

# Сопоставление прочностных свойств жаропрочных титановых сплавов при повышенных температурах\*

Егорова Ю.Б., Мамонов И.М.

Ступинский филиал Московского авиационного института (национального исследовательского университета)  
г. Ступино Московской обл., Российская Федерация  
[egorova\\_mati@mail.ru](mailto:egorova_mati@mail.ru), [mamonovim@mati.ru](mailto:mamonovim@mati.ru)

Давыденко Л.В.

Московский политехнический университета,  
г. Москва, Российская Федерация  
[mami-davidenko@mail.ru](mailto:mami-davidenko@mail.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты статистических исследований прочностных свойств прутков из жаропрочных титановых сплавов при температурах испытания 20-600°C. Проведено сопоставление химического состава сплавов по эквивалентам по алюминию и молибдену, а также предела прочности при различных температурах. Установлены регрессионные зависимости для оценки средних значений прочностных свойств от температуры испытания, содержания кремния, эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену.

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы, прутки, эквиваленты по алюминию и молибдену, прочностные свойства, статистические исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РФ разработано несколько сотен опытных титановых композиций, при этом в промышленности применяется более 50 марок титановых сплавов разного назначения, из них – около 10 сплавов для работы при температурах до 600°C [1, 2]. Жаропрочные сплавы создавались преимущественно на основе α-фазы с небольшим количеством β-фазы (≤10%), поэтому по фазовому составу они относятся к псевдо α- и α+β-классам. В табл. 1 титановые сплавы расположены в порядке возрастания содержания β-стабилизаторов.

О возможности работы титановых сплавов при повышенных температурах можно судить, прежде всего, по

зависимости кратковременных прочностных свойств от температуры. Для теоретической оценки предела прочности α-, псевдо α- и α+β-титановых сплавов разных классов при комнатной температуре можно использовать соотношение [3, 4]:

$$\sigma_B = 380 + 65[Al]_{экв}^{cmp} + 45[Mo]_{экв}^{cmp}, \quad (1)$$

где  $[Al]_{экв}^{cmp}$  – структурный эквивалент α-стабилизаторов и нейтральных упрочнителей по алюминию;  $[Mo]_{экв}^{cmp}$  – структурный эквивалент β-стабилизаторов по молибдену [2]. Однако для жаропрочных сплавов необходима корректировка соотношения (1), так как структурные эквиваленты не учитывают влияние кремния, который является обязательным легирующим компонентом. Это обусловлено тем, что кремний относится к элементам, которые имеют большой параметр размерного несоответствия с титаном. Это приводит к блокировке дислокаций при достаточно высоких температурах, а также препятствует их переползанию и поперечному скольжению. Содержание кремния должно быть ограничено пределом его растворимости в α-фазе, так как силициды не приводят к повышению жаропрочности, но сильно снижают пластичность и технологичность сплавов. В жаропрочных титановых сплавах содержание кремния ограничено пределами 0,15-0,4%.

Таблица 1

Номинальный состав и рабочая температура жаропрочных титановых сплавов [2, 5-15]

№ пп	Класс сплава	Сплав	Химический состав	Максимальная рабочая температура, °C
1	Псевдо α	BT18	7,7Al-0,6Mo-11,0Zr-0,75Nb-0,12Si	550-600
2		BT18Y	Ti-6,5Al-2,5Sn-4Zr-1Nb-0,7Mo-0,15Si	550-600
3		BT20	Ti-6,5Al-1Mo-1V-2Zr-0,15Si	450-500
4		BT41	Ti-6,2Al-1,2Mo-4,0Sn-3,3Zr-1,2Nb-0,35Si-0,5W-0,1Fe	550-600
5	α+β	BT25	Ti-6,5Al-1,5Sn-4Zr-2Mo-1W-0,15Si	500-550
6		BT9	Ti-6,5Al-3Mo-1,5Zr-0,25Si	500-550
7		BT36	Ti-6,2Al-2,1Sn-3,6Zr-0,7Mo-5,0W-0,15Si	550-600
8		BT8	Ti-6,5Al-3,3Mo-0,3Si	450-500
9		BT8-1	Ti-6,5Al-3,5Mo-1,2Sn-1,2Zr-0,2Si	450-500
10		BT8M	Ti-6,3Al-3,3Mo-1,0Sn-1,0Zr-0,15Si	450-500
11		BT8M-1	Ti-5,5Al-3,8Mo-1,2Sn-1,2Zr-0,18Si	400-450
12		BT46	Ti-6,0Al-2,0Mo-3Sn-0,8V-0,25Fe-2,5Zr-0,7Nb-0,2Si-0,05C-0,1O	500-550
13		BT25Y	Ti-6,5Al-1,8Sn-3,8Zr-4Mo-1W-0,2Si	500-550
14		BT3-1	Ti-6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si	400-450

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2020), <https://rusmetalcon.susu.ru>

Эквивалент по алюминию  $[Al]_{экв}^{cmp}$  характеризует термическую стабильность сплавов и определяется по соотношению [2]:

$$[Al]_{экв}^{cmp} = \%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10[\%O + \%C + 2\%N], \quad (2)$$

За критерий термической стабильности принято сохранение образцами пластичности не менее  $\delta=10\%$  и  $\psi=20\%$  после их выдержки под напряжением 246 МПа при температуре 540 °С [2]. Сплавы теряют термическую стабильность из-за выделения  $\alpha_2$ -фазы ( $Ti_3Al$ ) при  $[Al]_{экв}^{cmp} \geq 9\%$ , поэтому структурный эквивалент по алюминию иногда называют коэффициентом термостабильности [5]. Эквивалент по молибдену  $[Mo]_{экв}^{cmp}$  характеризует стабильность  $\beta$ -фазы и определяется по соотношению [2]:

$$[Mo]_{экв}^{cmp} = \%Mo + \%Ta/4,5 + \%Nb/3,3 + \%W/2 + \%V/1,4 + \%Cr/0,6 + \%Mn/0,6 + \%Fe/0,4 + \%Ni/0,8. \quad (3)$$

Кремний является  $\beta$ -стабилизатором, но не влияет на количество и стабильность  $\beta$ -фазы в промышленных титановых сплавах и поэтому не учитывается в формуле (3).

Цель работы состояла в сопоставлении жаропрочных титановых сплавов на основе оценки предела прочности в зависимости от температуры испытания и химического состава, выраженного через эквиваленты по алюминию и молибдену, с учетом содержания кремния.

#### ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходными данными для исследований послужили результаты экспериментов, опубликованные в различных источниках с 1960-х по 2019 годы. В основном были использованы результаты исследований ВИАМ, приведенные в статьях, справочниках и монографиях [5-15, 17-23]. Степень легирования сплавов оценивали с помощью эквивалентов по алюминию и молибдену по соотношениям (2), (3). Статистические исследования были

проведены с помощью ППП “STATISTICA” и включали корреляционно-регрессионный анализ с доверительной вероятностью 0,95 по стандартным методикам [16].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав жаропрочных сплавов в эквивалентах по алюминию и молибдену приведен на рис. 1. Наблюдается тенденция к снижению эквивалента легирующих элементов по алюминию с увеличением их эквивалента по молибдену. Из рис. 1 следует, что содержание легирующих элементов для сплавов, работающих при температурах до 400-450 °С, не должно превышать  $[Mo]_{экв}^{cmp} \approx 3,5-6,5\%$  и  $[Al]_{экв}^{cmp} \approx 7,0-7,5\%$ ; для сплавов, работающих до 450-500 °С –  $[Mo]_{экв}^{cmp} \approx 1,5-4,5\%$  и  $[Al]_{экв}^{cmp} \approx 7,5-8,5\%$ ; до 500-550 °С –  $[Mo]_{экв}^{cmp} \approx 2,5-4,5\%$  и  $[Al]_{экв}^{cmp} \approx 8,5-9,0\%$ ; до 550-600 °С –  $[Mo]_{экв}^{cmp} \approx 1,0-2,5\%$  и  $[Al]_{экв}^{cmp} \approx 8,5-9,0\%$ . Оценить средние значения эквивалентов для оптимизации состава сплавов можно по соотношению:  $[Al]_{экв}^{cmp} = 9,53 - 0,4[Mo]_{экв}^{cmp}$ .

Наиболее жаропрочными сплавами при температурах 550-600 °С считают VT18 и VT41. Однако на практике сплав VT18 не применяют из-за низкой технологичности, а сплав VT41 находится на стадии промышленного освоения [12]. Высокие прочностные свойства последнего сплава обусловлены применением многокомпонентного легирования, которое приводит к образованию карбидной фазы на основе вольфрама и дополнительному упрочнению  $\alpha$ -твердого раствора железом, введенному в пределах растворимости [12, 15, 21, 22]. Наиболее жарочными серийными сплавами являются VT18У и VT25У [23].

Анализ опубликованной литературы показал, что прочностные и жаропрочные свойства титановых сплавов сильно зависят от вида полуфабриката, технологических режимов термической обработки, типа и параметров структуры, колебаний марочного состава (табл. 2).

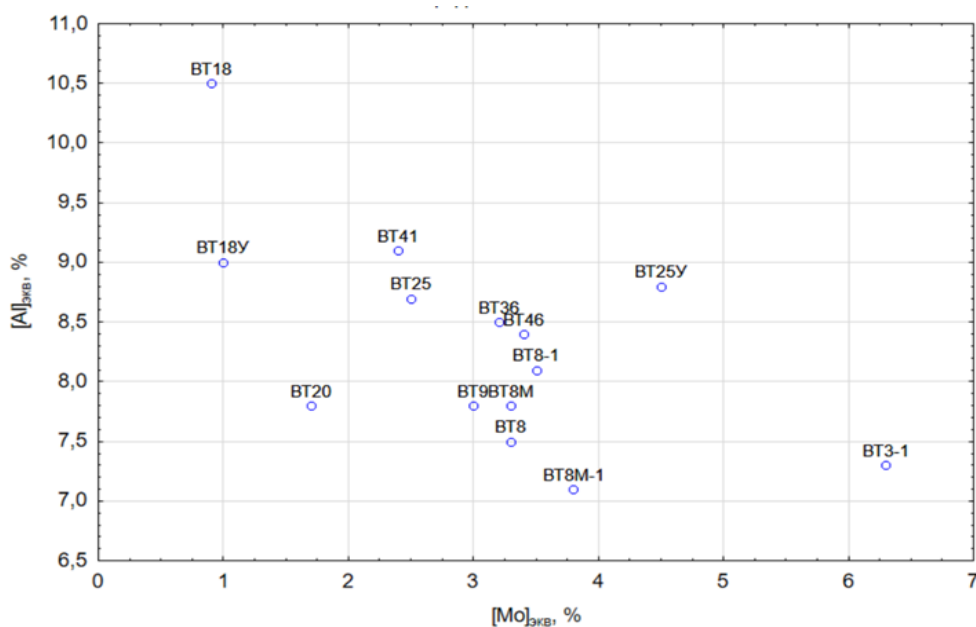


Рис. 1. Химический состав жаропрочных титановых сплавов в координатах  $[Al]_{экв}^{cmp} - [Mo]_{экв}^{cmp}$

Механические свойства различных полуфабрикатов из жаропрочных титановых сплавов

Сплав	Полуфабрикат (отжиг)	Предел прочности, МПа, при температурах, °С				Литература
		20	500	550	600	
BT18Y	Пруток 20 мм, Si=0,1-0,12%	935-1010	-	-	510-600	[17]
	Штамповка диска	915-1015	600-700	560-650	-	[15, 18]
	Поковки массой до 50 кг	910-1100	-	-	≥560	[20]
BT46	Прутки	1170-1250	770-850	-	-	[13]
	Поковки 15-25 кг	1080-1165	760-830	730-810	625-740	[23]
BT41	Прутки 45 мм	1030-1180	730-830	630-750	-	[12, 15, 18,19]
	Поковки массой до 220 кг	1078-1192	-	-	675-755	
	Прутки 18-22 мм, Fe=0,06%	1010-1035	-	-	635-665	[21]
	Прутки 18-22 мм, Fe=0,12%	1145-1190	-	-	680-715	
	Поковка, Fe=0,05-0,06%	1055-1115	-	705-785	655-725	[22]
	Поковка, Fe=0,11-0,12%	1085-1165	-	810-840	735-780	

Например, абсолютный разброс свойств однотипных полуфабрикатов может достигать 100-150 МПа как при комнатной, так и при повышенной температурах (см. табл. 2). Колебания содержания железа в пределах марочного состава (0,06-0,12% м.) для сплава BT41 приводят к размаху  $\Delta\sigma_b=100-180$  МПа. Для некоторых сплавов литературные данные по механическим свойствам крайне противоречивы и требуют уточнения. Поэтому на первом этапе на основе обобщения опубликованных сведений были проанализированы температурные зависимости предела прочности различных полуфабрикатов (прутков, листов, поковок) после стандартного отжига.

Для зависимости прочностных свойств от температуры обычно применяют экспоненциальный закон, предложенный Курнаковым Н.С. [6]:

$$\sigma_b = \sigma_0 e^{-bT}, \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  – свободный член, характеризующий сопротивление деформации, экстраполированное до 0 К;  $b$  – температурный коэффициент.

Для каждого сплава был проведен регрессионный анализ с использованием экспоненциальной зависимости (4) и полинома 3 степени (5):

$$\sigma_b = \sigma_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3. \quad (5)$$

После этого было проведено сопоставление реальных и регрессионных значений предела прочности, которое показало, что соотношение (4) справедливо только в довольно узком интервале температур ~100÷400 °С. В исследуемом интервале температур 20-600 °С для большинства сплавов лучшее приближение дает полином 3 степени. Коэффици-

енты регрессии модели (5) для прутков из различных сплавов, статистическая ошибка  $S$  оценки предела прочности и коэффициент корреляции  $R$  приведены в табл. 3.

На втором этапе была проанализирована зависимость предела прочности различных полуфабрикатов от эквивалентов по алюминию и молибдену, а также содержания кремния (0,15-0,35%) при различных температурах (табл. 4). При комнатной температуре увеличение эквивалентов по алюминию и молибдену на 1,0% приводит к повышению предела прочности в среднем на ~60 МПа и ~50МПа, что сопоставимо с соотношением (1). Коэффициент упрочнения кремнием 234 МПа/% м. близок к литературным данным 120-300 МПа/% м. [2]. С повышением температуры влияние кремния на прочность усиливается до 500-600 МПа/% м. при 200-500 °С. По данным работы [17] степень упрочнения кремнием сплава BT18Y при комнатной температуре и при 600 °С приблизительно одинакова и равна 400-500 МПа/% м., в то время как для сплава Ti-8-1-1 сильно отличается и соответствует 150 МПа/% м. (при 20 °С) и 410 МПа/% м. (при 600°С). Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что чем больше  $\alpha$ -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей в сплаве, тем выше прочностные свойства, причем степень их влияния на прочность сохраняется вплоть до температур 600 °С. С повышением температуры влияние  $\beta$ -стабилизаторов на прочность сплавов заметно снижается, и при температуре 600 °С предел прочности возрастает в среднем на ~12 МПа при увеличении эквивалента по молибдену на 1,0 % м (табл. 4).

Таблица 3

Параметры полиномиальной модели 3-й степени (5) для теоретической оценки предела прочности прутков из жаропрочных титановых сплавов в интервале температур 20-600 °С

№ пп	Сплав	$[Mo]_{экв}^{emp}$ %	$[Al]_{экв}^{emp}$ %	$\sigma_0$ , МПа	$b_1$	$b_2$	$b_3$	R	S, МПа
1	BT18	0,9	10,5	1135	-1,256	0,0030	$3,234 \cdot 10^{-6}$	0,97	53
2	BT18Y	1,0	9,0	1061	-1,887	0,0045	$-4,155 \cdot 10^{-6}$	0,93	60
3	BT20	1,7	7,8	1088	-3,345	0,0105	$-1,105 \cdot 10^{-5}$	0,98	34
4	BT41	2,4	9,1	1161	-2,085	0,0061	$-6,664 \cdot 10^{-6}$	0,98	46
5	BT25	2,5	8,7	1121	-0,789	0,0021	$-3,255 \cdot 10^{-6}$	0,98	50
6	BT9	3,0	7,8	1187	-1,470	0,0034	$-3,881 \cdot 10^{-6}$	0,99	40
8	BT36	3,2	8,5	1102	-0,920	0,0011	$1,453 \cdot 10^{-6}$	0,99	33
9	BT8	3,3	7,5	1129	-1,329	0,0030	$-3,530 \cdot 10^{-6}$	0,99	33
10	BT46	3,4	8,4	1200	-1,172	0,0029	$-4,012 \cdot 10^{-6}$	0,99	26
11	BT25Y	4,5	8,8	1190	-1,501	0,0039	$-4,512 \cdot 10^{-6}$	0,99	49
12	BT3-1	6,3	7,3	1097	-1,771	0,0045	$-5,251 \cdot 10^{-6}$	0,99	28

Результаты регрессионного анализа зависимости предела прочности прутков от химического состава жаропрочных титановых сплавов при различных температурах

№	Температура испытания, °С	Регрессионная модель	R	S*
1	20	$\sigma_b=386 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +50[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +234 \cdot Si$	0,92	56
2	100	$\sigma_b=299 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +45[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +369 \cdot Si$	0,94	58
3	200	$\sigma_b=215 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +45[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +497 \cdot Si$	0,94	57
4	300	$\sigma_b=167 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +42[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +590 \cdot Si$	0,95	60
5	400	$\sigma_b=120 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +40[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +495 \cdot Si$	0,95	51
6	500	$\sigma_b=86 +60[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +30[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +475 \cdot Si$	0,96	48
7	600	$\sigma_b=52 +58[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +12[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} +372 \cdot Si$	0,95	45

Примечание: \*S – статистическая ошибка модели.

Таким образом, по мере повышения степени легирования  $\alpha$ -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями жаропрочные свойства сплавов повышаются и сохраняются при более высоких температурах. Однако необходимо учитывать, что при этом одновременно может снижаться термическая стабильность сплавов с  $[Al] \geq 9\%$ .

#### Выводы

1. Проведено сопоставление жаропрочных титановых сплавов по химическому составу, выраженному через эквиваленты по алюминию и молибдену. Это дает возможность обосновать оптимальные составы новых сплавов и оценить их прочностные свойства при различных температурах эксплуатации.

2. На основе статистических исследований получены математические зависимости наиболее типичных значений предела прочности прутков из жаропрочных титановых сплавов от температуры испытания.

3. Установлены регрессионные модели для оценки (с доверительной вероятностью 0,95) средних значений прочностных свойств прутков от содержания кремния, эквивалентов легирующих элементов по алюминию и молибдену при температурах испытания 20-600 °С.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / А.А. Ильин, Ю.Б. Егорова, С.В. Скворцова и др. // Титан. – 2012. – №2 (36). – С. 11-18.

2. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.

3. Статистическое прогнозирование механических свойств титановых сплавов в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденк, С.Б. Белова, Е.В. Чибисова // Материаловедение. – 2015. – №5. – С. 24-30.

4. Об использовании эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену в производстве титановых сплавов / А.А. Ильин, И.С. Полькин, Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко // Титан. – 2018. – №4. – С. 11-19.

5. Выбор композиции нового жаропрочного титанового сплава с применением методов математического моделирования / Н.А. Ночовная, В.Г. Анташев, А.А. Ширяев, Е.Б. Алексеев // Титан. – 2015. – № 1. – С. 10-17.

6. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением. – М.: Металлургия, 1994. – 280 с.

7. Авиационные материалы. Справочник в 9 т. Т.5 Магниево-титановые сплавы. / под общ. ред. А.Т. Туманова. – М.: ОНТИ, 1973. – 560 с.

8. Авиационные материалы: Справочник в 12 т. Т.6 Титановые сплавы. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2010. – 96 с.

9. Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы. / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.

10. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы. / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.

11. Фридляндер И.Н. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, О.Е. Осинцев. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.

12. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- $\alpha$  титанового сплава ВТ41 / Е.Н. Каблов, О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, Н.А. Ночовная // Титан. – 2016. – №2. – С. 33-38.

13. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- $\alpha$ -сплава ВТ46 / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, В.С. Калашников, А.Р. Кондратьева // Труды ВИАМ. – 2016. – №9 (45). – С. 44-50.

14. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. / Е.А. Борисова и др. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.

15. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.В. Новак, Н.А. Ночовная // Труды ВИАМ. – 2013. – №3. URL: <http://viam-works.ru/ru/articles?year=2013&num=3>



16. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2013. – 288 с.

17. Трубочкин А.В. Влияние кремния и выделения частиц интерметаллидов на структуру и свойства жаропрочных псевдо-альфа-титановых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2004. – 160 с.

18. Павлова Т.В. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей / Т.В. Павлова, О.С. Кашапов, Н.А. Ночовная // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №5. – С. 8-14.

19. Оптимизация режимов термической обработки для лопаточных заготовок из опытного жаропрочного сплава / Н.А. Ночовная, А.А. Ширяев, Е.Б. Алексеев, В.Г. Анташев // МИТОМ. – 2014. – №12. – С. 22-26.

20. ОСТ1 90197-89 Поковки дисков и валов кованные и штампованные из титановых сплавов. – 1989. – 25с.

21. Влияние железа на механические свойства прутков из жаропрочного титанового сплава ВТ41 / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.П. Истракова, В.С. Калашников // Труды ВИАМ. - 2015. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-2-2

22. Влияние железа на механические свойства поковок из жаропрочного титанового сплава ВТ41 / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.П. Истракова, В.С. Калашников // Труды ВИАМ. - 2015. <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/869.pdf>

23. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.П. Истракова, В.С. Калашников // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S5. – С. 73-80.

DOI: 10.24892/RIJIE/20200206

# Comparison of the Strength Properties of Heat-Resistant Titanium Alloys at Elevated Temperatures

Egorova Yu.B., Mamonov I.M.

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Stupino branch

Stupino, Moscow Region, Russian Federation  
[egorova\\_mati@mail.ru](mailto:egorova_mati@mail.ru), [mamonovim@mati.ru](mailto:mamonovim@mati.ru)

Davydenko L.V.

Moscow Polytechnic University,  
Moscow, Russian Federation

[mami-davydenko@mail.ru](mailto:mami-davydenko@mail.ru)

**Abstract.** The results of statistical studies of the strength properties of rods made of heat-resistant titanium alloys at test temperatures of 20÷600 °C are represented. The chemical composition of the alloys has been compared by aluminum and molybdenum equivalents and tensile strength at various temperatures. Regression dependences of the average values of strength properties on the test temperature, silicon content, and aluminum and molybdenum equivalents of alloying elements and impurities have been determined.

**Keywords:** heat-resistant titanium alloys, rods, aluminum and molybdenum equivalents, strength properties, statistical studies.

## REFERENCES

1. Ilyin A.A., Egorova Yu.B., Skvortsova S.V. et al. Various types of classification of domestic titanium alloys [Razlichnye vidy klassifikatsii otechestvennykh titanovykh splavov], *Titan [Titanium]*, 2012, no. 2 (36), pp. 11-18. (in Russ.)

2. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva: spravochnik* [Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference book], Moscow, VILS-MATI, 2009, 520 p. (in Russ.)

3. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B., Chibisova E.V. Statistical prediction of the mechanical properties of titanium alloys depending on the equivalents for aluminum and molybdenum [Statisticheskoe prognozirovaniye mekhanicheskikh svoystv titanovykh splavov v zavisimosti ot ekviva-

lentov po alyuminiyu i molibdenu], *Materialovedenie [Materials Science]*, 2015, no.5, pp. 24-30. (in Russ.)

4. Ilyin A.A., Polkin I.S., Egorova Yu.B., Davydenko L.V. On the application of equivalents of alloying elements and impurities to aluminum and molybdenum in titanium alloys production [Ob ispol'zovanii ekvivalentov legiruyushchikh elementov i primesey po alyuminiyu i molibdenu v proizvodstve titanovykh splavov], *Titan [Titanium]*, 2018, no. 4, pp. 11-19. (in Russ.)

5. Nochovnaya N.A., Antashev V.G., Shiryaev A.A., Alekseev E.B. The choice of the composition of a new heat-resistant titanium alloy with the use of mathematical modeling methods [Vybor kompozitsii novogo zharoprochnogo titanovogo splava s primeneniem metodov matematicheskogo modelirovaniya], *Titan [Titanium]*, 2015, no.1, pp. 10-17. (in Russ.)

6. Miklyaev P.G. *Mekhanicheskie svoystva legkikh splavov pri temperaturakh i skorostyakh obrabotki davleniem* [Mechanical properties of light alloys at temperatures and speeds of pressure treatment], Moscow, Metallurgy, 1994, 280 p. (in Russ.)

7. Tumanova A.T. (ed.) *Aviatsionnye materialy. Spravochnik v 9 t. T.5 Magnievye i titanovye splavy* [Aviation materials. Reference book in 9 volumes. Vol.5 Magnesium and titanium alloys], Moscow, ONTI, 1973, 560 p. (in Russ.)

8. Kablova E.N. (ed.) *Aviatsionnye materialy: Spravochnik v 12 t. T.6 Titanovye splavy* [Aviation materials: Reference

book in 12 volumes. Vol.6 Titanium alloys], Moscow, VIAM, 2010, 96 p. (in Russ.)

9. Solonina O.P., Glazunov S.G. *Zharoprochnye titanovye splavy* [Heat-resistant titanium alloys], Moscow, Metallurgy, 1976, 448 p. (in Russ.)

10. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Konstruksionnye titanovye splavy* [Structural titanium alloys], Moscow, Metallurgy, 1974, 368 p. (in Russ.)

11. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Osintsev O.E. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. 2-3. Tsvetnye metally i splavy* [Mechanical engineering. Encyclopedia. T. 2-3. Non-ferrous metals and alloys], Moscow, Mashinostroenie, 2001, 880 p. (in Russ.)

12. E.N. Kablov, Kashapov, T.V. Pavlova, N.A. Nightlife Development of industrial technology manufacturing of semi-finished products from near- $\alpha$ -titanium alloy bt41 [Razrabotka opytно-promyshlennoy tekhnologii izgotovleniya polufabrikatov iz psevdо- $\alpha$  titanovogo splava VT41], *Titan [Titanium]*, 2016, no.2, pp. 33-38. (in Russ.)

13. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Kondratyev A.R. Research of influence of alloying elements content on properties of high strength near alpha heat resistance titanium alloy vt46 [Issledovanie vliyaniya sodержaniya legiruyushchikh elementov na svoystva vysokoprochnogo zharoprochnogo psevdо- $\alpha$ -splava VT46], *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2016, no. 9 (45), pp. 44-50. (in Russ.)

14. Borisova E.A. et al. *Titanovye splavy. Metallografiya titanovykh splavov* [Titanium alloys. Metallography of titanium alloys], Moscow, Metallurgy, 1980, 464 p. (in Russ.)

15. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Novak A.V., Nochovnaya N.A. State, problems and prospects of creating heat-resistant titanium alloys for gas turbine engine parts [Sostoyaniye, problemy i perspektivy sozdaniya zharoprochnykh titanovykh splavov dlya detaley GTD], *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2013, no.3. URL: <http://viam-works.ru/ru/articles?year=2013&num=3>. (in Russ.)

16. Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v sovremennyy analiz dannykh v sisteme STATISTICA* [A popular introduction to modern data analysis in STATISTICA], Moscow, Hotline. - Telecom, 2013, 288 p. (in Russ.)

17. Trubochkin A.V. *Vliyanie kremniya i vydeleniya chastits intermetallidov na strukturu i svoystva zharoprochnykh*

*psevdо- $\alpha$ -titanovykh splavov: dis. kand. tekhn. nauk* [The effect of silicon and the release of intermetallic particles on the structure and properties of heat-resistant pseudo-alpha-titanium alloys: Ph.D. thesis. tech. sciences], Yekaterinbur, 2004, 160 p. (in Russ.)

18. Pavlova T.V., Kashapov O.S., Nochovnaya N.A. Titanium alloys for gas turbine engines [Titanovye splavy dlya gazoturbinnykh dvigateley], *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik [All materials. Encyclopedic reference book]*, 2012, no. 5, pp. 8-14. (in Russ.)

19. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A., Alekseev E.B., Antashev V.G. Optimization of Heat Treatment Regimes for Blade Preforms from Experimental Titanium Alloy, *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, no.56, pp. 656-660. DOI: 10.1007/s11041-015-9817-2

20. OST1 90197-89 *Pokovki diskov i valov kovanye i shtampovannye iz titanovykh splavov* [Disc and shaft forgings forged and stamped from titanium alloys], 1989, 25p. (in Russ.)

21. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Influence of iron on mechanical properties of bars made of heat-resistant titanium alloy VT41 [Vliyanie zheleza na mekhanicheskie svoystva prutkov iz zharoprochnogo titanovogo splava VT41], *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2015. (in Russ.)

22. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Influence of iron on mechanical properties of forgings made of heat-resistant titanium alloy VT41 [Vliyanie zheleza na mekhanicheskie svoystva pokovok iz zharoprochnogo titanovogo splava VT41], *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2015. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/869.pdf>. (in Russ.)

23. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Strengthening of high-temperature near- $\alpha$ -titanium alloys [Povyshenie prochnostnykh kharakteristik zharoprochnykh psevdо- $\alpha$ -titanovykh splavov], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]*, 2014, no. S5, pp. 73-80. (in Russ.)

#### Библиографическое описание статьи

Егорова Ю.Б. Сопоставление прочностных свойств жаропрочных титановых сплавов при повышенных температурах / Ю.Б. Егорова, И.М. Мамонов, Л.В. Давыденко // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2020. – Т.8, №2. – С. 34-39. DOI: 10.24892/RIJIE/20200206

#### Reference to article

Egorova Yu.B., Mamonov I.M., Davydenko L.V. Comparison of the strength properties of heat-resistant titanium alloys at elevated temperatures, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2020, vol.8, no.2, pp. 34-39. DOI: 10.24892/RIJIE/20200206