



УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-1-1

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПОКОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО
ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ41**

О.С. Кашипов

кандидат технических наук

Т.В. Павлова

А.Р. Истракова

В.С. Калашиников

Октябрь 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. Кашапов¹, Т.В. Павлова¹, А.Р. Истракова¹, В.С. Калашиников¹

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT41

Проведено исследование структуры и механических свойств поковок из жаропрочного псевдо- α -титанового сплава VT41 с различным содержанием железа. Установлено, что увеличение содержания железа приводит к повышению прочностных характеристик материала в интервале рабочих температур при некотором снижении характеристик пластичности и ударной вязкости. 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

EFFECT OF IRON CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF FORGINGS FROM HEAT-RESISTANCE TITANIUM ALLOY VT41

The structure and mechanical properties of forgings from heat-resistant near- α -titanium alloy VT41 with different iron content are examined in this paper. It has been established that the increase in the iron content leads to the increase in strength properties of the material in the working temperature range and some decrease in characteristics of ductility and toughness. Increasing the iron content is accompanied with increased sensitivity to stress concentrators under different types of tests.

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

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

Введение

Продолжено исследование влияния содержания железа на свойства сплава ВТ41, проведенное на материале катаных прутков, результаты которого изложены в статье [1]. В предлагаемой работе рассмотрено влияние содержания железа в пределах от 0,052–0,061 до 0,11–0,121% (по массе) на механические свойства поковок из сплава ВТ41.

Материалы и методы

Исследования проводили на поковках $\varnothing(200\text{--}335)\times(35\text{--}45)$ мм (рис. 1). Поковки изготавливали из слитков ковкой при температурах β -области, всесторонней ковкой мерных заготовок при температурах $(\alpha+\beta)$ -области и окончательной осадкой со степенью деформации 60–75% в изотермических условиях при температурах $(\alpha+\beta)$ -области, для сплава с повышенным содержанием железа – штамповкой на прессе с несколькими промежуточными подогревами (толщина сечения штамповки 30–42 мм) со степенью деформации 35–40% при каждой осадке. После деформации поковки отжигали по режиму двойного отжига [2, 3], для плавки с повышенным содержанием железа температура второй ступени отжига была увеличена на 30°C. Химический состав слитков сплава ВТ41 соответствует требованиям ОСТ 1 90013 «Сплавы титановые. Марки».

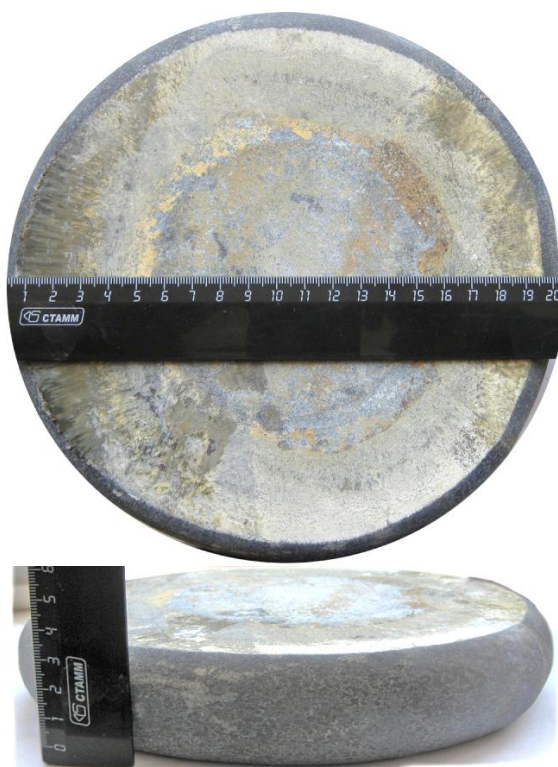


Рисунок 1. Внешний вид поковки из сплава ВТ41

Уровень легирования сплава ВТ41, выраженный в структурных эквивалентах по алюминию и молибдену [4], а также содержание элементов внедрения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровень легирования сплава ВТ41 в структурных эквивалентах по алюминию и молибдену и содержание элементов внедрения

Условный номер плавки	Содержание Fe, % (по массе)	$T_{пл.}$, °С	[Al] _{экв}	[Mo] _{экв}	Содержание легирующих элементов, % (по массе)		
			%		Si	C	O
1	0,052–0,061	1025±5	8,87	1,98	0,32–0,35	0,025	0,1
2	0,11–0,121	1015±5	8,78	2,19	0,29–0,33	0,01	0,08

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

Макроструктура поковок обеих плавков матового фона с зернами 4–5 балла по 10-балльной шкале макроструктур титановых сплавов. Микроструктура материала в хордовом сечении поковок после термической обработки приведена на рис. 2.

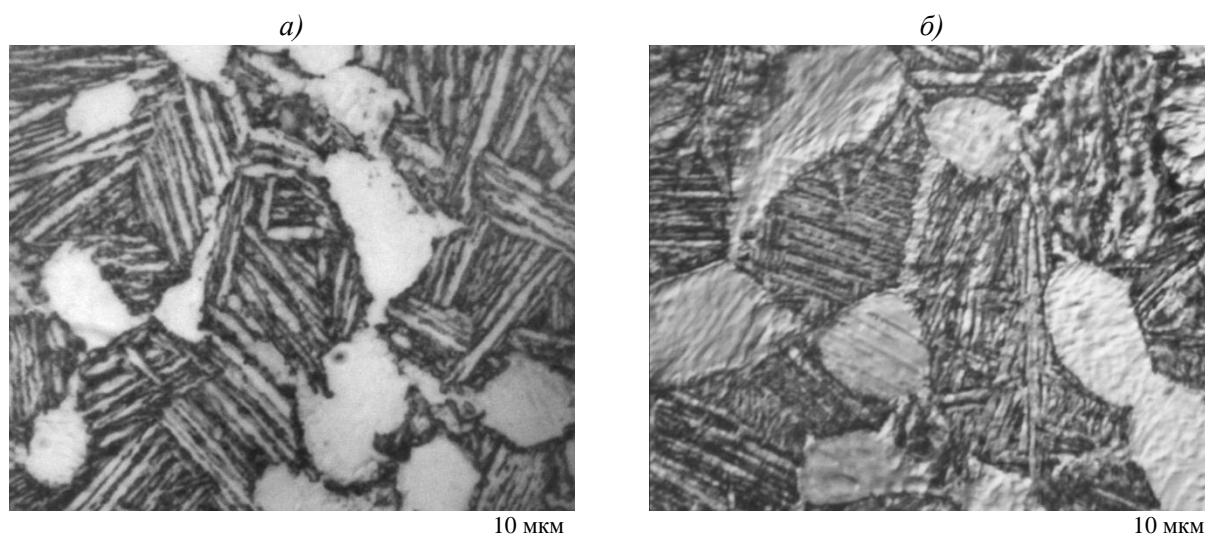


Рисунок 2. Микроструктура (оптическая микроскопия) поковок из сплава ВТ41 с содержанием железа 0,052–0,061 (а) и 0,11–0,121% (по массе) (б)

В обоих случаях микроструктура материала глобулярно-пластинчатая, объемная доля первичной α -фазы в поковке с минимальным содержанием железа составила 26,3–31,2%, с максимальным содержанием железа: 18,2–25,4%. Как и в случае с прут-

ками [5], дисперсность пластин вторичной α -фазы при повышении содержания железа значительно возрастает. Механические свойства поковок приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Механические свойства поковок из сплава ВТ41 при комнатной температуре

Условный номер плавки	Содержание Fe, % (по массе)	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ	КСТ
		МПа		%		Дж/см ²	
1	0,052–0,061	1055–1115	935–975	7,9–12,8	11,6–22,0	18–23	2,5–4,1
2	0,11–0,121	1085–1165	985–1060	8,9–12,2	12,3–20,4	24–31*	7,8–10,2*

* Штамповка диска.

Таблица 3

Механические свойства поковок из сплава ВТ41 при высоких температурах

Условный номер плавки	Содержание Fe, % (по массе)	$\sigma_B^{550^\circ}$	$\sigma_B^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{550^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{600^\circ}$
		МПа				
1	0,052–0,061	705–785	655–725	460–480	295	98–117
2	0,11–0,121	810–840	735–780	475–510	315–335	117–127*

* Штамповка диска.

Таблица 4

Малоцикловая усталость поковок из сплава ВТ41

Условный номер плавки	Содержание Fe, % (по массе)	МЦУ: σ_{max} , МПа (при $N=10^4$ циклов; $R=-0,1$; $f=1$ Гц)	
		гладких образцов	образцов с надрезом ($r=0,25$ мм)
1	0,052–0,061	1040	440
2	0,11–0,121	1065*	460*

* Штамповка диска.

Обсуждение и заключения

По результатам исследования показано, что снижение содержания железа с 0,11 до 0,061% (по массе) в поковках из сплава ВТ41 в отожженном состоянии приводит к изменению параметров глобулярно-пластинчатой микроструктуры (укрупнению пластинок превращенной α -фазы) и снижению прочностных характеристик материала. В данном случае также имеет место «модифицирующее» воздействие этого элемента на дисперсность превращенной α -фазы [5–8]. Полученные результаты аналогичны результатам исследования прутков из сплава ВТ41 [1]. Однако для материала поковок с более крупным β -зерном (по сравнению с прутками), увеличение содержания железа на характеристики пластичности и чувствительности к надрезу влияния практически не оказывает. Более высокие характеристики ударной вязкости можно объяснить большей объемной долей вторичной α -фазы в структуре материала поковок с высоким содержанием железа, а также снижением температуры полного растворения силицидов для данной плавки [9]. По данным табл. 3 видно, что с повышением прочности при увеличении содержания железа возрастает жаропрочность материала поковок из сплава ВТ41 (различием в содержании кремния в 0,02–0,04%, а также других легирующих элементов можно пренебречь).

Обобщая результаты данного исследования с работами [1, 10–12] следует отметить, что изменение характеристик жаропрочности в сплаве ВТ41 в зависимости от содержания железа происходит аналогично изменениям, наблюдаемым в псевдо- α - и ($\alpha+\beta$)-сплавах Ti1100, Ti6242S и Ti6246, но только при определенных текстурном и структурно-фазовом состояниях. Для поковок с относительно крупнозернистой структурой увеличение содержания железа в исследованном интервале не приводит к снижению жаропрочности материала. Вероятно, это обусловлено большей степенью легирования β -фазы в сплаве ВТ41 (нейтральными упрочнителями и изоморфными β -стабилизаторами). Необходимо также отметить, что модифицирующее воздействие железа на структуру литого и деформированного материала подтвердилось в процессе исследования новой композиции псевдо- α -сплава [13], выполненного в соответствии со стратегическими направлениями развития авиационных материалов [14]. Использование небольших добавок железа как элемента, модифицирующего структуру и повышающего прочностные характеристики псевдо- α -титановых сплавов определенных композиций, не требует каких-либо изменений в существующей технологии и значительно снижает стоимость производства полуфабрикатов по сравнению с другими способами повышения прочности и служебных характеристик металлических материалов (например, термомеханической обработкой, микролегированием РЗМ и т. д.) [15–19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Влияние содержания железа на механические свойства прутков из жаропрочного титанового сплава ВТ41 //Труды ВИАМ. 2015. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
2. 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.
3. Кашапов О.С., Павлова Т.В. Исследование влияния параметров структуры полуфабрикатов из сплава ВТ41 на механические свойства //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №2. С. 136–143.
4. Pyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents /In: Titanium–99. Science and technology. 1999. P. 53–60.
5. Способ термической обработки высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.

6. Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011.
7. Хорев А.И. Теоретические и практические основы повышения конструкционной прочности современных титановых сплавов //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 144–153.
8. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей и узлов авиакосмической техники //Сварочное производство. 2009. №3. С. 13–23.
9. Кашапов О.С. Кинетика изменения микроструктуры прутковой лопаточной заготовки из сплава ВТ41 в зависимости от температурно-временных параметров термической обработки //Перспективные материалы. 2008. №5. С. 137–140.
10. Titanium-base alloy: pat. 87 30 5197 EP; publ. 01.06.1988.
11. 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.
12. 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.
13. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №S5. С. 73–80.
14. 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.
15. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
16. 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).
17. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
18. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А., Беляев М.С. Современные титановые сплавы и технологии, применяемые для деталей и узлов ГТД /В сб. тезисов докладов науч.-технич. конгресса по двигателестроению «Двигатели–2012». М.: АССАД. 2012. С. 347–349.

19. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.

REFERENCES LIST

1. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Vlijanie sodержaniya zheleza na mehanicheskie svojstva prutkov iz zharoprochnogo titanovogo splava VT41 [Influence of the content of iron on mechanical properties of bars from heat resisting BT41 titanium alloy] //Trudy VIAM. 2015. №3. St. 02 (viam-works.ru).
2. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Influence of modes of thermal processing on structure and property of heat resisting titanium alloy for KVD blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
3. Kashapov O.S., Pavlova T.V. Issledovanie vlijaniya parametrov struktury polufabrikatov iz splava VT41 na mehanicheskie svojstva [Research of influence of parameters of structure of semi-finished products from alloy BT41 on mechanical properties] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. 2015. №2. S. 136–143.
4. Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents /In: Titanium–99. Science and technology. 1999. P. 53–60.
5. Sposob termicheskoj obrabotki vysokoprochnyh ($\alpha+\beta$)-titanovyh splavov [Way of thermal processing high-strength ($\alpha +\beta$)-titanium alloys]: pat. 2465366 Ros. Federacija; opubl. 15.09.2011.
6. Sposob termomehanicheskoj obrabotki izdelij iz titanovyh splavov [Way of thermomechanical processing of products from titanium alloys]: pat. 2457273 Ros. Federacija; opubl. 05.04.2011.
7. Horev A.I. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy povyshenija konstrukcionnoj prochnosti sov-remennyh titanovyh splavov [Theoretical and practical bases of increase of constructional durability of modern titanium alloys] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №2. S. 144–153.
8. Horev A.I. Razrabotka konstrukcionnyh titanovyh splavov dlja izgotovlenija detalej i uzlov aviakosmicheskoj tehniki [Development of structural titanium alloys for manufacturing of details and nodes of aerospace equipment] //Svarochnoe proizvodstvo. 2009. №3. S. 13–23.

9. Kashapov O.S. Kinetika izmenenija mikrostruktury prutkovoj lopatochnoj zagotovki iz splava VT41 v zavisimosti ot temperaturno-vremennyh parametrov termicheskoj obrabotki [Kinetics of change of microstructure of bar scapular preparation from alloy BT41 depending on temperature and time parameters of thermal processing] //Perspektivnye materialy. 2008. №5. S. 137–140.
10. Titanium-base alloy: pat. 87 30 5197 EP; publ. 01.06.1988.
11. 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.
12. 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.
13. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Povyshenie prochnostnyh harakteristik zharoprochnyh psevdo- α -titanovyh splavov [Increase of strength characteristics heat resisting psevdo- α -titanovykh alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №S5. C. 73–80.
14. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
15. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij uklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. №4. S. 2–7.
16. 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 modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
17. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovaniya shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
18. Pavlova T.V., Kashapov O.S., Nochovnaja N.A., Beljaev M.S. Sovremennye titanovye splavy i tehnologii, primenjaemye dlja detalej i uzlov GTD [Modern titanium alloys and the technologies applied to details and GTD nodes] /V sb. tezisov dokladov nauch.-

tehnič. kongressa po dvigatelestroeniju «Dvigateli–2012». M.: ASSAD. 2012. S. 347–349.

19. Horev A.I., Belov S.P., Glazunov S.G. Metallovedenie titana i ego splavov [Metallurgical science of titanium and its alloys]. M.: Metallurgija. 1992. 352 s.