



УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-2-2

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРУТКОВ  
ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT41**

О.С. Кашапов

*кандидат технических наук*

Т.В. Павлова

А.Р. Истракова

В.С. Калашников

**Март 2015**

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.

*О.С. Кашапов<sup>1</sup>, Т.В. Павлова<sup>1</sup>, А.Р. Истракова<sup>1</sup>, В.С. Калашиников<sup>1</sup>*

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРУТКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT41**

*Проведено исследование структуры и механических свойств прутков из жаропрочного псевдо- $\alpha$ -титанового сплава VT41 с различным содержанием железа. Установлено, что увеличение содержания железа приводит к модифицированию микроструктуры, повышению прочностных характеристик и долговечности материала, снижению характеристик пластичности, ударной вязкости и жаропрочности. Повышение содержания железа сопровождается повышением чувствительности к концентратору напряжений при различных видах испытаний.*

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы, механические свойства, структура, химический состав.

*O.S. Kashapov, T.V. Pavlova, A.R. Istrakova, V.S. Kalashnikov*

## **AN EFFECT OF IRON CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF BARS MADE OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY VT41**

*The paper describes the studies focused on structure and mechanical properties of bars made from heat-resistant near- $\alpha$ -titanium alloy VT41 with different iron contents. It was established that an increase in Fe content leads to modification of microstructure, an increase in strength and fatigue characteristics of the material and to a decrease in ductility characteristics, fracture toughness and heat resistance. In addition, rising of Fe content is accompanied by an increase of sensitivity to stress concentrators at different types of tests.*

**Keywords:** heat-resistant titanium alloys, mechanical properties, structure, chemical composition.

---

<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

## Введение

ВИАМ представляет одну из старейших научных школ России в области металлургии титановых сплавов применительно к изделиям авиационной техники [1–6]. Вопрос о влиянии эвтектоидных  $\beta$ -стабилизаторов на механические свойства жаропрочных титановых сплавов неоднократно рассматривался как в отечественных, так и в зарубежных научных публикациях. Общепринято, что содержание таких элементов, как железо и никель в жаропрочных титановых сплавах следует ограничивать, что обусловлено их отрицательным влиянием на характеристики жаропрочности. Наиболее часто в этой связи упоминаются работы зарубежных авторов [7–9], в которых основательно исследовалось влияние содержания примеси железа на жаропрочные характеристики деформированных полуфабрикатов из сплавов Ti-1100, Ti-6242S и Ti-6246. Полученные для этих сплавов выводы нельзя в полной мере распространить на сплав ВТ41, так как рассматриваемый сплав имеет более сложную композицию и, соответственно, различается по фазовому составу и химическому составу фаз по сравнению со сплавами, перечисленными выше. Для промышленных жаропрочных псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов разработки ЦНИИ КМ «Прометей» [10, 11] подобных исследований не проводилось.

В данной работе рассмотрено влияние содержания железа в пределах от 0,06 до 0,125% (по массе) на механические свойства, микроструктуру и фазовый состав прутков из сплава ВТ41.

## Материалы и методы

Исследования проводили на прутках, полученных ковкой слитка, при температурах однофазной области с последующей прокаткой при температурах  $(\alpha+\beta)$ -области до диаметра 18–22 мм. Типичная микроструктура прутков после прокатки приведена на рис. 1.

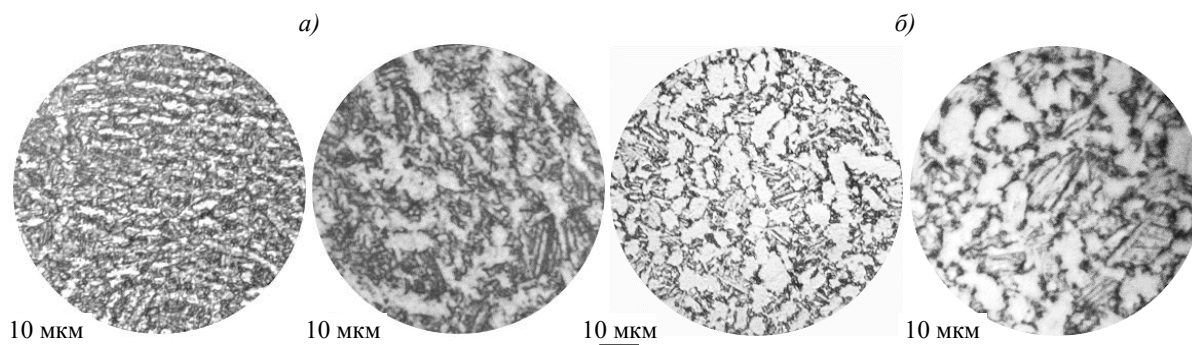


Рис. 1. Микроструктура прутков из сплава ВТ41 после деформации с содержанием железа 0,12–0,125 (а) и 0,06–0,064% (по массе) (б)

Структура прутков после деформации в обоих случаях – мелкозернистая, глобулярно-пластинчатого типа. Термическую обработку прутков проводили по двум режимам:

- двойной отжиг по принятому для сплава ВТ41 режиму [12];
- упрочняющая термическая обработка (УТО), заключающаяся в закалке в воде от температур верхней границы двухфазной области с последующим старением при температуре 700°С.

По химическому составу все плавки соответствовали требованиям технических условий на сплав ВТ41 и близки к номинальным значениям по содержанию основных элементов и примесей (кислорода и азота). Пробы для определения химического состава отбирали из литниковой и донной частей слитков. Анализ микроструктуры материала проводили по ПИ1.2.785–2009. Определение механических свойств осуществляли по стандартным методикам (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145, ГОСТ 25.502).

### Результаты

Микроструктура прутков после термической обработки приведена на рис. 2. При изучении структуры прутков из сплава ВТ41 с различным содержанием железа в отожженном и термоупрочненном состояниях методом оптической микроскопии при различных увеличениях было выявлено, что объемная доля первичной  $\alpha$ -фазы в рассмотренных случаях составляет приблизительно 30–35%. В отожженном состоянии толщина пластин вторичной  $\alpha$ -фазы в прутках с содержанием железа 0,12–0,125% (по массе) значительно меньше, чем в прутках с содержанием железа 0,06–0,064% (по массе) (см. рис. 2, а, в).

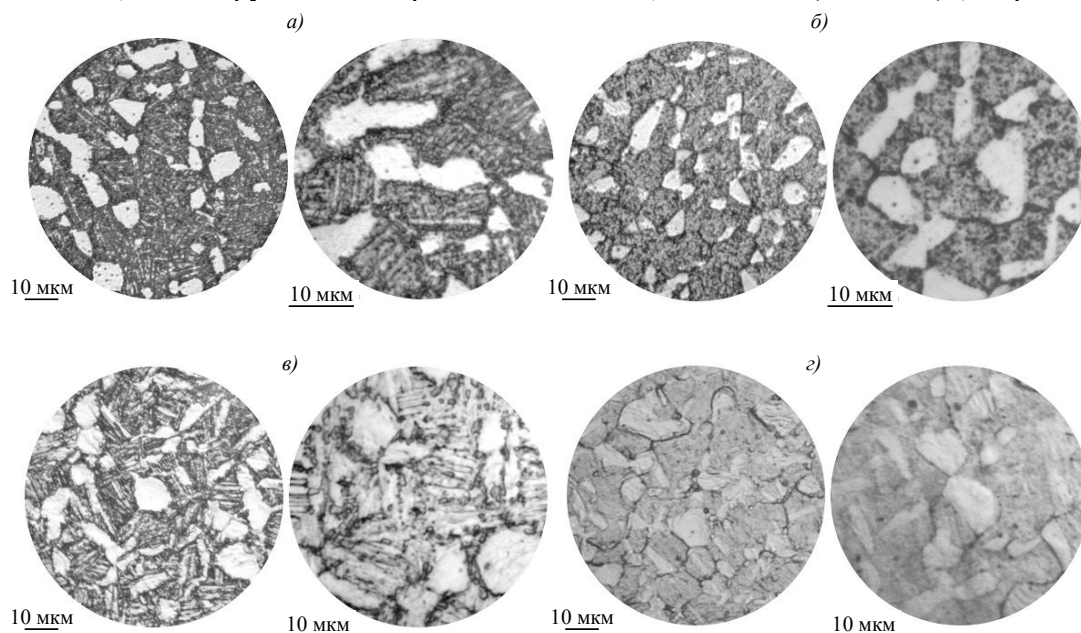


Рис. 2. Микроструктура прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,12–0,125 (а, б) и 0,06–0,064% по массе (в, г) в отожженном состоянии (а, в) и после термической обработки (б, г)

Механические и усталостные свойства прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,12–0,125% (по массе) в зависимости от режима термической обработки приведены в табл. 1 и 2, с содержанием железа 0,06–0,064% (по массе) – в табл. 3 и 4.

Таблица 1

**Механические свойства прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,12–0,125% (по массе)**

Вид термической обработки	$\sigma_B^{20^\circ}$ , МПа	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$
Двойной отжиг	1145–1190	13,6–16,8	24,9–34,3	13–14	680–715	255	70
УТО	1335–1350	5,8–9,7	12,5–19,0	15–17	685–735	245	–

Таблица 2

**Усталостные свойства прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,12–0,125% (по массе)**

Вид термической обработки	МнЦУ <sub>гл</sub> /МнЦУ <sub>н</sub> (при $N=2 \cdot 10^7$ цикл, $r=0,5$ мм)	МЦУ <sub>гл</sub> /МЦУ <sub>н</sub> (при $N=10^4$ цикл, $r=0,25$ мм)
	МПа	
Двойной отжиг	550/195	1030/490

Таблица 3

**Механические свойства прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,06–0,065% (по массе)**

Вид термической обработки	$\sigma_B^{20^\circ}$ , МПа	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$
Двойной отжиг	1010–1035	16,5–22,0	36,0–41,2	18–22	635–665	275	100
УТО	1100–1140	11,5–16,5	23,0–30,5	20–23	685–720	255	–

Таблица 4

**Усталостные свойства прутков из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,06–0,065% (по массе)**

Вид термической обработки	МнЦУ <sub>гл</sub> /МнЦУ <sub>н</sub> (при $N=2 \cdot 10^7$ цикл, $r=0,5$ мм)	МЦУ <sub>гл</sub> /МЦУ <sub>н</sub> (при $N=10^4$ цикл, $r=0,25$ мм)
	МПа	
Двойной отжиг	510/235	960/460

### Обсуждение и заключения

Исследование показало, что снижение содержания железа с 0,125 до 0,06% (по массе) в прутках из сплава ВТ41 в отожженном состоянии приводит к изменению параметров глобулярно-пластинчатой микроструктуры (укрупнению пластинок превращенной  $\alpha$ -фазы), снижению прочностных характеристик и возрастанию характеристик пластичности и жаропрочности. Вместе с тем чувствительность материала к концентратору напряжений при различных видах испытаний со снижением содержания железа также снижается.

После упрочняющей термической обработки (УТО) характер изменения прочностных и пластических характеристик остается неизменным, при этом влияние содержания железа на жаропрочность менее выражено. Это связано с различием механизма превращения  $\beta \rightarrow \alpha$  при высокотемпературном отжиге и УТО: в первом случае превалирует диффузионный механизм превращения, а во втором – превращение происходит по мартенситному механизму с образованием  $\alpha'$ -фазы. Как известно, железо обладает наибольшим коэффициентом ликвации среди элементов, стабилизирующих  $\beta$ -фазу [13–17], что и обуславливает «модифицирующее» воздействие этого элемента на дисперсность превращенной  $\alpha$ -фазы.

В случае УТО, при старении происходит распад мартенсита  $\alpha'$  на дисперсную смесь ( $\alpha + \beta$ ) (рис. 3) и толщина пластинок вторичной  $\alpha$ -фазы определяется режимом старения.

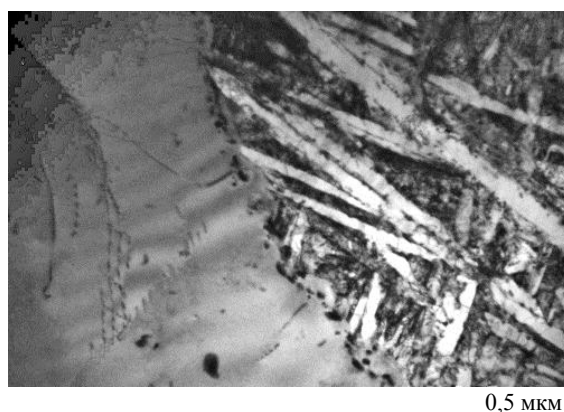


Рис. 3. Микроструктура сплава ВТ41 после закалки и старения (ПЭМ, светлопольное изображение)

Результаты исследования свидетельствуют о значительном влиянии на параметры структуры и механические свойства прутков из сплава ВТ41 содержания железа в исследованном диапазоне концентраций. Необходимо принять во внимание то обстоятельство, что объектом исследования являются катаные прутки малого диаметра с относительно малым размером  $\beta$ -зерна, что является дополнительным фактором, усиливающим описываемый эффект от изменения содержания железа.

Обобщая результаты данного исследования и результаты, полученные в работах [7–9], следует отметить, что изменение характеристик жаропрочности в сплаве ВТ41 происходит аналогично наблюдаемым в псевдо- $\alpha$ - и ( $\alpha+\beta$ )-сплавах марок Ti-1100, Ti-6242S и Ti-6246. С увеличением содержания  $\beta$ -стабилизаторов «чувствительность» сплавов к содержанию железа снижается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
4. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
6. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
7. Titanium-base alloy: патент EP 87 30 5197, опубл. 01.06.1988. Applicant Inventor Bania Paul J. – Timet, Europe, USA.
8. Russo P.A., Yu K.O. Effect of Ni, Fe and primary alpha on the creep of alpha-beta processed and annealed Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo–0,09Si /In: Titanium-99. Science and technology. 1999. P. 596–603.
9. Russo P.A., Yu K.O. Effect of Ni, Fe and Si on the creep of Ti–6Al–2Sn–4Zr–6Mo /In: Titanium-99. Science and technology. 1999. P. 713–720.
10. Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В., Лысенко Л.В., Травин В.В. Оптимизация комплекса служебных свойств титановых сплавов марок 5В и 37 для узлов и деталей энергетического оборудования //Титан. 2010. №4. С. 23–30.

11. Травин В.В., Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Козлова И.Р. Ползучесть псевдо-альфа-титановых сплавов и ее влияние на напряженно-деформированное состояние деталей паровых турбин //Титан. 2013. №2. С. 4–12.
12. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
13. Способ термической обработки высокопрочных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.
14. Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011.
15. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Metallurgia. 1992. 352 с.
16. Хорев А.И. Перспективные направления повышения конструкционной прочности титановых сплавов //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 144–153.
17. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей и узлов авиакосмической техники //Сварочное производство. 2009. №3. С. 13–23.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija she-stogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions forming the sixth technological order] //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. S. 3–9.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements - materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
4. Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaja N.A., Pavlova T.V. Sostojanie, problemy i perspektivy sozdaniya zharoprochnyh titanovyh splavov dlja detalej GTD [Status, problems and prospects of creating heat-resistant titanium alloys for GTE parts] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 02 (viam-works.ru).
5. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytaniya i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 440–448.
6. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij uklad [Sixth technological way] //Наука и жизнь!. 2010. №4. S. 2–7.

7. Titanium-base alloy: патент EP 87 30 5197, опубл. 01.06.1988. Applicant Inventor Bania Paul J. – Timet, Europe, USA.
8. Russo P.A., Yu K.O. Effect of Ni, Fe and primary alpha on the creep of alpha-beta processed and annealed Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo–0,09Si /In: Titanium-99. Science and technology. 1999. P. 596–603.
9. Russo P.A., Yu K.O. Effect of Ni, Fe and Si on the creep of Ti–6Al–2Sn–4Zr–6Mo /In: Titanium-99. Science and technology. 1999. P. 713–720.
10. Ivanova L.A., Kudrjavcev A.S., Chudakov E.V., Lysenko L.V., Travin V.V. Optimizacija kompleksa sluzhebnyh svojstv titanovyh splavov marok 5V i 37 dlja uzlov i detalej jenergeticheskogo oborudovanija [Optimization of complex service properties of titanium alloys brands 5V and 37 units and parts of the power equipment] //Titan. 2010. №4. S. 23–30.
11. Travin V.V., Ivanova L.A., Kudrjavcev A.S., Kozlova I.R. Polzuchest' psevido-al'fa-titanovyh splavov i ee vlijanie na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie detalej parovyh turbin [Creep pseudo-alpha titanium alloys and its influence on the stress-strain state of parts of steam turbines] //Titan. 2013. №2. S. 4–12.
12. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Effect of heat treatment on the structure and properties of heat-resistant titanium alloy blades for HPC] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
13. Sposob termicheskoj obrabotki vysokoprochnyh ( $\alpha+\beta$ )-titanovyh splavov [A method of heat treatment of high ( $\alpha + \beta$ ) alloy titanitic]: pat. 2465366 Ros. Federacija; opubl. 15.09.2011.
14. Sposob termomehanicheskoj obrabotki izdelij iz titanovyh splavov [Method of thermomechanical processing of titanium alloys]: pat. 2457273 Ros. Federacija; opubl. 05.04.2011.
15. Horev A.I., Belov S.P., Glazunov S.G. Metallovedenie titana i ego splavov [Physical metallurgy of titanium and its alloys]. M.: Metallurgija. 1992. 352 s.
16. Horev A.I. Perspektivnye napravlenija povyshenija konstrukcionnoj prochnosti titanovyh splavov [Promising ways to improve the structural strength of titanium alloys] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №2. S. 144–153.
17. Horev A.I. Razrabotka konstrukcionnyh titanovyh splavov dlja izgotovlenija detalej i uzlov aviakosmicheskoj tehniki [Development of structural titanium alloys for the manufacture of parts and components of aerospace engineering] //Svarochnoe proizvodstvo. 2009. №3. S. 13–23.