

А.Л. Яковлев<sup>1</sup>, Н.А. Ночовная<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЛИСТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23M\*

*Рассмотрено влияние термической обработки в зависимости от толщины листов (0,5 и 1,8 мм) на свойства листов из высокопрочного титанового сплава VT23M. Проведены испытания по определению механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ) в продольном и поперечном направлениях. Выбраны оптимальные режимы термической обработки тонких листов и проведены исследования микро- и макроструктуры листов, а также рентгеноструктурный фазовый анализ. Проведенные исследования позволили определить влияние толщины листов на свойства в продольном и поперечном направлениях.*

**Ключевые слова:** титановый сплав VT23M, термическая обработка, продольное направление, поперечное направление, VTMO, отжиг, старение, лист, прочность.

A.L. Yakovlev<sup>1</sup>, N.A. Nochovnaya<sup>1</sup>

## EFFECT OF HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF SHEETS OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY VT23M

*The influence of heat treatment and thickness parameters on the properties of sheets of high-strength titanium alloy VT23M have been considered. The mechanical tests for the properties determination (UTS, EL) have been carried out in longitudinal and transverse directions. There have been selected the optimal heat treatment modes of thin sheets. Micro-/macrostructure analysis as well as XRD analysis have been also accomplished. The obtained results allowed to determine the effect of sheets thickness on the properties in longitudinal and transverse directions.*

**Keywords:** titanium alloy VT23M, heat treatment, longitudinal direction, transverse direction, VTMO, annealing, ageing, sheet, ultimate tensile strength.

---

<sup>1</sup> Федеральное 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

Основными требованиями, предъявляемыми к самолетам нового поколения, являются повышенные ресурс и надежность их конструкций наряду с экономической эффективностью изготовления изделий. В этой связи одной из актуальных задач становится не только разработка новых материалов, но и создание энергосберегающих технологий их получения и термической обработки [1–3]. Одним из самых используемых видов полуфабрикатов являются листовые материалы, среди которых особое место занимают тонкие листы ( $\leq 2$  мм) из высокопрочных титановых сплавов [1, 4]. Такие материалы можно использовать в комплексе с углепластиковыми для обеспечения требуемого уровня эксплуатационных и технологических характеристик силовых элементов планера повышенного ресурса [5, 6].

---

\* Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований А.Ю. Соминой.

Ранее композиционные материалы изготавливались преимущественно на основе алюминия, но, несмотря на то, что алюминий легче титана – титан обладает более высокими технологическими свойствами. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) у титана ниже, чем у других конструкционных материалов: при 20°C он в 1,5 раза ниже, чем у железа, в 2 раза – чем у меди и почти в 3 раза – чем у алюминия [7–9]. Стоит также отметить, что титановые сплавы можно использовать как прослойку между алюминием и углепластиком, так как титановые сплавы в отличие от алюминиевых обладают высокой коррозионной стойкостью и нейтральны по отношению к углепластикам [2, 6, 8].

Одним из наиболее востребованных высокопрочных титановых сплавов является сплав ВТ23, который применяется в изделиях авиационной и ракетно-космической техники, а также для изготовления средств индивидуальной защиты (бронежилетов, касок), для спортивного и туристического инвентаря. Из сплава ВТ23 возможно изготовление всех типов полуфабрикатов: от фольги толщиной 0,08 мм до поковок сечением до 300 мм и штамповок массой до 3500 кг [10, 11]. Однако широкий диапазон легирования основными компонентами (например, 4,0–6,3% Al) может приводить к большому разбросу значений по механическим свойствам [12, 13]. На основе сплава ВТ23 создана его модификация – сплав ВТ23М с более узким диапазоном легирования и повышенным уровнем гарантированных свойств [14, 15].

### Методика проведения исследований

Исследования проведены на листах из сплава ВТ23М толщиной 0,5 мм и 1,8 мм, изготовленных в опытно-промышленных условиях и термообработанных по следующим режимам:

- отжиг при  $T_{п.п}$ -320°C;
- отжиг, закалка+старение;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -350°C;
- отжиг при  $T_{п.п}$ -250°C;
- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -350°C;
- закалка+старение.

Испытания при растяжении проводили на машине Roell Z400 при температуре 20°C по ГОСТ 11701–84. Анализ макроструктуры осуществляли на макрошлифах из листа, вырезанных в продольном направлении. Оценка макроструктуры проводилась визуально. Исследование микроструктуры проводили на травленном микрошлифе на оптическом микроскопе «VERSAMET».

Съемку образцов при рентгеноструктурном фазовом анализе проводили с применением дифрактометра D/MAX-2500 фирмы «Rigaku» с монохроматическим  $Cu K_{\alpha}$ -излучением. Диапазон сканирования – по углу  $2\theta$  при 20–100°C. Рабочий режим дифрактометра: напряжение 40 кВ, ток 200 мА, продолжительность экспозиции 2 с. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью специализированных программ Jade5 и базы данных PDF2.

### Результаты исследований

С целью оптимизации технологии термической обработки и выявления ее влияния на механические свойства и структуру образцов из титанового сплава ВТ23М в зависимости от толщины листов, были проведены испытания образцов при растяжении при 20°C. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Как следует из анализа полученных данных, на образцах толщиной 0,5 мм наиболее высокий уровень механических свойств получен после термической обработки по следующим режимам:

- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -350°C;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -350°C.

Исследование микро- и макроструктуры проводили на листах толщиной 0,5 и 1,8 мм после термической обработки по выбранным режимам. Макроструктура термообработанных листов толщиной 0,5 и 1,8 мм из высокопрочного титанового сплава BT23M идентична (рис. 1) – равноосная, без линий интенсивного течения и структурной анизотропии, соответствует 1-му баллу шкалы макроструктур титановых сплавов (ПИ 1.2.78509).

Таблица 1

Результаты испытаний при растяжении листов толщиной 0,5 мм

Режимы ТО	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
В исходном состоянии (после ВТМО)	1020	15,0
ВТМО+старение при: $T_{п.п}$ -400°C	1080–1120	10,5–12,0
$T_{п.п}$ -350°C	1020–1080	9,2–13,0
Отжиг при: $T_{п.п}$ -220°C	970–990	10,0–15,0
$T_{п.п}$ -150°C	930	10,0
Отжиг+старение при: $T_{п.п}$ -400°C	1260–1280	7,1–7,8
$T_{п.п}$ -350°C	1160–1180	10,0–14,0
Закалка+старение	1170–1290	0,1–3,5
Отжиг, закалка+старение	1340–1470	1,6–2,1



Рис. 1. Макроструктура листа из сплава BT23M толщиной 1,8 мм после обработки по режиму: ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -400°C

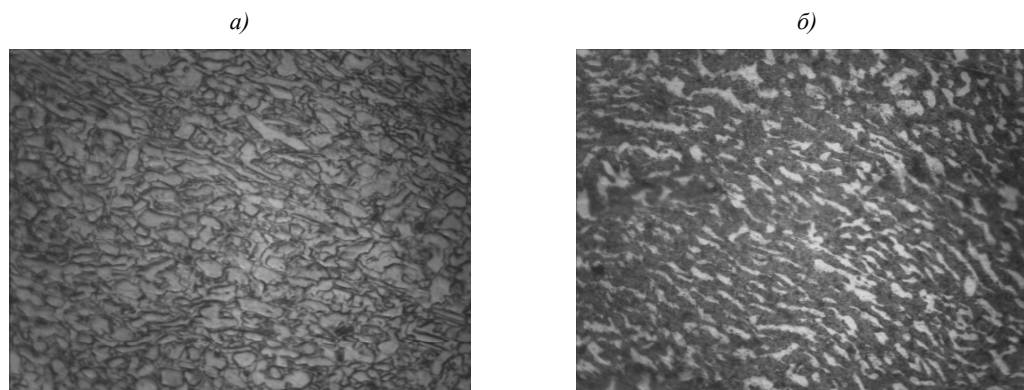


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 600$ ) листа из сплава BT23M толщиной 0,5 мм после обработки по режиму: а – ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -350°C; б – отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C

Анализ микроструктуры листов толщиной 0,5 мм из высокопрочного титанового сплава BT23M (рис. 2, а), термообработанных по режимам: ВТМО+старение при

$T_{п.п}$ -400°C и ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -350°C, показал, что микроstructures идентичны – глобулярного типа, соответствует 2-му типу 9-типной шкалы микроstructures для ( $\alpha$ + $\beta$ )-титановых сплавов (ПИИ 1.2.78509 «Металлографический анализ титановых сплавов»). Как и все титановые сплавы ( $\alpha$ + $\beta$ )-класса с глобулярной структурой сплав ВТ23М имеет высокую пластичность.

На рис. 2, б представлена микроstructure листа толщиной 0,5 мм из исследуемого сплава после термообработки по режиму: отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C. Микроstructure мелкозернистая с более вытянутыми (по сравнению с предыдущими образцами) зернами  $\alpha$ -фазы и элементами видманштеттовой структуры, соответствует 3-му типу 9-типной шкалы микроstructures для ( $\alpha$ + $\beta$ )-титановых сплавов (ПИИ 1.2.78509). Такая микроstructure должна обеспечивать высокий уровень характеристик работоспособности (МЦУ, СРТУ, КСУ, КСТ).

На листах из сплава ВТ23М толщиной 1,8 мм высокий комплекс механических свойств получен после термической обработки по следующим режимам:

- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -350°C;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -400°C;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}$ -350°C;
- закалка+старение;
- отжиг при  $T_{п.п}$ -220°C;
- отжиг при  $T_{п.п}$ -150°C.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Микроstructure листов толщиной 1,8 мм из сплава ВТ23М, термообработанных по указанным режимам, аналогична микроstructure листов толщиной 0,5 мм, однако зерна более компактных размеров (рис. 3, а). Такой тип микроstructures должен обеспечивать высокие характеристики сопротивления усталости [15, 16].

На рис. 3, б представлена микроstructure листов толщиной 1,8 мм из исследуемого сплава после термообработки по режиму: отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -350°C. Микроstructure идентична микроstructure листов толщиной 0,5 мм, термообработанных по режиму: отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C.

Таблица 2

**Результаты испытаний при растяжении листов толщиной 1,8 мм**

Режимы ТО	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
В исходном состоянии (после ВТМО)	1360	–
ВТМО+старение при: $T_{п.п}$ -400°C	1410–1420	2,8*–9,2
$T_{п.п}$ -350°C	1250–1260	6,7–8,8
Отжиг при: $T_{п.п}$ -220°C	1020–1060	10,5–12,5
$T_{п.п}$ -150°C	1000	16,0
Отжиг+старение при: $T_{п.п}$ -400°C	1190–1200	11,0
$T_{п.п}$ -350°C	1120	10,0–13,0
Закалка+старение	1290	5,9
Отжиг, закалка+старение	1190–1230	8,1–10,0

\* Дефектный образец.

Из результатов анализа микроstructures образцов толщиной 1,8 мм, термообработанных по режимам: отжиг при  $T_{п.п}$ -220°C и отжиг при  $T_{п.п}$ -150°C, следует, что структура образцов идентична – глобулярная, перекристаллизованная с мелкодисперсными выделениями  $\alpha$ -фазы, аналогична деформированному состоянию (рис. 3, в). Такой тип

структуры, как правило, не обеспечивает для ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов высоких прочностных характеристик, что и подтверждается данными о механических испытаниях – самая низкая прочность получена именно на листах, термообработанных по этим режимам.

При реализации режима термической обработки по режиму закалка+старение благодаря проведению ступенчатых обработок и длительному старению происходят рекристаллизационные процессы, сопровождающиеся ростом первичной  $\alpha$ -фазы, с образованием отдельных глобул размером  $>100$  мкм (рис. 3, *з*). Такая структура – наряду с повышением прочности – может привести к падению пластичности, что отчетливо видно на образцах толщиной  $\sim 0,5$  мм и чуть менее заметно на образцах толщиной  $\sim 1,8$  мм. Макроструктура после указанных режимов термической обработки является типичной для листовых полуфабрикатов из ( $\alpha+\beta$ )-сплавов [12, 17].

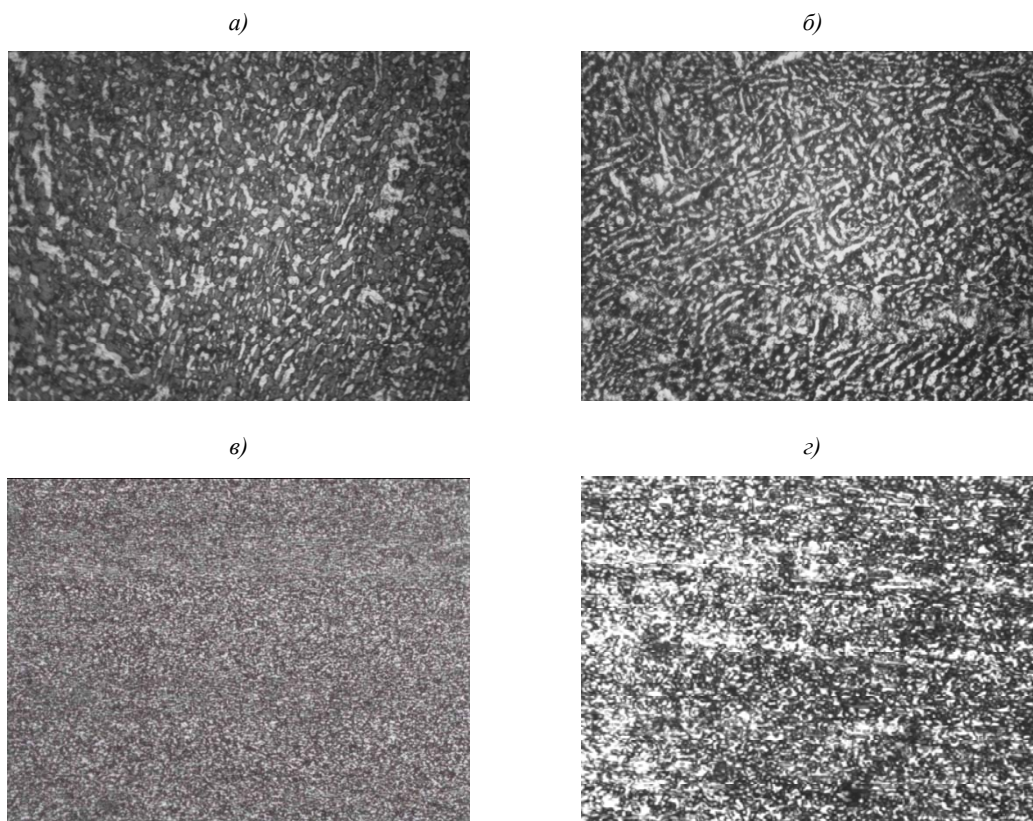


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 600$ ) листа из сплава ВТ23М толщиной 1,8 мм после обработки по режиму: *а* – ВТМО+старение при  $T_{п.п}-400^{\circ}\text{C}$ ; *б* – отжиг+старение при  $T_{п.п}-350^{\circ}\text{C}$ ; *в* – отжиг при  $T_{п.п}-220^{\circ}\text{C}$ ; *з* – закалка+старение

Исходя из анализа полученных результатов для дальнейших исследований выбраны следующие режимы термической обработки:

- отжиг+старение при  $T_{п.п}-400^{\circ}\text{C}$ ;
- отжиг+старение при  $T_{п.п}-350^{\circ}\text{C}$ ;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}-400^{\circ}\text{C}$ ;
- ВТМО+старение при  $T_{п.п}-350^{\circ}\text{C}$ .

Но следует отметить, что сплав ВТ23М является мало структурно чувствительным к термической обработке по различным режимам, так как структурно-фазовый состав в течение всех исследований менялся незначительно.

Дальнейшие исследования по определению фазово-структурного состава проводили на образцах по выбранным режимам термической обработки. В результате проведения рентгеноструктурного фазового анализа показано, что в образцах толщиной 0,5 мм

основные фазы: твердый раствор на основе  $\alpha$ -Ti с периодом решетки  $a=0,292$  нм;  $c=0,466$  нм;  $c/a=1,5959$  и твердый раствор на основе  $\beta$ -Ti с периодом  $a=0,3235$  нм.

При сравнительном анализе дифрактограмм образцов толщиной 0,5 мм наблюдается значительное несоответствие интенсивностей рентгеновских линий указанных фаз и интенсивностей линий бестекстурных порошковых эталонов, что свидетельствует о развитой текстуре по фазам  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti у всех образцов.

При проведении рентгеноструктурного анализа образцов толщиной 1,8 мм установлено, что основные фазы – твердый раствор на основе  $\alpha$ -Ti с гексагональной структурой и периодом  $a=0,292$  нм;  $c=0,466$  нм;  $c/a=1,5959$  и твердый раствор на основе  $\beta$ -Ti с кубической структурой и периодом  $a=0,319$  нм.

В образцах листа толщиной 1,8 мм параметр  $a$  для  $\beta$ -Ti ниже ( $a=0,319$  нм), чем в образцах листа толщиной 0,5 мм ( $a=0,3235$  нм), что показывает вероятное присутствие в сплаве  $\beta$ -фазы различного состава. Для более четкого определения фазового состава требуются дополнительные исследования.

По результатам рентгеноструктурного фазового исследования установлено, что в листах из сплава ВТ23М отсутствуют фазы, отрицательно влияющие на механические свойства материала, такие как фазы Лавеса.

Для подтверждения корректности выбора оптимальных режимов термообработки (ТО) определены механические характеристики ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ) на образцах из сплава ВТ23М в продольном и поперечном направлениях.

В табл. 3 представлены результаты испытаний при растяжении образцов из листов сплава ВТ23М толщиной 0,5 мм в продольном и поперечном направлениях при 20°C, а в табл. 4 – результаты аналогичных испытаний для листов толщиной 1,8 мм.

Таблица 3

**Результаты испытаний при растяжении образцов из листов сплава ВТ23М толщиной 0,5 мм в продольном (Д) и поперечном (П) направлениях**

Режим термической обработки	$\sigma_b$ , МПа		$\delta$ , %	
	Д	П	Д	П
ВТМО+старение при:				
$T_{п.п.}-400^\circ\text{C}$	1100	1030	11,25	6,2
$T_{п.п.}-350^\circ\text{C}$	1050	1025	11,1	6,05
Отжиг+старение при:				
$T_{п.п.}-400^\circ\text{C}$	1270	1265	7,45	6,0
$T_{п.п.}-350^\circ\text{C}$	1170	1240	12,0	8,3

Таблица 4

**Результаты испытаний при растяжении образцов из листов сплава ВТ23М толщиной 1,8 мм в продольном (Д) и поперечном (П) направлениях**

Режим термической обработки	$\sigma_b$ , МПа		$\delta$ , %	
	Д	П	Д	П
ВТМО+старение при:				
$T_{п.п.}-400^\circ\text{C}$	1415	1270	9,2	7,4
$T_{п.п.}-350^\circ\text{C}$	1255	1295	7,75	7,4
Отжиг+старение при:				
$T_{п.п.}-400^\circ\text{C}$	1195	1255	11,0	7,1
$T_{п.п.}-350^\circ\text{C}$	1120	1250	11,5	7,0

По результатам исследования анизотропии механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ) видно, что уровень прочности на образцах в продольном и поперечном направлениях на листах обеих толщин приблизительно одинаковый, однако уровень относительного удлинения ниже в поперечном направлении, чем в продольном в среднем на 30%, что является типичным для образцов с текстурированной структурой. На листах толщиной 0,5 мм

более высокие значения прочности получены после термической обработки по режимам: отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -400°C и отжиг+старение при  $T_{п.п}$ -350°C.

В дальнейших работах планируется изучить влияние выбранных режимов термической обработки на характеристики СРТУ, МЦУ, КСУ и КСТ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. М.: Машиностроение. 1979. 228 с.
2. Минаков В.Н., Хорев А.И., Шигонова О.П. Влияние термической обработки на тонкую структуру сплава ВТ23. М.: ОНТИ ВИАМ. 1983. С. 65–68.
3. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю. Перспективы разработки новых титановых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». 2011. С. 60–67.
4. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия. 1974. 368 с.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 226–230.
6. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
7. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия. 1979. 509 с.
8. 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.
9. Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р., Добаткина Т.В. Совместное влияние некоторых переходных металлов на изменение фазового состава и рекристаллизацию алюминия //Технология легких сплавов 2009. №2. С. 20–28.
10. Хорев А.И. Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами //Титан. 2006. №1(18). С. 47–52.
11. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.
12. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
13. Логачев И.А., Разумовский В.И., Разумовский И.М., Косырев К.Л., Логачева А.И. Разработка теоретической процедуры оценки сбалансированности химического состава жаропрочного титанового сплава нового поколения и создание на этой основе методики оптимизации составов титановых сплавов //Титан. 2012. №4 (38). С. 27–32.
14. Хорев А.И. Основные научные и практические направления повышения стабильности механических свойств ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности /В сб. Тi–2010 в СНГ. Екатеринбург. 2010. С. 227–235.
15. Хорев А.И. Разработка теоретических и практических основ повышения конструкционной прочности титановых сплавов путем комплексного легирования и микролегирования /В сб. Тi–2007 в СНГ. Ялта. 2007. С. 226–234.
16. Ночовная Н.А., Анташев В.Г., Ширяев А.А., Алексеев Е.Б. Исследование влияния режимов изотермического деформирования и термообработки на структуру и механические свойства опытного жаропрочного Тi-сплава //Технология легких сплавов 2012. №4. С. 92–99.
17. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 206–212.

#### REFERENS LIST

1. Horev A.I. Kompleksnoe legirovanie i termomehanicheskaja obrabotka titanovykh spлавov [Complex alloying and thermomechanical processing of titanic alloys]. М.: Mashinostroenie. 1979. 228 s.

2. Minakov V.N., Horev A.I., Shigonova O.P. Vlijanie termicheskoj obrabotki na tonkiju strukturu splava VT23 [Influence of heat treatment on thin structure of an alloy of BT23]. M.: ONTI VIAM. 1983. S. 65–68.
3. Antashev V.G., Nochovnaja N.A., Shirjaev A.A., Izotova A.Ju. Perspektivy razrabotki novyh titanovyh splavov [Prospects of development of new titanic alloys] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». Spec. vyp. «Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii». 2011. S. 60–67.
4. Glazunov S.G., Moiseev V.N. Titanovye splavy. Konstrukcionnye titanovye splavy [Titanic alloys. Constructional titanic alloys]. M.: Metallurgija. 1974. 368 s.
5. Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F., Sidel'nikov V.V., Shestov V.V. Sloistye metallopolimernye kompozicionnye materialy [Layered metal-polymer composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 226–230.
6. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyyh, berillievyyh i aljuminievyyh splavov [Strategy of development of titanic, magnesium, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
7. Cvikker U. Titan i ego splavy [Titan and his alloys]. M.: Metallurgija. 1979. 509 c.
8. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
9. Rohlin L.L., Bochvar N.R., Dobatkina T.V. Sovmestnoe vlijanie nekotoryh perehodnyh metallov na izmenenie fazovogo sostava i rekristallizaciju aljuminija [Joint influence of some transitional metals on change of phase structure and aluminum recrystallization] //Tehnologija legkih splavov 2009. №2. S. 20–28.
10. Horev A.I. Titanovyj splav VT23 i ego sravnenie s luchshimi zarubezhnymi splavami [Titanic alloy of BT23 and its comparison with the best foreign alloys] //Titan. 2006. №1(18). S. 47–52.
11. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva [Titanic alloys. Composition, structure, properties]: Spravochnik. M.: VILS–MATI. 2009. 520 s.
12. Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trunin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [Calculated values of characteristics of durability of aviation materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 14–16.
13. Logachev I.A., Razumovskij V.I., Razumovskij I.M., Kosyrev K.L., Logacheva A.I. Razrabotka teoreticheskoj procedury ocenki sbalansirovannosti himicheskogo sostava zharoprochnogo titanovogo splava novogo pokolenija i sozdanie na jetoj osnove metodiki optimizacii sostavov titanovyh splavov [Development of theoretical procedure of an assessment of balance of a chemical composition of a heat resisting titanic alloy of new generation and creation on this basis of a technique of optimization of structures of titanic alloys] //Titan. 2012. №4 (38). S. 27–32.
14. Horev A.I. Osnovnye nauchnye i prakticheskie napravlenija povyshenija stabil'nosti mehanicheskikh svojstv ( $\alpha+\beta$ )-titanovyh splavov vysokoj i sverhvysokej prochnosti [The main scientific and practical directions of increase of stability of mechanical properties ( $\alpha+\beta$ )-titanium alloys of high and ultrahigh durability] /V sb. Ti–2010 v SNG. Ekaterinburg. 2010. S. 227–235.
15. Horev A.I. Razrabotka teoreticheskikh i prakticheskikh osnov povyshenija konstrukcionnoj prochnosti titanovyh splavov putem kompleksnogo legirovanija i mikrolegirovanija [Development of theoretical and practical bases of increase of constructional durability of titanic alloys by a complex alloying and a microalloying] /V sb. Ti–2007 v SNG. Jalta. 2007. S. 226–234.



16. Nochovnaja N.A., Antashev V.G., Shirjaev A.A., Alekseev E.B. Issledovanie vlijanija rezhimov izotermicheskogo deformirovanija i termoobrabotki na strukturu i mehanicheskie svojstva opytnogo zharoprochnogo Ti-splava [Research of influence of modes of isothermal deformation and heat treatment on structure and mechanical properties of a skilled heat resisting Ti-alloy] //Tehnologija legkih splavov 2012. №4. S. 92–99.
17. Horev A.I., Nochovnaja N.A., Jakovlev A.L. Mikrolegirovanie redkozemel'nymi metallami titanovyh splavov [Microalloying rare-earth metals of titanic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 206–212.