность $\sigma_{вк}/d=48-50$ км (усл. ед.) (с цилиндрической оболочкой из сплава BT23);

- технология изготовления тонкостенных шаровых баллонов из сплава BT23 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 и достигнута ее практическая реализация при изготовлении малочувствительных к поверхностным дефектам многослойных и плакированных листовых полуфабрикатов (например, листы сплавов BT23 и BT14, плакированные сплавами BT1-0 и BT1-00);

- технические условия на серийную поставку листов из сплавов BT23 и BT14, плакированных сплавом BT1-0 (трехслойных композиций);

- сплавы с заданной макро-, микро-, субструктурой, наноструктурой и кристаллографической текстурой, которые обеспечили заданный уровень механических свойств и эксплуатационных характеристик комплексно легированных сплавов BT23, BT23Л, BT23К ($\sigma_{в} \geq 1100$ МПа), BT23М, BT23МЛ, BT23МК ($\sigma_{в} \geq 1150$ МПа) и BT43, BT43Л, BT43К ($\sigma_{в} \geq 1250$ МПа, $\sigma_{в} \geq 1350$ 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%.

В последних работах представлены теоретические и практические рекомендации, направленные на эффективное применение титановых сплавов в летательных аппаратах нового поколения. В этих работах наряду с механическими характеристиками большой внимание обращено на экономические показатели (стоимость сплавов, коэффициент использования металлов, энергоемкость, трудоемкость и др.), что очень важно для широкого применения титановых сплавов в перспективных конструкциях [1-31].

Титановые сплавы BT23, BT23М, а также ($\alpha+\beta$)-сплав BT43 последней разработки будут главными конструкционными сплавами с высокой и сверхвысокой прочно-

стью, которые предназначены для высокотемпературного применения в перспективных конструкциях авиационной, ракетной и космической техники в ближайшие 15 и более лет. Из этих $(\alpha+\beta)$ -сплавов (универсального применения) изготавливают все виды полуфабрикатов. Это позволяет повысить коэффициент использования металла при изготовлении вместо монолитных конструкций сварных с применением различных типов полуфабрикатов (например, листов и штамповок). Современные отечественные $(\alpha+\beta)$ -сплавы свариваются всеми видами сварки, из них изготавливают монолитные, сварные и паяные конструкции. По сравнению с высокопрочными зарубежными β -сплавами, отечественные $(\alpha+\beta)$ -сплавы ВТ23, ВТ23М и ВТ43 содержат меньшее количество дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, обладают более высоким комплексом механических и эксплуатационных характеристик основного материала и особенно сварных соединений, а также повышенными характеристиками трещиностойкости. У этих сплавов температура полиморфного превращения составляет 900-920°C, поэтому при охлаждении формируется достаточно большой размер полиэдров α -фазы, способных максимально изменять направление трещины и приводить к ее ветвлению. Для достижения высоких характеристик трещиностойкости у $(\alpha+\beta)$ -сплавов необходимо после β -деформаций проводить окончательную деформацию в $(\alpha+\beta)$ -области со степенью не более 25-40%, чтобы, достигнув прерывистости и извилистости границ первичных β -зерен, только незначительно уменьшить размер α -частиц внутри зерна и сохранить их способность изменять направление развития трещин и их ветвление [1-33].

У известных зарубежных β -сплавов температура полиморфного превращения на 60-150°C ниже, чем у отечественных $(\alpha+\beta)$ -сплавов ВТ23, ВТ23М, ВТ43, поэтому при низкой температуре образуются фазовые составляющие значительно меньшей величины. Такие мелкодисперсные составляющие не способны изменять направление развития трещины и ее ветвление. Это приводит к уменьшению энергии разрушения и снижению характеристик трещиностойкости β -сплавов.

Изготовление современных сварных термически упрочненных конструкций из β -сплавов титана практически невозможно (сварной шов после термического упрочнения малопластичен), поэтому сварные конструкции на самолетах фирмы «Боинг» не применяются. Необходимо в термически упрочняемых конструкциях из β -сплавов предусмотреть утолщения в зоне шва, компенсирующие снижение прочности при отжиге шва. Однако утолщения в зоне швов увеличивают массу, а для большинства ответственных конструкций авиационной, ракетной и космической техники создание утолщений практически невозможно.

Получение высоких значений характеристик трещиностойкости является главной задачей. Автором установлено, что метастабильное структурно-фазовое состояние, особенно в $(\alpha+\beta)$ -сплавах с механически нестабильными фазами, повышает важнейшие эксплуатационные характеристики, например характеристики трещиностойкости. Это происходит в результате распада механически нестабильных фаз при экстремальных нагрузках, что сопровождается релаксацией напряжений в вершине развивающейся трещины. Этим в значительной мере объясняются большие значения характеристик трещиностойкости в сплавах, например в $(\alpha+\beta)$ -сплаве ВТ23, после проведения высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) [1-33]. Поэтому работы, направленные на создание специальных режимов термической и термомеханической обработок, обеспечивающих получение регламентированных нестабильных состояний в сплавах, являются перспективными и весьма актуальными. Наряду с повышением эксплуатационных характеристик, можно в 2-3 раза уменьшить расход электроэнергии и трудоемкость термической обработки. Все режимы термической обработки устанавливались для создания стабильных состояний. Если уменьшить продолжительность выдержки при температуре отжига и закалки в 2-3 раза, то можно создать неравновесное состояние и уменьшить расход электроэнергии.

Автором проведен следующий эксперимент – наряду с ВТМО и старением, закалкой и старением (упрочняющая термическая обработка – УТО) – была проведена следующая обработка: ВТМО, закалка с выдержкой при температуре закалки в 3 раза меньшей, чем указано в инструкции по термообработке, старение (предварительная термомеханическая обработка – ПТМО). Уровень механических свойств после проведения ПТМО значительно выше, чем после УТО, но несколько ниже, чем после ВТМО. Проведенный эксперимент является хорошим примером, показывающим возможность сокращения продолжительности выдержки при температуре закалки [1-33].

В результате исследований показано, что при формировании макро-, микро- и наноструктур роль комплексного легирования и микролегирования (в том числе РЗМ) высока и эффективна. Сочетание комплексного легирования сплава ВТ23 (ВТ23М, ВТ43) с ТМО обеспечивает создание наноразмерных структурных составляющих при низкотемпературном старении (370-420°C) и получение предела прочности $\sigma_b=2100$ МПа – для сплава ВТ23 и $\sigma_b=2300$ МПа – для сплава ВТ43. Большой эффект образования наноразмерных фазовых составляющих наблюдается на тонколистовом материале и тонколистовом материале, подвергнутом деформации в условиях сверхвысокой пластичности и имеющем более дисперсную исходную структуру.

Комплексное легирование и микролегирование эффективно на различных стадиях технологического процесса – от выплавки слитка до создания конструкций.

Значимая роль наноструктур в комплексно легированных сплавах проявляется не только в тех случаях, когда наноструктуры являются главной составляющей конечного продукта, но и когда они формируются на промежуточных стадиях технологического процесса и оказывают большое влияние на конечный результат. Сплав в наноструктурном состоянии может быть не достаточно работоспособным в реальных конструкциях ракетно-космической, авиационной и других областях техники. Так, сплавы в наноструктурном состоянии, обладая высокими значениями традиционных характеристик прочности и пластичности, могут иметь пониженные значения характеристик трещиностойкости, которые определяют надежность работы конструкций:

- критического коэффициента интенсивности напряжения при плоской деформации (КСУ);
- скорости роста трещины усталости (СРТУ);
- ударной вязкости образцов с исходной усталостной трещиной (КСТ);
- вязкости образцов с усталостной трещиной при статическом изгибе.

Наноразмерные структуры в титановых сплавах могут формироваться на промежуточных стадиях технологических процессов в виде:

- единичных дислокаций (например, при ВТМО);
- дефектов кристаллического строения;
- кластеров;
- выделений α' -, α'' -, α -, β -фаз при закалке и ВТМО;
- частиц в виде твердорастворных высокодисперсных α -фаз, интерметаллидных фаз, образованных на начальных стадиях низкотемпературного старения, особенно при старении в процессе проведения НТМО.

Все эти наноразмерные структуры, имея малый размер, могут оказаться не способными изменить направление развития трещин, их ветвление, что сопровождается уменьшением энергии, затрачиваемой на разрушение, а следовательно, уменьшением значений характеристик трещиностойкости. Это надо учитывать при рекомендации титановых сплавов с наноструктурой для конструкций.

Наноразмерные структуры (субструктуры) являются плодом техники высокой разрешающей способности и их в титановых сплавах всегда рассматривали как промежуточные структуры. Они могут положительно влиять на преобразование структуры в

процессе завершающих стадий технологических процессов, повышая уровень эксплуатационных характеристик, в том числе характеристик трещиностойкости.

Роль комплексного легирования и микролегирования в формировании наноструктур может быть большой с учетом их способности создавать однородное структурно-фазовое состояние в титановых сплавах. Для формирования наноструктур необходимо однородное исходное структурно-фазовое состояние, на что и направлены проводимые автором работы по комплексному легированию, микролегированию, термической и термомеханической обработке [1-33].

Основные направления повышения стабильности механических свойств

Одна из важнейших проблем современного металловедения – повышение уровня и стабильности механических свойств титановых сплавов, что особенно актуально на современном этапе, когда применение дорогостоящих титановых сплавов должно быть особенно эффективным [1-33]. При расчете конструкций по нижнему уровню прочности сплава большое превышение заданного расчетного уровня прочности приводит к снижению эксплуатационных характеристик полуфабриката с уровнем прочности на верхнем пределе. Для решения важнейшей задачи повышения стабильности механических свойств титановых сплавов и конструкций из них необходим всесторонний подход к рассматриваемой проблеме, включающий [1-33]:

- создание на основе разработанной теории комплексного легирования современных титановых сплавов универсального применения (одна только универсальность применения сплава обеспечивает большой экономический, технологический и конструктивный эффект);

- разработку прогрессивных технологических процессов изготовления полуфабрикатов на основе предложенной концепции многостадийной термомеханической обработки;

- создание на основе предложенных теорий термической и термомеханической обработок эффективных режимов термической (ТО) и термомеханической обработок (ТМО), обеспечивающих улучшение и совершенствование макро-, микро- и субструктуры (при особой положительной роли наноразмерных единичных, однородно распределенных, дислокаций и нанокластеров в виде объединений нескольких атомов однородных или разнородных элементов);

- формирование при обработке сплавов давлением заданной кристаллографической текстуры, которая обеспечит повышение механических свойств в направлении действия максимальных нагрузок в конструкции;
- разработку термомеханических параметров изготовления листов с требуемой текстурой и технических условий на их серийную поставку;
- создание современных конструкций с рациональным применением всех видов и типов полуфабрикатов из универсального сплава;
- уменьшение диапазона легирования (например в сплаве ВТ23М) – это реализованное при изготовлении на ВСМПО плит, поковок и листов рациональное решение: вместо дополнительного легирования, применяемого обычно для повышения гарантированного уровня прочности, использован эффект уменьшения диапазона и дисперсии легирования. В этом случае автором были применены все разработки, использованные при создании сплава предыдущего состава, что ускорило процесс освоения производства полуфабрикатов и конструкций из нового улучшенного состава сплава. Такой подход является привлекательным для инновационных проектов [1-33].

Применение титановых сплавов и процессов

Автором статьи разработаны: 127 титановых сплавов (в том числе 25 промышленных, 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 вошло в состав лицензий на изготовление конструкций за рубежом).

Результаты фундаментальных и прикладных работ (за последние 57 лет автором опубликовано 70 статей и патентов), материалы конференций – например, Международных «Ti-2005-2011 гг», проведенных во ФГУП «ВИАМ» (на которых представлено и опубликовано 17 работ автора) и на авиасалонах (в том числе «МАКС-2011»), показывают, что позиции титановых сплавов (как перспективных конструкционных и специальных сплавов) будут укрепляться с каждым годом. Этому в значительной степени будут способствовать проводимые в рамках научной школы «Реальное металловедение и эффективное применение титановых сплавов» фундаментальные и прикладные работы.

Предыдущий этап работы по конструкционным титановым сплавам был отмечен награждением 17.12.2004 г. премией Правительства Российской Федерации (руководи-

тель работ – профессор, доктор технических наук А.И. Хорев). Приведенные в данной статье фундаментальные и прикладные работы автор предполагает представить на соискание премии, подводящей итог научной и практической деятельности, отраженный в опубликованных статьях и патентах последних 5 лет.

Представленные научные и практические разработки открывают дальнейшую перспективу применения титановых сплавов в авиационной, ракетной и космической технике.

Разработанные автором перспективные титановые сплавы и прогрессивные технологические процессы применены более чем в 100 изделиях авиационной, ракетной, космической и другой технике, в том числе и в новейших летательных аппаратах:

- маневренном самолете 5-го поколения Т50, при создании которого использовались 7 титановых сплавов, в том числе новейший высокопрочный комплексно легированный ($\alpha+\beta$)-титановый сплав (масса деталей из которого составляет 87% от массы всех деталей, изготовленных из титановых сплавов), и 20 технологических процессов;

- гражданском самолете «Сухой SuperJet 100»;

- конструкциях «Тополь М» и «Булава»;

- системе ГЛОНАСС с масштабным использованием космических спутников.

Перспективные направления развития фундаментальных и прикладных работ по конструкционным и специальным титановым сплавам высокой прочности:

- дальнейшее развитие теории комплексного легирования в направлении усложнения макро- и микролегирующих комплексов;

- развитие теории многофакторного механизма упрочнения при доминирующем влиянии в этом механизме твердорастворного и дисперсионного упрочнения и ограниченном влиянии интерметаллидного упрочнения (соединениями титана с хромом, железом, медью, никелем, алюминием, снижающими характеристики трещиностойкости и пластичности);

- создание сплавов с предельным упрочнением α - и β -твердых растворов и многофазовым упрочнением, в том числе при наличии фаз переменного химического состава;

- разработка новых методов упрочняющей термической обработки с высокоскоростной и градиентной закалкой перед старением;

- создание новых процессов ТМО и термопластической обработки и изготовление полуфабрикатов с заданной макро-, микро- и наноструктурой, кристаллографической текстурой и заданными механическими свойствами и характеристиками разрушения;

- создание титановых сплавов повышенной прочности, жаропрочности и жаростойкости и пониженной окисляемости при термической обработке (BT23-1, BT23M-1, BT43-1, BT19-2 и др.), легированных редкоземельным модифицирующим элементом гадолинием;

- создание метастабильных состояний, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик сплавов, путем разработки специальных режимов термической и термомеханической обработок, уменьшающих одновременно в 2-3 раза расход электроэнергии (в том числе за счет уменьшения продолжительности выдержки при отжиге, закалке и старении);

- создание слоистых композиционных материалов (КМ) с удельной прочностью 55 км (усл. ед.), что эквивалентно $\sigma_v=2500$ МПа, с матрицей из наноструктурированных плакированных листов сплава BT1-0, экономнолегированных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов типа BT43 и BT43-1 с $\sigma_v \geq 1600$ МПа стоимостью на 20-30% меньше, чем у β -сплавов, при большей на 25% прочностью;

- создание слоистых КМ с прослойкой из алюминия (толщиной 5-10 мкм) между плакировкой из сплава BT1-00 и высокопрочными нитями, что обеспечит диффузионный барьер и исключит образование хрупкого слоя, а также высокие эксплуатационные свойства такого материала;

- разработка комплекснолегированных восьми- и более компонентных систем ($\alpha+\beta$)-сплавов и процессов создания наноструктурированных при НТМО цилиндрических оболочек с конструкционной прочностью при двухосном растяжении $\sigma_{вк}=1700$ МПа, а также создание КМ с внешним армированием и удельной прочностью 65 км (усл. ед.), что эквивалентно $\sigma_v=2900$ МПа (для титана).

Перспективные направления фундаментальных и прикладных работ по конструкционным и специальным листовым титановым сплавам высокотемпературного применения:

- развитие теории многофакторного механизма упрочнения с одновременным использованием твердорастворного, дисперсионного, интерметаллидного (соединение двух металлов) упрочнения и упрочнения химическими соединениями (металла с неметаллами);

- предельное легирование α -твердого раствора;

- регламентированное распределение интерметаллидных фаз (α_2) и химических соединений (силицидов и др.) путем микролегирования и комплексного микролегирования;

- создание сплавов высокой жаропрочности и жаростойкости, легированных гадолинием (типа сплава BT38) и другими редкоземельными металлами и их комплексами;

- разработка термомеханических параметров изготовления слябов с предельным сокращением продолжительности высокотемпературных нагревов, применением всесторонней деформации и фазовой перекристаллизации, а также разработка технологических параметров изготовления листов с включением продольно-поперечной прокатки, что будет способствовать в совокупности более дисперсному распределению интерметаллидных фаз и силицидов в листах и повышению их технологической пластичности при листовой штамповке;

- развитие теоретических основ и решение практических задач при создании композиционных материалов и конструкций с матрицей из листов сплавов высокотемпературного применения.

Выводы

1. Проведен комплекс фундаментальных и прикладных работ, направленных на создание титановых сплавов, технологий их металлургического производства и технологий изготовления деталей авиационной, ракетной и космической техники на машиностроительных заводах, результаты которых опубликованы автором статьи в 2006-2011 гг.

2. 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 материалов.

3. Разработана техническая документация на производство и применение титановых сплавов и проведено промышленное изготовление полуфабрикатов и изделий авиационной, ракетной и космической техники высокой стабильности и надежности.

4. Результаты научной и практической работы по комплексному легированию и микролегированию, термической, термомеханической обработке и текстурному упрочнению, обеспечили создание автором статьи 127 различных титановых сплавов простых и сложных систем легирования, защищенных патентами и авторскими свидетельствами, 25 из которых стали промышленными и 7 опытно-промышленными, 7 композиционных материалов на основе титана. Эти сплавы и 250 технологических процессов производства полуфабрикатов и изготовления изделий успешно применены более чем в 100 изделиях космической, ракетной, авиационной и другой техники и создают хорошую перспективу для широкого применения их в изделиях нового поколения, в конструкциях, работающих при температурах от -196 до $+600^{\circ}\text{C}$.

По титановым сплавам автором статьи опубликованы:

- 4 монографии [30-33], две из которых «Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов» и «Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов» утверждены Министерством авиационной промышленности СССР в качестве учебных пособий для отраслевой системы обучения научных и инженерных кадров, в том числе для научной школы «Реальное металлостроение и эффективное применение титановых сплавов» [30-31];

- более 250 статей, большая часть в журналах (утвержденных ВАК РФ для соискателей ученых степеней), которые переводятся на английский язык и распространяются во всем мире [1-36].

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А.И., Хорев М.А. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития //Материаловедение. 2005. №7. С. 25–34.
2. Хорев А.И. Создание теории термической обработки и текстурного упрочнения перспективных титановых сплавов //Материаловедение. 2009. №4. С. 28–36.
3. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и микролегирования и разработка титановых сплавов //Материаловедение. 2009. №6. С. 30–40.
4. Хорев А.И. Механические свойства сварных соединений ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов //Цветные металлы. 2006. №1. С. 77–82.
5. Хорев А.И. Основы теории термической, термомеханической обработки и текстурного упрочнения титановых сплавов //Цветные металлы. 2008. №9. С. 79–85.
6. Хорев А.И. Комплексное легирование и термическая обработка титановых сплавов //Сварочное производство. 2007. №6. С. 5–10.
7. Хорев А.И. Высокопрочный титановый сплав ВТ23 и его применение в перспективных сварных конструкциях //Сварочное производство. 2008. №9. С. 3–8.
8. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей узлов авиакосмической техники //Сварочное производство. 2009. №3. С. 13–23.
9. Хорев А.И. Комплексное легирование и микролегирование титановых сплавов //Сварочное производство. 2009. №6. С. 21–30.
10. 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.
11. Хорев А.И. Основные направления создания высокопрочных и высоконадежных композиционных материалов на основе титана //Технология машиностроения. 2007. №5. С. 9–16.
12. Хорев А.И. Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов //Технология машиностроения. 2007. №8. С. 5–10.
13. Хорев А.И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций //Технология машиностроения. 2007. №12. С. 5–13.
14. Хорев А.И. Легирование и термическая обработка ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности //Технология машиностроения. 2009. №12. С. 5–13.

15. Хорев А.И. Легирование, термическая и термомеханическая обработка β -сплавов титана высокой прочности //Технология машиностроения. 2010. №1. С. 5–14.
16. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава ВТ23 универсального применения //Вестник машиностроения 2006. №9. С. 40–46.
17. Хорев А.И. Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2008. №5. С. 32–36.
18. Хорев А.И. Теоретические и практические основы получения сверхпрочных титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2009. №9. С. 22–29.
19. Хорев А.И. Повышение конструкционной прочности термически и термомеханически упрочняемых титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2010. №5. С. 26–34.
20. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности //Вестник машиностроения. 2010. №7. С. 32–39.
21. Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных β -сплавов титана высокой прочности //Вестник машиностроения. 2010. №8. С. 43–50.
22. Хорев А.И. Новые самолеты фирмы «Туполев» в российском небе //Титан. 2004. №1(14). С. 30–32.
23. Хорев А.И. Хорев М.А. Титановые сплавы: применение и перспективы развития //Титан. 2005. №1(16). С. 40–53.
24. Хорев А.И. Новый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами //Титан. 2006. №1(18). С. 47–52.
25. Хорев А.И. Теория и практика создания современных конструкционных титановых сплавов //Титан. 2007. №2(21). С. 26–38.
26. Хорев А.И. Обеспечение высокой и сверхвысокой прочности титановых сплавов при ее стабильности //Технология машиностроения. 2011. №9. С. 5–10.
27. Хорев А.И. Научные основы достижения высокой и сверхвысокой конструкционной прочности свариваемых титановых сплавов //Сварочное производство. 2011. №9. С. 14–26.
28. Хорев А.И. Фундаментальные исследования легирования титановых сплавов редкоземельными металлами //Вестник машиностроения. 2011. №11. С. 17–22.

29. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по термической и термомеханической обработке титановых сплавов //Вестник машиностроения. 2011. №11. С. 12–17.
30. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов: Учеб. пособ. М.: Машиностроение. 1979. 228 с.
31. Хорев А.И. Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов: Учеб. пособ. М.: Воениздат. 1979. 256 с.
32. Хорев А.И. Опыт применения титановых сплавов в народном хозяйстве. М.: ЦНИИТЭМС. 1977. 37 с.
33. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
34. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 157–167.
35. 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.
36. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 206–212.