

УДК 669.295

П.В. Панин¹, Е.А. Лукина², Е.Б. Алексеев¹**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ
НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-49-57

Исследовано влияние дополнительного легирования водородом на протекание фазовых и структурных превращений в высокопрочном титановом сплаве VT23. Определены количественные соотношения α - и β -фаз в структуре при комнатной температуре в зависимости от содержания водорода и температуры наводороживающего отжига в интервале от 650 до 800°C. Проведена количественная оценка содержания β -фазы и размера α -частиц в сплаве VT23 в зависимости от параметров наводороживания. Показано, что в исходном отожженном состоянии в сплаве содержится ~30% (объемн.) β -фазы. Введение 0,1% (по массе) водорода приводит к увеличению объемной доли β -фазы с 50% после наводороживания при температуре 650°C до 80% – при 800°C, при этом размер частиц первичной α -фазы изменяется от 0,6–1,2 до 1,8–2,2 мкм.

Ключевые слова: титановый сплав VT23, водородная технология, легирование водородом, наводороживающий отжиг, фазовый состав, структура.

P. V. Panin¹, E. A. Lukina², E. B. Alexeev¹**EFFECT OF HYDROGEN DOPING
ON STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION
OF SHEET SEMI-PRODUCTS OF VT23 TITANIUM ALLOY**

The influence of extra hydrogen doping on phase and structural transformations in high-strength VT23 alloy has been studied. The volume ratios of α - and β -phases have been defined for room temperature state in dependence on hydrogen amount and hydrogenating annealing temperature in the range from 650 to 800°C. A quantitative estimation of β -phase content and α -particles dimensions in VT23 alloy have been evaluated with hydrogenation parameters being in focus. It has been shown that the alloy contains approximately 30% (vol.) of β -phase in initial condition. Doping with 0,1% (wt.) of hydrogen results in β -phase volume fraction increase from 50% after hydrogenation at 650°C to 80% after hydrogenation at 800°C. The dimensions of α -particles within the mentioned conditions change from 0,6–1,2 to 1,8–2,2 μm .

Keywords: titanium alloy VT23, hydrogen technology, hydrogen doping, hydrogenating annealing, phase composition, structure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [Moscow Aviation Institute (National Research University)]; e-mail: mai@mai.ru

Введение

При выборе материала, помимо технологических, конструкционных и экономических требований, важным параметром является взаимосвязь «состав–структура–свойства–технология» [1–3]. При рассмотрении всей совокупности требований,

предъявляемых к авиационным материалам, можно заключить, что титан и сплавы на его основе в большой степени удовлетворяют им, поэтому, как известно, эта группа материалов широко используется в авиационной промышленности [4–7].

Производство титановой продукции не только непрерывно расширяется, но и совершенствуется [8–12]. Так, интенсивно развивается теория и практика апробации водородной технологии [13] с целью улучшения низкотемпературной технологической пластичности сплавов на основе титана, предназначенных для деформации. Долгое время водород считали наиболее вредной примесью в титановых сплавах [14], поэтому основные усилия исследователей были направлены на установление максимально допустимой концентрации остаточного водорода в полуфабрикатах и конструкциях и разработку производственных операций, приводящих к снижению содержания водорода в полуфабрикатах до безопасного уровня, не провоцирующего разрушение готовых деталей в эксплуатационный период в результате водородной хрупкости [15]. Первое необычное явление, обусловленное наличием водорода, приведшее в конечном итоге к формированию перспективного научного направления – водородной технологии титановых сплавов, – было исследовано в конце 1950-х годов Цвиккером и Шлейхером, которые, вводя водород в слитки, случайно обнаружили существенное облегчение деформируемости водородсодержащих слитков. Этот эффект получил название «водородное пластифицирование» [16]. Пластифицирующее действие достигается за счет временного легирования водородом, в результате которого существенно облегчается горячая обработка сложнодеформируемых титановых сплавов. Микролегирование водородом позволяет уменьшать деформационные усилия при стандартных температурах термомеханической обработки или при тех же усилиях на 125–175°C понизить температуру обработки [13, 16, 17].

В данной работе на примере листовых полуфабрикатов из титанового сплава BT23 изучены закономерности влияния водорода на фазо- и структурообразование с целью дальнейшей реализации эффекта водородного пластифицирования.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Исследования проводили на листовых полуфабрикатах из комплексно-легированного сплава марки BT23 [19, 20], полученных по промышленной технологии в условиях ПАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА». Сплав BT23 относится к системе легирования Ti–Al–V–Mo–Cr–Fe [21, 22]. Это высокопрочный ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного класса, имеющий после закалки с температур β -области структуру мартенсита α'' [23]. Химический состав листовых полуфабрикатов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав листовых полуфабрикатов из сплава BT23

Класс сплава (состояние при поставке)	Полуфабрикат (толщина)	Содержание легирующих элементов, % (по массе)				
		Al	V	Mo	Cr	Fe
$\alpha+\beta$ (отожженное)	Лист ($h=1,8$ мм)	4,5	4,0	1,8	0,86	0,44

Примечание. Основа сплава – титан; примеси в соответствии с ОСТ 90013–81.

Для проведения исследований из листовых полуфабрикатов вырезали образцы размером 1,8×15×15 мм. Поверхность исследуемых листов ровная и не требовала дополнительной механической обработки.

Перед проведением исследований образцы подвергали травлению в реактиве состава: одна часть плавиковой кислоты (HF) и три части азотной кислоты (HNO_3) – для очистки поверхности.

Металлографический анализ проводили с помощью оптического микроскопа по методу светлого поля. Образцы для металлографического анализа (с плоскости, перпендикулярной направлению прокатки) готовили по стандартной методике: подвергали грубой, а затем тонкой шлифовке наждачной бумагой различной зернистости и окончательной электрополировке в растворе электролита следующего состава: 80% уксусной кислоты (CH_3COOH) и 20% хлорной кислоты (HClO_4). Катод выполнен из аустенитной нержавеющей стали, анодом служил образец. Сосуд, в котором проводили электрополировку, имел водяное охлаждение. При появлении очагов питтинговой коррозии, электрополировку проводили в несколько этапов. Химическое травление полированной поверхности образцов осуществляли при комнатной температуре в растворе плавиковой и азотной кислот с добавлением дистиллированной воды путем смачивания поверхности микрошлифа травителем.

Введение водорода в образцы проводили термодиффузионным способом в твердой фазе в среде высокочистого молекулярного водорода [13] путем осуществления наводороживающего отжига в лабораторной установке Сивертса при температурах 650, 700, 750 и 800°C до концентраций 0,1–1,0% (по массе) H. После полного поглощения заданного количества водорода вакуумную реторту с образцами извлекали из печи и охлаждали до комнатной температуры в потоке воздуха от вентилятора – данный прием позволил осуществить максимально возможную для используемой установки скорость охлаждения, которая составила ~1 К/с.

Остаточная концентрация водорода в исходных образцах, измеренная спектральным методом, не превышала 0,006% (по массе) H. Концентрацию вводимого водорода контролировали по привесу образцов путем взвешивания на аналитических весах до и после наводороживающего отжига, а фактическое количество определяли по методике, описанной в работе [24].

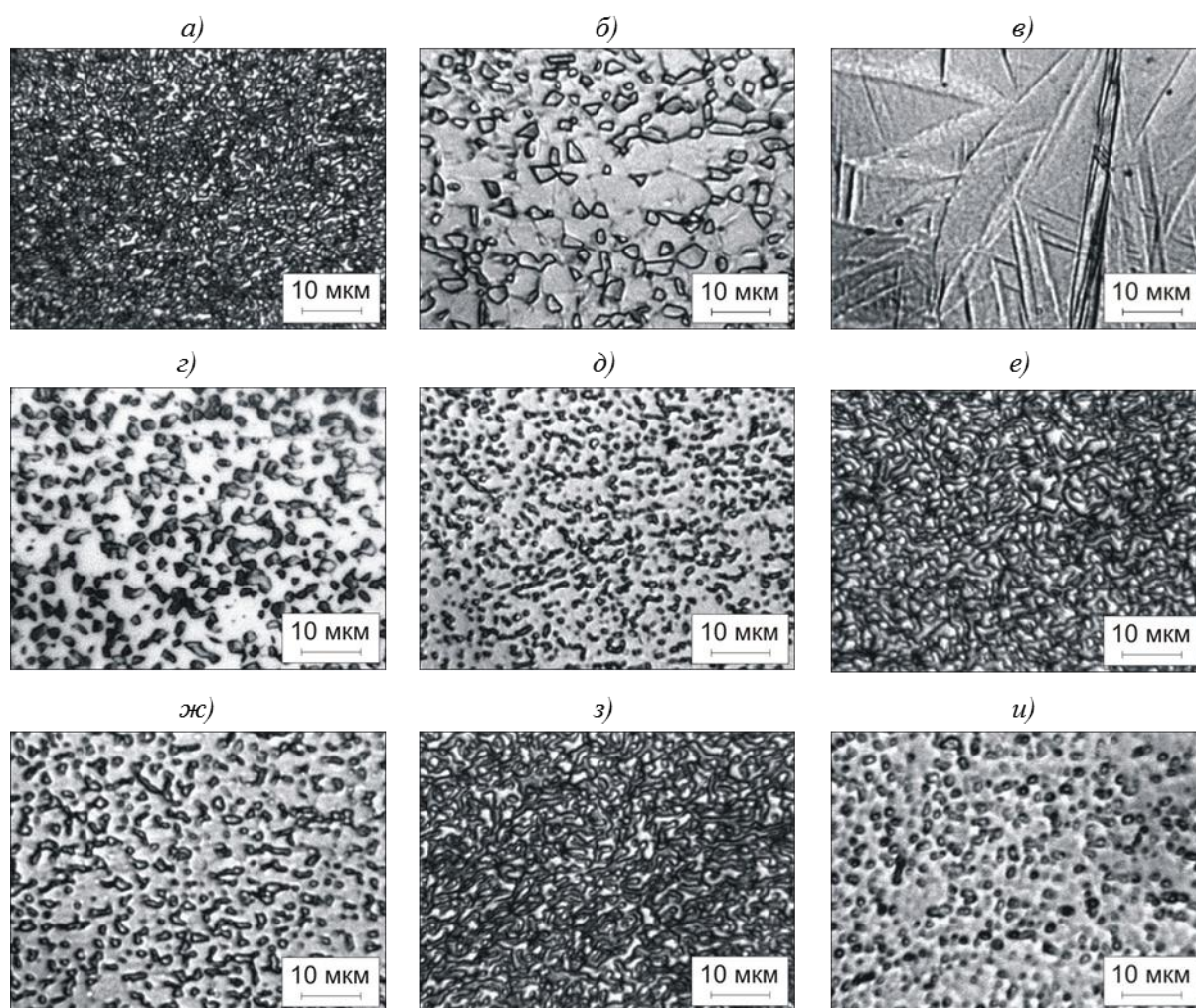
Уточнение фазового состава образцов до и после наводороживания проводили с помощью рентгенодифракционного фазового анализа на рентгеновском дифрактометре в излучении $\text{Cu } K_\alpha$. Локальный анализ химического состава наводороженных образцов определяли микрорентгеноспектральным методом.

Результаты

Существующие технологии производства конструкций из листовых полуфабрикатов высокопрочного титанового сплава ВТ23 сопряжены с обработкой давлением при высоких температурах, что требует специального оборудования и обязательной постобработки готовых изделий [10, 23, 25–28], так как длительное высокотемпературное воздействие воздушной среды сопровождается интенсивным окислением поверхности. Для решения задачи по выбору параметров холодной деформации сплава ВТ23 с использованием эффекта водородного пластифицирования необходимо знать закономерности фазо- и структурообразования в присутствии водорода при одновременной вариативности двух основных технологических параметров – концентрации вводимого водорода и температуры наводороживающего отжига. К настоящему времени наиболее полно исследованы особенности взаимодействия ($\alpha+\beta$)-сплавов с водородом для случая, когда при наводороживающем отжиге $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение полностью завершается [13, 16]. В связи с этим цель данной работы состояла в исследовании влияния водорода на фазово-структурное состояние сплава ВТ23 при комнатной температуре, когда наводороживающий отжиг проводился в ($\alpha+\beta$)-области [29, 30]. В целях научно обоснованного выбора режимов

наводороживания для реализации максимального пластифицирующего эффекта проведены исследования закономерностей фазо- и структурообразования на примере промышленных листов из сплава ВТ23 в состоянии поставки и после дополнительного легирования водородом до различных концентраций.

Листовой прокат из сплава ВТ23, изготовленный по промышленной технологии, поставляется после финишного одноступенчатого отжига при температурах $(\alpha+\beta)$ -области с охлаждением на воздухе – в данной работе состояние после отжига принято в качестве исходного. Отожженные по вышеуказанной схеме листы из сплава ВТ23 имели однородную хорошо проработанную двухфазную структуру с размером частиц первичной α^1 -фазы 0,3–0,6 мкм и объемной долей термодинамически стабильной β -фазы ~30% (см. рисунок, а).



Микроструктуры (оптическая микроскопия, $\times 1000$) образцов из листов сплава ВТ23 в исходном состоянии (а) и после наводороживающего отжига ($T_{н.о}$) при концентрации введенного водорода (C_H) в % (по массе):

б – $T_{н.о}=800^\circ\text{C}$, $C_H=0,1\%$; в – $T_{н.о}=800^\circ\text{C}$, $C_H=0,2\%$; г – $T_{н.о}=750^\circ\text{C}$, $C_H=0,1\%$; д – $T_{н.о}=750^\circ\text{C}$, $C_H=0,2\%$; е – $T_{н.о}=700^\circ\text{C}$, $C_H=0,1\%$; ж – $T_{н.о}=700^\circ\text{C}$, $C_H=0,2\%$; з – $T_{н.о}=650^\circ\text{C}$, $C_H=0,1\%$; и – $T_{н.о}=650^\circ\text{C}$, $C_H=1,0\%$

Согласно диаграмме состояния Ti–H, приведенной в работе [13] по результатам обобщения 17 публикаций, растворимость H в α -модификации титана (α -Ti) весьма

незначительна и изменяется от 0,002–0,0055% (по массе) при комнатной температуре и нормальном давлении до 0,15% (по массе) при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$, которая соответствует температуре эвтектоидного превращения. В β -модификации титана (β -Ti) твердый раствор внедрения водорода, напротив, обладает широкой областью гомогенности, которая увеличивается с ростом температуры, так как водород относится к эвтектоидообразующим β -стабилизаторам и существенно понижает температуру $(\alpha+\beta)/\beta$ -перехода (критическая точка A_{c3}) – это приводит к расширению температурного интервала существования β -фазы, содержащей водород. Интенсивное влияние водорода на стабилизацию β -фазы и соответствующее снижение критических точек сплава, легированного водородом, влечет инициирование $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения в течение процесса наводороживания.

При повышении температуры наводороживания в сплаве увеличивается количество β -фазы (при постоянной концентрации вводимого водорода). Кроме того, процессы укрупнения и роста частиц α -фазы интенсифицируются с ростом температуры, что отчетливо прослеживается по эволюции микроструктуры исследованных образцов, содержащих водород (см. рисунок, б–и). Так, после наводороживания при температуре 800°C до содержания 0,1% (по массе) H размер α -частиц увеличивается до 1,8–2,2 мкм (см. рисунок, б) по сравнению с исходным состоянием, в то время как при 650°C и той же концентрации H наблюдаемый размер α -частиц заметно меньше (см. рисунок, з). В табл. 2 приведены обобщенные сведения по влиянию температуры наводороживания на объемную долю β -фазы и размер частиц α -фазы в образцах из листов сплава VT23 при постоянном концентрационном параметре 0,1% (по массе) H.

Таблица 2

Изменение количества β -фазы и размера частиц α -фазы в зависимости от температуры наводороживающего отжига ($T_{н.о}$) при одинаковой концентрации вводимого водорода $C_H=0,1\%$ (по массе)

$T_{н.о}$, $^\circ\text{C}$	Объемная доля β -фазы, %	Средний размер частиц α -фазы, мкм
Состояние поставки	30	0,3–0,6
800	76	1,8–2,2
750	71	1,2–1,6
700	57	1,0–1,4
650	48	0,6–1,2

Анализ экспериментальных данных показывает, что рост концентрации H в образцах сопровождается монотонным уменьшением количества и размера частиц первичной α^1 -фазы и, соответственно, пропорциональным увеличением количества β -фазы (см. рисунок и табл. 2) вследствие протекания $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, вызванного влиянием водорода. Экспериментальные исследования показали, что дополнительное легирование образцов из сплава VT23 до концентраций: $>0,2\%$ (по массе) H – при температуре 800°C ; $0,3\%$ (по массе) H – при температуре 750°C и $0,4\%$ (по массе) H – при температуре 700°C , способствует полному завершению $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения и переходу сплава в однофазное β -состояние при соответствующей температуре наводороживающего отжига.

Одними из важных следствий, обусловленных присутствием атомов водорода, являются замедление диффузии компонентов сплава [31], а также перераспределение атомов легирующих элементов между α - и β -фазами вследствие изменения соотношения их объемных долей [32], что существенно влияет на характеристики и свойства фаз – в частности, пути их распада, деформируемость, стабильность структуры и склонность к упрочнению при термической и/или термомеханической обработках.

Уменьшение коэффициентов диффузии легирующих элементов сплава под действием растворенного водорода является следствием влияния квазионов водорода на исходную электронную концентрацию титана [33]. В то же время замедление диффузии атомов легирующих элементов в совокупности с ростом термодинамической стабильности β -фазы способствуют снижению критических скоростей охлаждения водородсодержащего материала. Вследствие этого, принимая во внимание большую разницу в коэффициентах диффузии водорода и основных элементов системы легирования, а также их взаимное влияние на интенсивность диффузии, следует рассматривать скорость охлаждения с температур наводороживающего отжига как параметр, определяемый, помимо прочих факторов, и концентрацией дополнительно введенного водорода.

Согласно данным работы [16], можно выделить две критические скорости охлаждения – первую ($V_{кр}^{(1)}$) и вторую ($V_{кр}^{(2)}$). При охлаждении титановых сплавов в наводороженном состоянии со скоростью больше $V_{кр}^{(1)}$ формируется структура первого типа, содержащая метастабильные мартенситные фазы α' или α'' в зависимости от коэффициента β -стабилизации сплава (системы легирования) и количества водорода, а после охлаждения со скоростью меньше $V_{кр}^{(2)}$ – структура второго типа, состоящая из смеси фаз равновесного состава – α_p и/или β_p . В интервале скоростей $V_{кр}^{(2)}-V_{кр}^{(1)}$ реализуются как диффузионный, так и бездиффузионный механизмы фазовых превращений, что приводит к неоднородности химического состава β -фазы и продуктов ее распада.

В проведенном эксперименте при охлаждении с температур наводороживающего отжига реализована скорость 1 К/с – увеличение скорости охлаждения ограничено конструктивными особенностями лабораторной установки Сивертса. Как отмечено ранее, водород заметно снижает критические скорости охлаждения – в частности, $V_{кр}^{(1)}$, которая соответствует протеканию мартенситных превращений. Так, при охлаждении наводороженных образцов из сплава ВТ23 с указанной скоростью в β -фазе вследствие подавления диффузии реализуется мартенситное превращение и при комнатной температуре структура сплава может быть представлена не только α - и β -фазами, но и небольшим количеством α'' -мартенсита. Если же процесс наводороживания заканчивается в β -области, т. е. вызванное влиянием водорода $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение доходит до завершения, то в структуре присутствуют β -фаза и мартенсит (см. рисунок, в), причем, чем больше содержание водорода, тем стабильнее β -фаза и тем меньшее количество мартенсита образуется в конечной структуре. Исключение составляет температура наводороживающего отжига 650°C, при которой с увеличением количества водорода происходит уменьшение объемной доли первичной α^I -фазы, однако даже при введении 1,0% (по массе) Н не удастся зафиксировать однофазное β -состояние (см. рисунок, и), хотя температура $(\alpha+\beta)/\beta$ -перехода снижается более чем на 250°C от критической точки A_{c3} для сплава в состоянии поставки (~920°C). Поэтому в процессе охлаждения с температуры 650°C до комнатной в образцах формируется структура, представленная преимущественно β - и α -фазами и небольшим количеством α'' -мартенсита.

Для двухфазных титановых сплавов, согласно закону сохранения массы, увеличение количества β -фазы должно неизбежно сопровождаться ее обеднением сосредоточенными в ней β -стабилизаторами, так как их общее количество в сплаве при наводороживании не изменяется и приходится уже на больший объем β -фазы – в результате концентрация β -стабилизаторов становится меньше. С другой стороны, пропорционально увеличению количества β -фазы уменьшается объемная доля α -фазы, в связи с чем последняя обогащается основным α -стабилизатором – алюминием.

Таблица 3

**Распределение легирующих элементов в β -фазе сплава ВТ23
в зависимости от температуры наводороживающего отжига ($T_{н.о}$)
и концентрации водорода (C_H)**

Технологические параметры наводороживающего отжига		Концентрация легирующих элементов в β -фазе, % (по массе)					
$T_{н.о}$, °С	C_H , % (по массе)	Al	V	Mo	Cr	Fe	Ti
Состояние поставки		2,80	9,80	4,20	1,90	1,30	Основа
800	0,1	3,80	5,90	2,40	1,32	0,78	
750	0,1	3,60	6,20	2,61	1,39	0,83	
700	0,1	3,40	7,40	2,95	1,54	0,99	
650	0,1	3,10	8,20	3,20	1,60	1,06	
650	0,2	3,40	7,50	2,83	1,49	0,97	

С целью установления влияния технологических параметров наводороживающего отжига на перераспределение легирующих элементов в β -фазе в листовых полуфабрикатах из сплава ВТ23 с помощью микрорентгеноспектрального анализа исследовали локальный химический состав микрообъемов β -фазы в образцах, наводороженных по различным режимам. В результате экспериментально подтверждено (табл. 3), что чем больше в структуре объемная доля β -фазы, тем меньше в ней содержание β -стабилизаторов и больше содержание алюминия.

Обсуждение и заключения

Полученные экспериментальные результаты подтверждают наличие широких возможностей по управлению фазо- и структурообразованием в титановом сплаве ВТ23 при дополнительном легировании его водородом путем термодиффузионного насыщения до концентраций 0,1–1,0% (по массе) H при различных температурах. Установлено, что для перевода сплава ВТ23 в однофазное β -состояние при температуре наводороживающего отжига необходимо ввести >0,2% (по массе) H при температуре 800°С, 0,3% (по массе) H – при 750°С и 0,4% (по массе) H – при 700°С, а наводороживание при температуре 650°С не позволяет достичь однофазной структуры даже при введении 1,0% (по массе) H.

Изменение температуры полного полиморфного превращения $(\alpha+\beta)/\beta$ и увеличение объемной доли β -фазы при температурах $(\alpha+\beta)$ -области при введении в сплав ВТ23 водорода способствуют существенному изменению степени легирования β -фазы основными элементами, входящими в состав химической композиции сплава. Так, увеличение количества водорода в сплаве, а соответственно, и в β -фазе приводит к уменьшению концентрации в ней β -стабилизаторов и к увеличению концентрации α -стабилизатора. В предельном случае, когда водород при данной температуре полностью стабилизирует β -фазу, содержание основных компонентов соответствует их исходной концентрации в сплаве.

Благодарности

Авторы выражают благодарность академику РАН А.А. Ильину, д.т.н., профессору С.В. Скворцовой и д.т.н., профессору А.М. Мамонову за помощь в получении и интерпретации экспериментальных результатов, обсуждение и критические замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Братухин А.Г. Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности. М.: Авиатехинформ, 2003. 440 с.
5. Воздвиженский В.М., Жуков А.А., Постнова А.Д., Воздвиженская М.В. Сплавы цветных металлов для авиационной техники. Рыбинск: РГАТА, 2002. 219 с.
6. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
7. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.06.2018).
8. Ильин А.А., Скворцова С.В., Спектор В.С., Лукина Е.А., Петров Л.М. Низкотемпературное вакуумное ионно-плазменное азотирование титановых сплавов разных классов // Технология легких сплавов. 2008. №3. С. 103–111.
9. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
10. Коллеров М.Ю., Ильин А.А., Филатов А.А., Мамаев В.С. Упрочняющая термическая обработка крупногабаритных полуфабрикатов и изделий из высокопрочных титановых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. №5. С. 14–17.
11. Колачев Б.А., Польшкин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. М.: ВИЛС, 2000. 318 с.
12. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1978. 392 с.
13. Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Водородная технология титановых сплавов / под общ. ред. А.А. Ильина. М: МИСиС, 2002. 392 с.
14. Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев Б.А. Водород в титане. М.: Металлургия, 1962. 246 с.
15. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
16. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994. 304 с.
17. Панин П.В., Манохин С.С., Дзунович Д.А. Получение и исследование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах при обратимом легировании водородом и пластической деформации // Вопросы материаловедения. 2016. №4 (88). С. 7–17.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Авиационные материалы: справочник в 13 т. 7-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 96 с.
20. Яковлев А.Л., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А., Ночовная Н.А. Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого» // Титан. 2013. №2 (40). С. 39–42.
21. Хорев А.И. Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения // Технология машиностроения. 2007. №7. С. 5–11.
22. Хорев А.И. Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами // Титан. 2006. №1 (18). С. 47–52.
23. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.

24. Проценко О.М., Карачевцев Ф.Н., Механик Е.А. Опыт разработки методики измерения содержания водорода в титановых сплавах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-8-8.
25. Колачев Б.А., Бецофен С.Я., Бунин С.Я., Володин В.А. Физико-механические свойства легких конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1995. 442 с.
26. Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
27. Ильин А.А., Скворцова С.В., Попова Ю.А., Куделина И.М. Влияние термической обработки на формирование структуры и свойств крупногабаритных полуфабрикатов из сплава ВТ23 // Титан. 2010. №4. С. 48–53.
28. Скворцова С.В., Попова Ю.А., Панин П.В., Грушин И.А., Курьшев Е.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава ВТ23 // Титан. 2011. №2. С. 16–21.
29. Панин П.В., Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б. Способы описания фазового состава титановых сплавов, дополнительно легированных водородом (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-3-3.
30. Панин П.В., Ширяев А.А., Дзунович Д.А. Построение температурно-концентрационной диаграммы фазового состава титанового сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом // Технология машиностроения. 2014. №3 (141). С. 5–9.
31. Ильин А.А., Мамонов А.М., Носов В.К., Майстров В.М. О влиянии водорода на диффузионную подвижность атомов металлической подрешетки β -фазы титановых сплавов // Металлы. 1994. №5. С. 99–103.
32. Ильин А.А., Михайлов Ю.В., Носов В.К., Майстров В.М. Влияние водорода на распределение легирующих элементов между α - и β -фазами в титановом сплаве ВТ23 // Физико-химическая механика материалов. 1987. №1. С. 112–114.
33. Назимов О.П., Ильин А.А., Коллеров М.Ю. О состоянии водорода в титане // Журнал физической химии. 1980. Т. 54. С. 2774–2777.