

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И ВЫНОСЛИВОСТИ ПРУТКОВ И ШТАМПОВОК ЛОПАТОК ИЗ СЕРИЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И НОВОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПСЕВДО- α -КЛАССА

В.С. Калашников¹, Л.П. Решетило¹, О.В. Чучман¹, С.А. Наприенко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования структуры и механических свойств прутков и штамповок лопаток из нового жаропрочного титанового сплава. Для рассматриваемых полуфабрикатов показана типичная микроструктура. Основное внимание уделено оценке прочности и многоциклового усталости материала прутков и штамповок. Выполнен анализ прочностных характеристик и ударной вязкости прутков и штамповок лопаток из серийных титановых сплавов марок VT3-1, VT8, VT8M-1, VT9 и VT20. Проведено сравнение по основным характеристикам серийных сплавов с новым высокопрочным сплавом псевдо- α -класса.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы, механические свойства, микроструктура, прутки, штамповки, поковки

Для цитирования: Калашников В.С., Решетило Л.П., Чучман О.В., Наприенко С.А. Характеристики прочности и выносливости прутков и штамповок лопаток из серийных жаропрочных титановых сплавов и нового титанового сплава псевдо- α -класса // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.

Scientific article

STRENGTH AND RELIABILITY OF RODS AND ROTOR BLADE STAMPS MADE OF HEAT-RESISTANT INDUSTRIAL TITANIUM ALLOYS AND MODERN PSEUDO- α -TITANIUM ALLOY

V.S. Kalashnikov¹, L.P. Reshetilo¹, O.V. Chuchman¹, S.A. Naprienko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Presents the microstructure and mechanical properties of bars and blade forgings made of new heat resistant titanium alloy. A typical microstructures of studied industrial alloys were demonstrated. The main clue of the article is noted to fatigue stability of bars and forgings material. The analysis of strength and impact toughness of bars and blade forgings made of industrial titanium alloys VT3-1, VT8, VT8M-1, VT9, VT20 were carried out in comparison with new heat-resistant titanium near- α alloy.

Keywords: heat-resistant titanium alloys, mechanical properties, microstructure, rods, stamps, forgings

For citation: Kalashnikov V.S., Reshetilo L.P., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Strength and reliability of rods and rotor blade stamps made of heat-resistant industrial titanium alloys and modern pseudo- α -titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.

Введение

Повышение усталостной долговечности рабочих лопаток компрессора из титановых сплавов для авиационных газотурбинных двигателей, как правило, достигается технологическими мероприятиями, связанными с повышением чистоты поверхности и (или) совершенствованием методов упрочнения пера лопатки [1–3]. Состояние приповерхностных слоев и эффективность упрочнения методами пластической деформации оказывают значительное влияние на усталостную долговечность готовых лопаток и зависят от множества факторов с учетом так называемой «технологической наследственности», которая может включать режимы механической (электрохимической) обработки, а также метод изготовления штамповки [4–6]. Для высокопрочных титановых сплавов с уровнем прочности $\sigma_b \geq 1080$ МПа, повышенный уровень сжимающих напряжений может оказывать отрицательное влияние на надежность работы рабочих лопаток из-за снижения пластичности и вязкости материала в упрочненном слое. Отметим также, что эффективность методов поверхностного упрочнения снижается с повышением рабочей температуры лопаток из-за ускорения процессов релаксации напряжений. Поэтому одним из очевидных путей повышения усталостной долговечности лопаток представляется замена материала на более прочный, обладающий повышенными характеристиками сопротивления усталости. С повышением уровня прочности материала процессы поверхностной пластической деформации можно применять в качестве отделочных операций, направленных на повышение чистоты поверхности и образующих небольшие сжимающие напряжения в поверхностном слое. Это значительно упрощает технологию изготовления лопаток на финишных операциях и обеспечивает возможность применения простых и широко распространенных методов пластической деформации.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) разработан новый высокопрочный сплав, относящийся к псевдо- α -классу, обеспечивающий сохранение высокого уровня жаропрочности до температур 500–550 °С [7, 8]. В деформируемых полуфабрикатах после двойного отжига сплав обеспечивает прочность на уровне $\sigma_b \approx 1150$ МПа. Высокая прочность сплава обусловлена получением дисперсных структурных составляющих за счет облегчения процесса рекристаллизации, сочетания структурного и интерметаллидного механизмов дисперсионного упрочнения [9–12]. Особенности структурного упрочнения при термической обработке подробно рассмотрены в работах [13, 14], в которых показано, что в результате дораспада прослоек β -фазы образуется высокодисперсная смесь ($\alpha + \beta$)-фаз, повышающая прочностные характеристики материала. Применение такого подхода позволяет получать высокий уровень прочности на малолегированных дисперсионно-упрочняемых псевдо- α -сплавах [15, 16].

Задача повышения прочности титановых сплавов, как правило, решается увеличением содержания элементов, стабилизирующих β -фазу [17–19]. Долговечность работы детали, воспринимающей усталостные нагрузки, определяется суммарным временем до появления первичной поверхностной трещины (накопление необратимой повреждаемости по механизму пластической деформации [20–22]) и продолжительностью ее развития. Поэтому воздействие небольших по величине относительно предела прочности циклических напряжений в упругой области на материал с высокой пластичностью (низким уровнем легирования α -фазы) может также способствовать получению высоких характеристики сопротивления усталости, что показано на примере нового двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–V–Si–Fe–O, запатентованного в США [23], с содержанием ванадия до 8,5 % (по массе). В новом сплаве ограничено суммарное содержание элементов, стабилизирующих β -фазу (не больше, чем это принято для псевдо- α -сплавов), а также содержание алюминия – на 0,5–1,5 % (по массе) по сравнению

с серийными сплавами ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 и ВТ20. Это обеспечивает ряд преимуществ – расширение диапазона рабочих температур и отсутствие выраженных ликвационных явлений при кристаллизации крупных слитков вакуумно-дугового переплава. Высокая прочность и дисперсность составляющих структуры, снижение уровня легирования α -фазы алюминием, снижение содержания кремния по сравнению с серийными сплавами ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9 оказывают положительное влияние на характеристики сопротивления усталости материала, что открывает перспективы применения нового сплава для деталей, испытывающих повторно-статические и усталостные нагрузки.

В данной статье приведены результаты исследований нового жаропрочного титанового сплава псевдо- α -класса, рассматриваемого для применения в качестве материала рабочих лопаток компрессора с рабочей температурой до 450–550 °С взамен серийных сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ8М-1 ВТ9 и ВТ20. Основное внимание уделено сравнению нового сплава со сплавами ВТ9 (наиболее высокопрочный серийный двухфазный жаропрочный сплав для изготовления лопаток), ВТ20 (сплав-аналог по классу) и ВТ8.

Материалы и методы

В качестве материалов для проведения исследований использованы результаты контрольных испытаний серийных изделий (прутков и штамповок лопаток) из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ8М-1, ВТ9 и ВТ20, а также опытно-промышленных и опытных прутков и штамповок из нового сплава [24–26]. Химический состав сплавов, выраженный в структурных эквивалентах по содержанию алюминия и молибдена [27], количество плавок, а также содержание алюминия, кремния и углерода приведены в табл. 1. Расчет эквивалентов промышленных сплавов и полуфабрикатов проводили для каждой плавки по усредненному значению от результата определения содержания легирующих элементов и примесей между верхом и низом слитка; для опытных слитков из нового сплава, изготовленных в ВИАМ, – по результатам однократного химического анализа стружки, отобранной после предварительной механической обработки слитков.

Таблица 1

Химический состав титановых сплавов

Сплав	Количество плавок	Химический состав				
		[Al] _{экв}	Al, % (по массе)	[Mo] _{экв}	Si, % (по массе)	C, % (по массе)
ВТ3-1	10	7,45–7,75	6,3–6,6	5,47–5,97	0,26–0,33	0,004–0,012
ВТ8	15	7,7–7,9	6,5–6,9	3,68–3,86	0,3–0,36	0,006–0,010
ВТ8М-1	12	5,62–6,01	5,31–5,64	3,68–4,10	0,16–0,2	0,005–0,01
ВТ9	9	7,89–8,24	6,45–6,87	3,59–3,77	0,28–0,31	0,005–0,011
ВТ20	6	7,99–8,37	6,43–6,78	3,24–3,52	0,018–0,032	0,005–0,010
Новый сплав	8	7,84–8,53	5,33–6,51	3,06–3,53	0,18–0,24	0,006–0,06

Примечание. Химический состав сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ8М-1, ВТ9, ВТ20 соответствует ОСТ 1 90013–91 «Сплавы титановые. Марки»; химический состав нового сплава соответствует патенту № 2507289 от 28.03.2013.

В работе использовали катаные прутки диаметром до 35 мм и штамповки лопаток габаритов «М», «С» и «К» из сплавов ВТ3-1, ВТ8М-1 и ВТ9 (рис. 1 и 2), катаные прутки диаметром 18; 35 и 48 мм из нового сплава, изготовленные в условиях металлургического и машиностроительных предприятий, а также кованые прутки диаметром до 45 мм, изготовленные в ВИАМ (рис. 3).

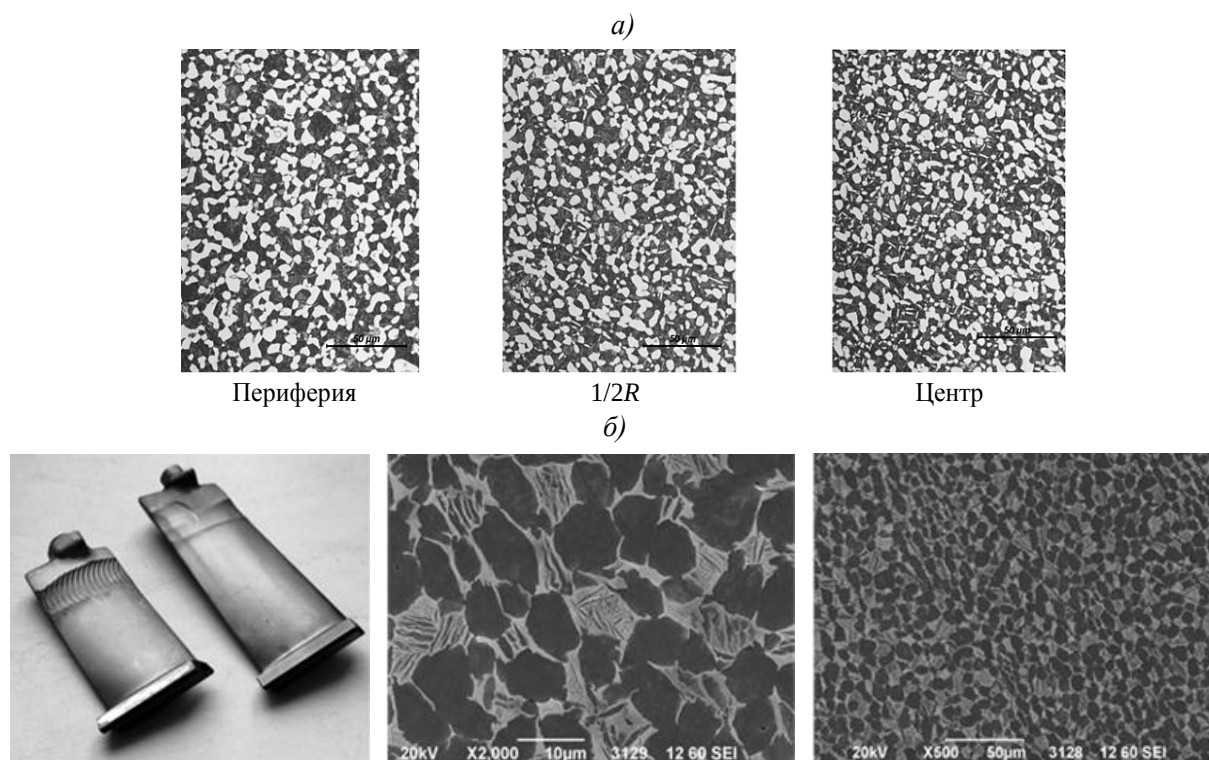


Рис. 1. Типичная микроструктура катаных прутков (а) и штамповок лопаток габарита «М» (б) из сплава ВТ9 в отожженном состоянии (R – радиус прутка)

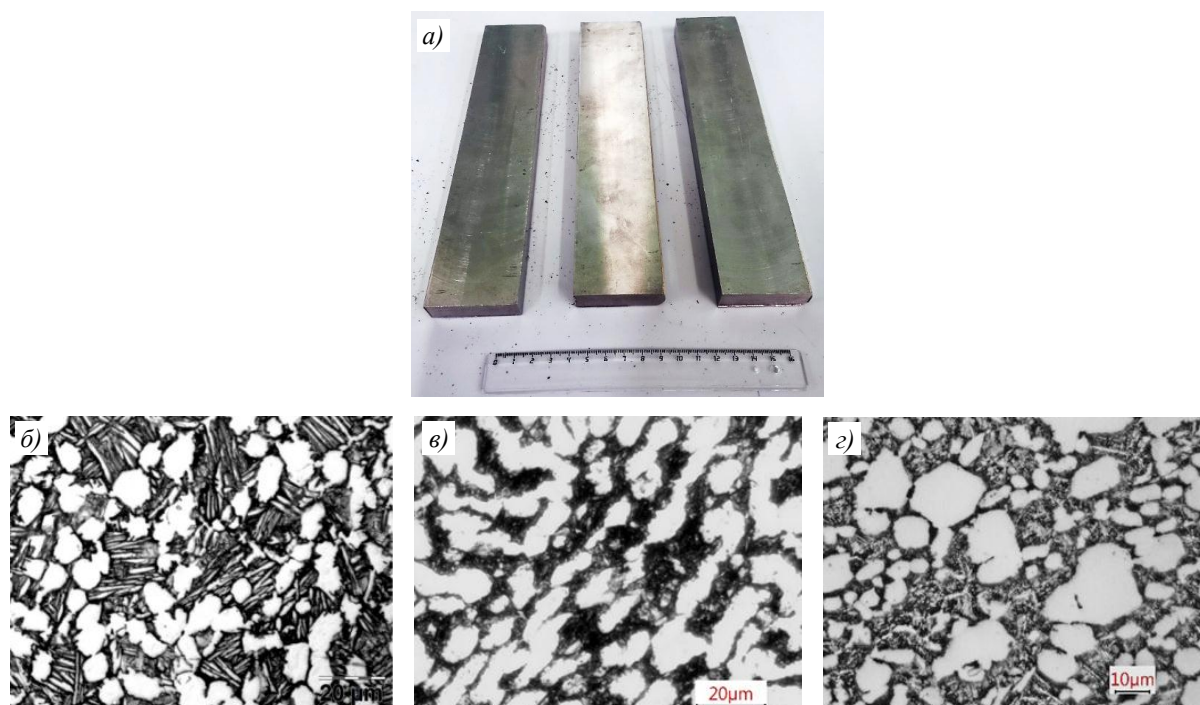


Рис. 2. Темплеты из штампов габарита «К» из сплавов ВТ8 и нового сплава (а); микроструктура штампов габарита «К», изготовленных методом термомеханической обработки, из сплавов ВТ3-1 (б) и ВТ8 (в), а также из нового сплава (г)

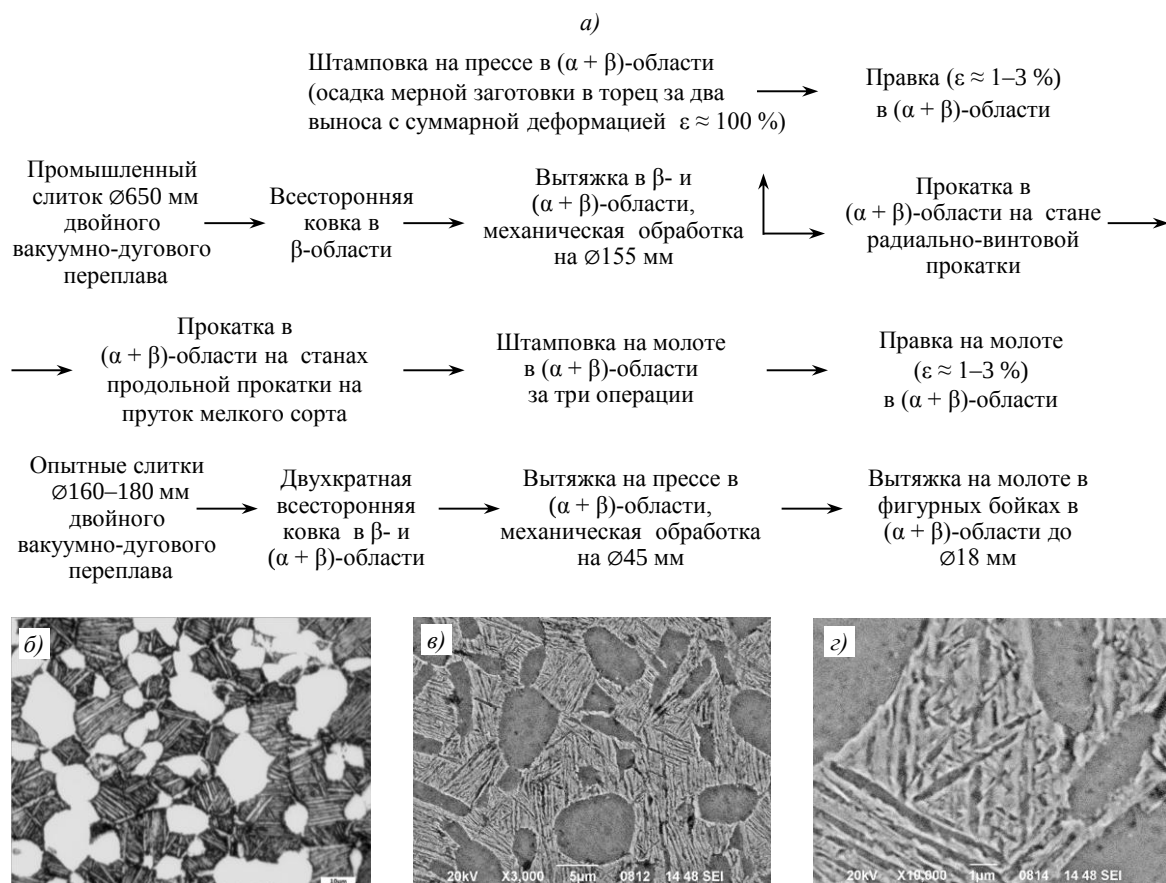


Рис. 3. Схемы изготовления прутков и штамповок из нового сплава (а), типичная микроструктура кованных и катаных прутков (б–г)

Отдельные результаты по штамповкам габарита «С» из нового сплава и серийных сплавов марок ВТ9 и ВТ8М-1 получены на штампованных заготовках в ВИАМ из исходных катаных прутков диаметром 35 мм (рис. 4).

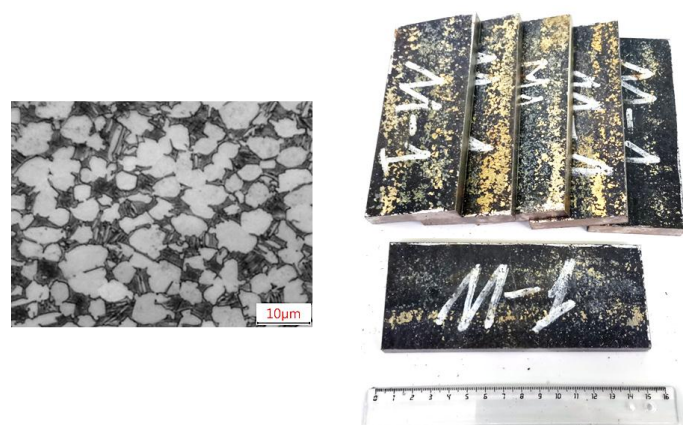


Рис. 4. Штамповки лопаток габарита «М» (образцы-свидетели) из сплава ВТ8М-1 после термомеханической обработки

Основной объем характеристик механических свойств штамповок лопаток габарита «С» из сплава ВТ20 и нового сплава определяли на штамповке, показанной на рис. 5.

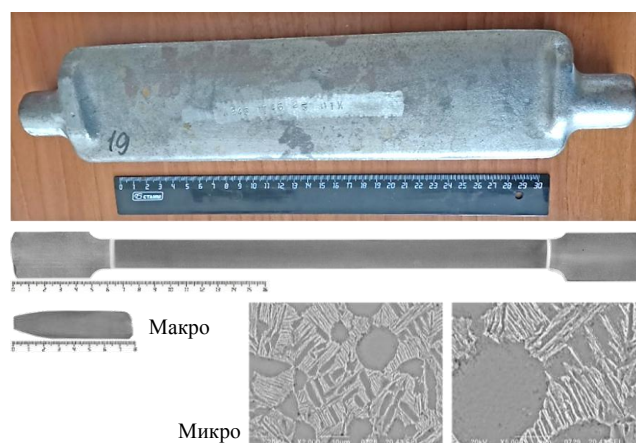


Рис. 5. Штамповка лопатки габарита «С» из нового сплава после термомеханической обработки (аналогичные штамповки изготавливают серийно из сплава ВТ20)

При отжиге деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ20 применяется одноступенчатый отжиг при относительно низких температурах [28], поэтому структура прутков и штамповок определяется в основном предшествующей деформацией. Микроструктура прутков и штамповок из сплава ВТ20 приведена на рис. 6, для катаных прутков характерна аналогичная микроструктура.

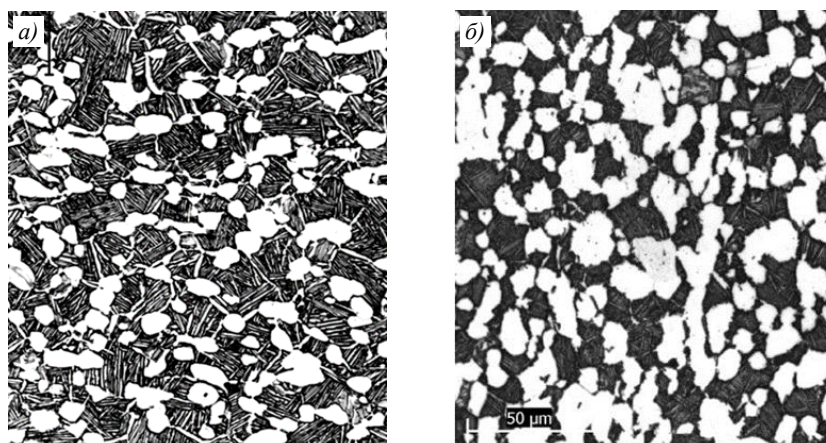


Рис. 6. Типичная микроструктура штамповок из сплава ВТ20 габарита «С» в отожженном состоянии (а) и после термомеханической обработки (б)

Механические свойства поковки из нового сплава определяли на темплете длиной 225 мм, вырезанном из поковки исходного размера 350×145×50 мм, изготовленной в ВИАМ. Штамповки лопаток габарита «К» из сплава ВТ8 и нового сплава изготовлены в ВИАМ по одной технологической схеме из исходных крупногабаритных кованых прутков диаметром 150–155 мм, произведенных на металлургическом предприятии [29, 30]. Для сравнительного анализа механических свойств также использованы результаты контрольных испытаний металлургической продукции, проводимые предприятиями в соответствии с государственными стандартами и действующей нормативной документацией на продукцию. Испытания механических свойств на растяжение и ударную вязкость проводили на стандартных образцах. Многоцикловую усталость определяли на образцах с диаметром рабочей части 7,5 мм, испытания проводили при частоте 50 Гц. Результаты испытаний для сплава ВТ3-1 получены на материале нескольких поковок сечением до 45 мм, изготовленных по схожей технологической схеме и отожженных по режиму изотермического отжига с переносом в печь, нагретую до

температуры 550 °С, после выдержки на высокотемпературной ступени. Образцы из поковок сплава ВТЗ-1 и нового сплава вырезали в продольном (радиальном) или поперечном (хордовом) направлениях. Внешний вид изделий и микроструктура материала приведены на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид и микроструктура материала поковок из нового сплава (а) и сплава ВТЗ-1 (б)

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний механических свойств с указанием вида полуфабриката и состояния материала (метода изготовления) приведены: в табл. 2 – для сплава ВТЗ-1, в табл. 3 – для сплава ВТ8, в табл. 4 – для сплава ВТ8М-1, в табл. 5 – для сплава ВТ9, в табл. 6 – для сплава ВТ20, в табл. 7 и 8 – для нового сплава.

Таблица 2

Механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТЗ-1

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	$\sigma_B^{20^\circ}$	δ	ψ	$KCU, \text{ Дж/см}^2$	$\sigma_B^{500^\circ}, \text{ МПа}$
	МПа		%			
Штамповка лопатки габарита «К» (термомеханическая обработка)	$\frac{990-1024}{1004}$	$\frac{1079-1125}{1099}$	$\frac{13,6-19,1}{17,3}$	$\frac{30,5-45,5}{41,9}$	$\frac{36-45}{40,6}$	—
Количество испытаний	8	8	8	8	8	—
Пруток Ø32 мм (изотермический отжиг)	—	$\frac{112-1123}{1116}$	$\frac{15,0-15,6}{15,3}$	$\frac{52,1-54,1}{53,2}$	$\frac{46-57}{53}$	—
Количество испытаний	—	3	3	3	3	—
Поковки и штамповки сечением 40–50 мм (изотермический отжиг)	$\frac{915-1030}{978,3}$	$\frac{991-1100}{1050,6}$	$\frac{13,6-20,8}{17,8}$	$\frac{25,8-56,6}{40,2}$	$\frac{35-59}{48,8}$	$\frac{740-807}{775,6}$
Количество испытаний	52	54	54	54	40	8
* В числителе – минимальное и максимальные значения, в знаменателе – среднее.						

Таблица 3

Механические свойства полуфабриката из сплава ВТ8

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний			
	$\sigma_{\text{в}}^{20^{\circ}}$, МПа	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²
		%		
Штамповка лопатки габарита «К» (термомеханическая обработка)	$\frac{1040-1100}{1065}$	$\frac{14,5-19,5}{17,2}$	$\frac{34,0-49,0}{41,5}$	$\frac{45-67}{53,1}$
Количество испытаний	98	98	98	49
* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.				

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Таблица 4

Механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ8М-1

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	$\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²	$\sigma_{\text{в}}^{500^\circ}$, МПа
	МПа		%			
Катаный прут (двойной отжиг)	$\frac{945-1045}{985,2}$	$\frac{980-1142}{1034}$	$\frac{12,4-24,0}{17,1}$	$\frac{31,7-68,8}{59,5}$	$\frac{36-89}{60,2}$	$\left(\frac{675-819}{742,7} \right)^{**}$
Количество испытаний	30	233	233	233	189	32
Штамповка лопатки габарита «С» (термомеханическая обработка)	$\frac{990-1010}{1003}$	$\frac{1053-1156}{1089}$	$\frac{12,0-19,2}{15,6}$	$\frac{38,5-54,1}{45,8}$	$\frac{53-97}{72}$	–
Количество испытаний	3	9	9	9	6	–

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

** При температуре 450 °С.

Таблица 5

Механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ9

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	$\sigma_{\text{в}}^{500^\circ}$	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²	$\sigma_{\text{в}}^{500^\circ}$, МПа
	МПа		%			
Катаный прут (двойной отжиг)	–	$\frac{1039-1145}{1094}$	$\frac{15,2-20,4}{17,9}$	$\frac{45,6-59,6}{52,8}$	$\frac{42-56}{50,7}$	$\frac{725-813}{779,4}$
Количество испытаний	–	19	19	19	19	7
Штамповка лопатки габарита «М» (двойной отжиг)	–	$\frac{1031-1131}{1066}$	$\frac{10,7-16,4}{14,3}$	$\frac{26,8-56,0}{52,8}$	$\frac{30-68}{39,1}$	–
Количество испытаний	–	57	57	57	57	–
Штамповки лопаток габаритов «С» и «К» (термомеханическая обработка)	$\frac{965-1085}{1019}$	$\frac{1080-1220}{1129}$	$\frac{12,5-17,3}{14,8}$	$\frac{30,9-49,4}{40,9}$	$\frac{40-45}{48,8}$	–
Количество испытаний	13	19	19	19	12	–

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Таблица 6

Механические свойства полуфабриката из сплава ВТ20

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^{\circ}}$	$\sigma_B^{20^{\circ}}$	δ	ψ	KCU , Дж/см ²	$\sigma_B^{500^{\circ}}$, МПа
	МПа		%			
Штамповка лопатки габарита «С» (термомеханическая обработка и одноступенчатый отжиг)	$\frac{845-994}{926}$	$\frac{985-1110}{1039}$	$\frac{13,6-20,0}{16,3}$	$\frac{38,4-51,4}{45,9}$	$\frac{43-86}{57,3}$	$\frac{700-752}{720,8}$
Количество испытаний	23	23	23	23	23	5

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Таблица 7

Механические свойства полуфабрикатов из нового сплава

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^{\circ}}$	$\sigma_B^{20^{\circ}}$	δ	ψ	KCU, Дж/см ²	$\sigma_B^{500^{\circ}}$, МПа
	МПа		%			
Катаный пруток (двойной отжиг)	<u>1040–1090</u> 1065	<u>1110–1170</u> 1144	<u>14,4–21,0</u> 17,2	<u>29,9–40,0</u> 36,6	<u>31–39</u> 34,3	<u>800–850</u> 816
Количество испытаний	8	14	14	14	6	5
Кованный пруток (двойной отжиг)	<u>1050–1220</u> 1096,8	<u>1110–1260</u> 1173,6	<u>10,5–18,0</u> 13,3	<u>29,0–45,0</u> 35,2	<u>30–53</u> 39,6	<u>815–940</u> 853
Количество испытаний	30	44	44	44	26	7
Штамповка лопатки габарита «С» (термомеханическая обработка)	<u>1050–1250</u> 1130	<u>1130–1320</u> 1216	<u>9,2–17,5</u> 13,3	<u>18,0–42,0</u> 30,4	<u>29–44</u> 37,1	–
Количество испытаний	37	47	47	47	20	–
Штамповка лопатки габарита «К» (термомеханическая обработка)	<u>1055–1070</u> 1061	<u>1111–1145</u> 1127	<u>10,0–5,0</u> 12,8	<u>29,5–37,3</u> 31,6	<u>32–38</u> 34,7	–
Количество испытаний	4	10	10	10	3	–
Исходный пруток Ø155 мм (двойной отжиг)	–	1135; 1130	13,2; 12,5	25,8; 24,5	36; 32	–
Поковка (двойной отжиг)	<u>1060–1140</u> 1094	<u>1110–1190</u> 1145	<u>13,0–17,0</u> 15,1	<u>29,0–39,0</u> 34,5	<u>29–44</u> 37,8	<u>810–830</u> 820
Количество испытаний	24	24	24	24	28	3
* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее						

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Оценивая механические свойства катаных и кованых прутков из нового сплава в отожженном состоянии (табл. 7), можно сделать вывод о схожем уровне механических свойств. Аналогичная картина наблюдается по штамповкам лопаток габарита «К», изготовленным методом термомеханической обработки, и поковке сечением 50 мм в отожженном состоянии, поэтому полученные результаты объединены в две выборки по пруткам и поковкам (табл. 8).

**Обобщенные данные по механическим свойствам прутков мелкого сорта
и поковкам из нового сплава**

Полуфабрикат (термическая обработка)	Механические свойства*, количество испытаний					
	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	$\sigma_B^{20^\circ}$	δ	ψ	KCU, Дж/см ²	$\sigma_B^{500^\circ}$, МПа
	МПа		%			
Кованный и катаный пруток (двойной отжиг)	<u>1040–1220</u> 1090	<u>1110–1260</u> 1166,5	<u>10,5–21,0</u> 14,2	<u>29,0–45,0</u> 35,6	<u>29–53</u> 36,4	<u>800–940</u> 837,5
Количество испытаний	38	58	58	58	32	12
Штамповка габарита «К» (термомеханическая обработка), поковка (двойной отжиг)	<u>1055–1140</u> 1089	<u>1110–1190</u> 1143	<u>12,0–17,0</u> 14,8	<u>29,0–39,0</u> 33,9	<u>29–44</u> 37,5	<u>800–940</u> 837,5
Количество испытаний	28	29	29	29	31	3

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Визуально сопоставить уровень прочности при комнатной температуре и объем выборки по результатам испытаний различных полуфабрикатов из рассматриваемых сплавов можно по точечным диаграммам (рис. 8). Диаграммы построены в одинаковом масштабе по оси ординат, на которой отложены значения кратковременной прочности; по оси абсцисс – количество испытаний.

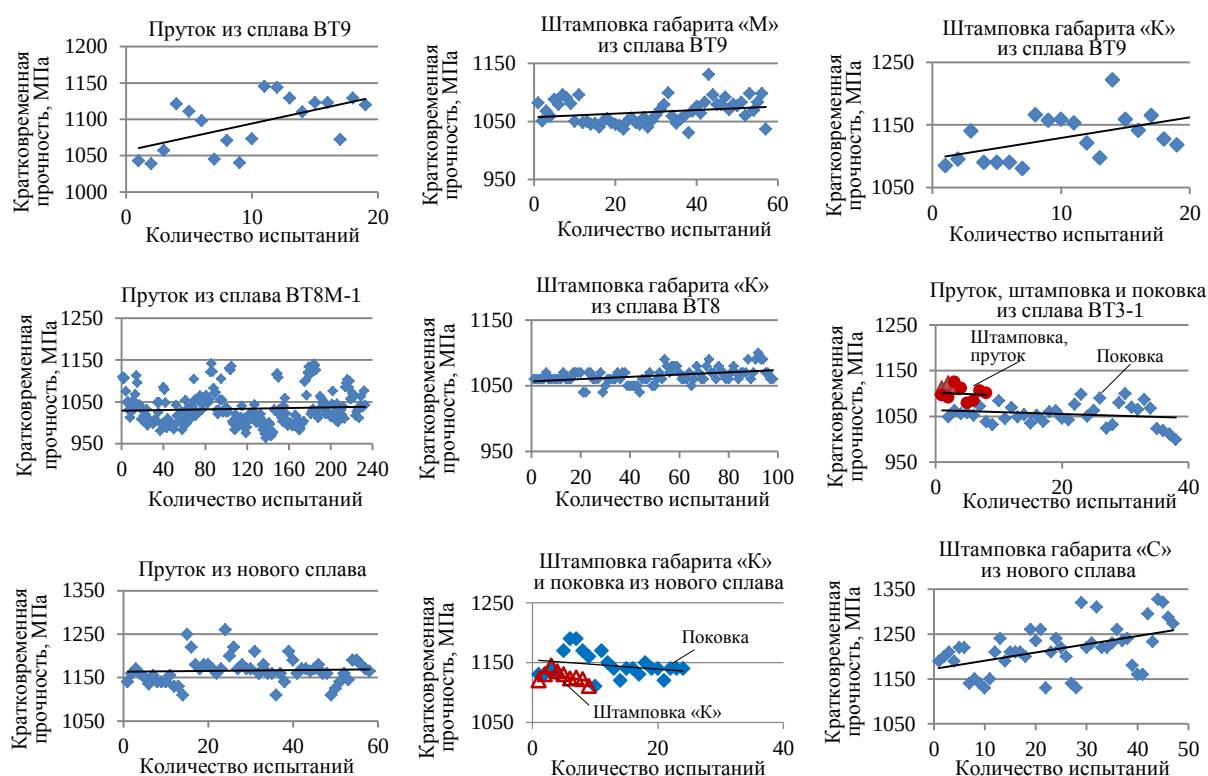


Рис. 8. Прочность полуфабрикатов из титановых сплавов

Результаты испытаний на многоцикловую усталость гладких образцов прутков и штамповок из нового сплава при комнатной температуре приведены на рис. 9.

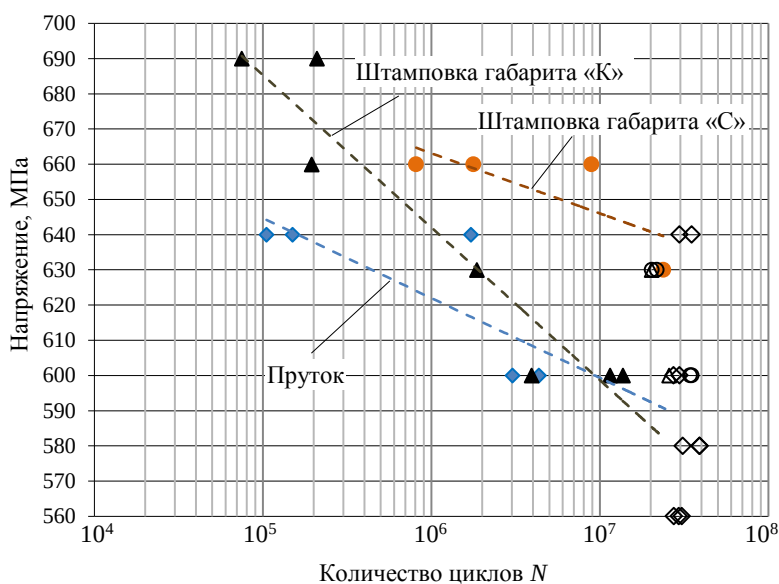


Рис. 9. Результаты испытаний на многоцикловую усталость гладких образцов прутков и штамповок из нового сплава: заштрихованные точки – образцы разрушены; точки, обозначенные контуром, – образцы сняты без разрушения

В табл. 9 приведены уравнения логарифмической регрессии, построенной по разрушенным образцам, а также погрешность аппроксимации.

Таблица 9

Результаты регрессионного анализа испытаний на многоцикловую усталость		
Материал	Уравнение	Погрешность R^2
Пруток	$-9,847 \cdot \ln(N) + 758,01$	0,6135
Штамповка габарита: «М» «К»	$-7,428 \cdot \ln(N) + 765,74$	0,5741
	$-18,82 \cdot \ln(N) + 901,98$	0,918

Данные, представленные в табл. 1, позволяют получить усредненную оценку уровня легирования жаропрочных титановых сплавов. Новый сплав при несколько большем уровне легирования в структурном эквиваленте по алюминию содержит на ~0,5 % (по массе) меньше алюминия. Заметим, что фактическое содержание алюминия, олова и циркония в различных структурных составляющих может варьироваться.

Представленные в данной статье титановые сплавы обладают глобулярно-пластинчатой микроструктурой (рис. 1–6) независимо от вида полуфабриката и метода изготовления штамповок лопаток. Следует обратить внимание на дисперсность частиц превращенной α -фазы нового сплава (рис. 3, 5 и 7). При оценивании химического состава жаропрочных титановых сплавов по содержанию алюминия, углерода, кремния (табл. 1) необходимо подчеркнуть, что новый сплав при более низком содержании алюминия и кремния (по сравнению со сплавами ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9), обладает большим уровнем легирования α -твердого раствора. Содержание кремния в сплаве несколько больше, чем в сплаве ВТ8М-1, но заметно меньше, чем у упомянутых ранее серийных сплавов.

На примере серийных катаных прутков мелкого сорта и штамповок лопаток габарита «М» из сплава ВТ9 видно, что уровень прочности на штамповках лопаток может быть меньше, чем на исходных прутках. При штамповке лопаток при температуре двухфазной области по типовой технологии суммарная деформация по перу лопатки может составлять 150–200 % и более, что увеличивает дисперсность структурных составляющих и, следовательно, прочность материала. Тем не менее наблюдаемая для сплава ВТ9 ситуация противоположна – зачастую прочность материала штамповок лопаток меньше, чем у исходного прутка мелкого сорта. Данный факт можно объяснить условиями проведения термической обработки прутков и партий лопаток: контроль прутков мелкого сорта в соответствии с нормативной документацией осуществляют на мерных заготовках под образцы, вырезанных из прутка и отоженных в лабораторных печах. Штамповки лопаток отжигают и охлаждают партиями, причем создают условия для замедленного охлаждения для исключения коробления. Условия охлаждения после первой ступени отжига (обработка на твердый раствор) оказывают заметное влияние на прочность двухфазных жаропрочных титановых сплавов. В целом для прутков мелкого сорта характерен достаточно большой разброс по значениям механических свойств. Серийные катаные прутки, изготавливаемые на металлургическом предприятии, диаметром 16 мм и менее обладают более высокими показателями прочности по сравнению с прутками больших диаметров (нормы по уровню прочности прутков в отраслевом стандарте установлены для двух диапазонов размеров: от 10 до 35 мм и от 35 до 60 мм). В рассматриваемых выборках по серийным катаным пруткам из сплавов ВТ8М-1 и ВТ9 заметна большая дисперсия по прочностным характеристикам, что можно объяснить не только колебаниями химического состава и структуры материала, но и различием в скоростях охлаждения заготовок в зависимости от диаметра прутка (для диапазона диаметров 10–35 мм).

Сплав ВТ3-1 является наиболее легированным β -стабилизаторами (содержит изоморфный элемент молибден и эвтектоидные элементы – хром и железо) среди рассматриваемых в данной статье сплавов. Двойной отжиг, применяемый для двухфазных жаропрочных сплавов, в случае сплава ВТ3-1 заменен изотермическим, а температура первой ступени несколько занижена относительно температуры полного полиморфного превращения в сравнении с другими сплавами, что связано с опасностью «подкалки» материала. Заготовки из прутков мелкого сорта сплава ВТ3-1 охлаждают с печью до температуры старения, а затем штамповки и поковки переносят после высокотемпературной ступени отжига в печь, нагретую до температуры старения, тем самым искусственно снижая скорость охлаждения.

На прутках мелкого сорта уровень прочности, как правило, больше, чем на поковках, что в значительной мере является следствием более мелкозернистой структуры материала катаных прутков. Для относительно простых двухфазных псевдо- α - и ($\alpha + \beta$)-сплавов типа ОТ4, ВТ6 и ВТ20 чувствительность к высоким скоростям охлаждения, реализуемым при охлаждении на воздухе (вероятность «подкалки»), крайне мала и не приводит к существенному снижению значений пластичности и ударной вязкости. Новый сплав после двойного отжига как на материале кованных и катаных прутков сечением 18–48 мм, так и на материале поковки сечением 50 мм демонстрирует одинаковый уровень прочности и пластичности, что свидетельствует о технологичности нового сплава применительно к операции термической обработки. В среднем для прутков и штамповок в отоженном состоянии уровень прочности нового сплава возрастает на 70 МПа по сравнению со значениями для сплава ВТ9 (рис. 10 и 11).

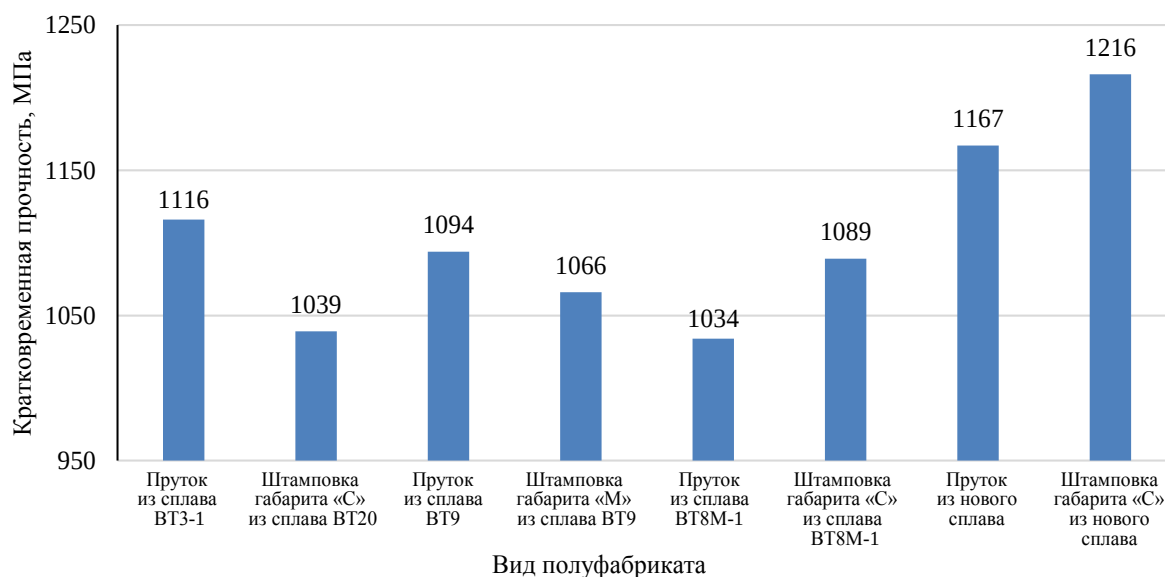


Рис. 10. Средний уровень прочности прутков и штамповок лопаток габаритов «М» и «С»

Метод термомеханической обработки при изготовлении штамповок лопаток габарита «С» из нового сплава позволяет достигнуть уровня прочности ~ 1200 МПа, при этом на отдельных образцах прочность материала остается на уровне прочности сплава в отожженном состоянии (рис. 8). Тем не менее повышение уровня кратковременной прочности (по сравнению с отожженным состоянием) обеспечивает прирост значений по пределу выносливости материала – с 580 до ~ 630 МПа для базы $2 \cdot 10^7$ циклов (рис. 9, табл. 10). Для более крупных штамповок лопаток и поковок следует ожидать такого же значения предела выносливости, как и на прутках (рис. 10, табл. 10), так как материал этих полуфабрикатов находится на одном уровне прочности. Для базы испытаний до $2 \cdot 10^6$ циклов материал крупных штамповок, изготовленных методом термомеханической обработки, обеспечивает больший предел выносливости.

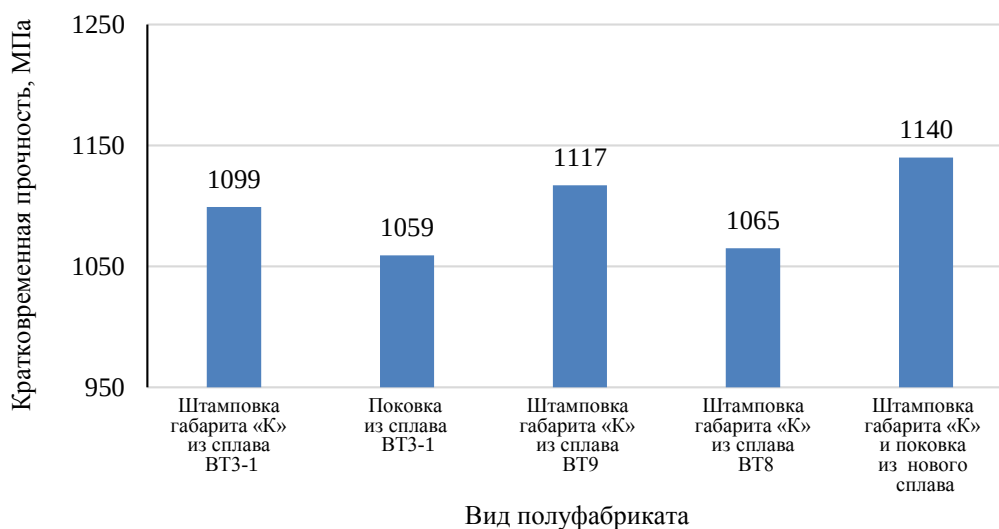


Рис. 11. Средний уровень прочности крупногабаритных штамповок лопаток и поковок сечением до 50 мм

**Пределы выносливости для штамповок лопаток из титановых сплавов
по результатам испытаний и научно-техническим литературным данным [30, 31]**

Сплав	Полуфабрикат (термическая обработка)	σ ₋₁ , МПа, на базе N, циклов		Примечание
		10 ⁷	2·10 ⁷	
BT3-1	Пруток (изотермический отжиг)	520	–	По данным работы [30]
BT20	Пруток (отжиг)	440	–	Справочные данные
BT8	Пруток (двойной отжиг)	530	–	По данным работы [30]
	Штамповка лопатки габарита «К» (ТМО)	–	540	Значение подтверждено контрольными испытаниями
BT8M-1	Пруток мелкого сорта (двойной отжиг)	590	570	По данным работы [31]
	Пруток Ø20 мм (двойной отжиг)	–	540	Справочные данные
	Штамповка лопатки габарита «С» (ТМО)	–	540	Значение подтверждено контрольными испытаниями
BT9	Штамповка лопатки габарита «М» (двойной отжиг)	540	–	
	Штамповка лопатки габарита «К» (ТМО)	–	540	По данным работы [1]
Новый сплав	Пруток (двойной отжиг)	600	580	Расчетные значения (табл. 9)
	Штамповка лопатки габарита «С» (ТМО)	645	630	
	Штамповка лопатки габарита «К» (ТМО)	600	585	
Примечание. Контрольные испытания проводили на образцах-свидетелях (не менее 4 шт.), образцы без разрушения прошли заданную базу; ТМО – термомеханическая обработка.				

Рассматривая особенности химического состава и микроструктуры нового сплава, можно констатировать, что более высокий уровень легирования α -фазы, дисперсность структурных составляющих, наличие кремния и углерода в составе сплава определяют высокий уровень прочности как при комнатной, так и при повышенных температурах, а также предел выносливости деформированных полуфабрикатов из нового сплава. При этом характеристики пластичности и ударной вязкости материала в среднем несколько меньше, чем у двухфазных сплавов, однако они стабильны и находятся на достаточно высоком уровне.

Вероятным путем повышения характеристик пластичности и ударной вязкости может быть нахождение оптимального соотношения содержания кислорода, алюминия, углерода и кремния. Отметим, что в структуре материала опытно-промышленной партии прутков из нового сплава наблюдается глобулярная α -фаза различного размера [32]. Более крупные частицы α -фазы (рис. 2 и 5) образованы на операциях вытяжки крупногабаритного прутка (из-за нагрева материала до температур, близких к температуре полного полиморфного превращения) и наследовались вплоть до получения конечных полуфабрикатов. Данная структурная неоднородность свидетельствует о необходимости корректировки режимов нагрева промежуточных полуфабрикатов под деформацию. Несмотря на наличие крупноглобулярных частиц в структуре материала, на опытно-промышленных прутках и штамповках уровень механических свойств материала существенно не отличался от уровня свойств опытных прутков и поковок

с однородной глобулярно-пластинчатой микроструктурой. Это свидетельствует о превалировании влияния морфологии вторичной α -фазы, т. е. структурного дисперсионного упрочнения, на уровень механических свойств нового сплава. Поэтому преимуществом нового сплава является не только больший уровень прочности и выносливости, но и простота и стабильность в достижении этих показателей путем термической обработки по режиму двойного отжига. Метод термомеханической обработки при изготовлении штамповок лопаток из нового сплава обеспечивает повышение прочностных характеристик материала, включая многоцикловую усталость. Композиция нового сплава позволяет частично заменить алюминий кислородом, что дополнительно облегчает процессы рекристаллизации и сфероидизации, а также повышает технологичность материала при горячей деформации. Отметим, что из-за ограниченного содержания β -стабилизаторов (по сравнению с двухфазными сплавами) новый сплав в меньшей степени подвержен короблению после операции калибровки при охлаждении на воздухе. Наличие в сплаве углерода и кислорода, а также сниженное содержание алюминия позволили получить широкий интервал температур горячей деформации при изготовлении промежуточных полуфабрикатов этим методом при температурах двухфазной области.

Оценивая механические свойства серийных сплавов отметим, что сплав ВТ8М-1 среди рассматриваемых сплавов обладает наилучшими показателями пластичности и ударной вязкости, характеризующими надежность материала. Значительное количество значений результатов испытаний находится на уровне выше среднего – $\sigma_b \geq 1034$ МПа, что свидетельствует о потенциальной возможности повышения прочности сплава за счет корректировки режимов термической и термомеханической обработки. Штамповки лопаток из сплава ВТ8 отличает высокая стабильность показателей механических свойств, что характерно и для других видов полуфабрикатов из этого сплава. Сплавы ВТЗ-1 и ВТ9, обладая большим уровнем прочности, подвержены высокой дисперсии значений механических свойств. Для этих сплавов большое значение имеют режимы и условия проведения термической обработки, они имеют склонность к достариванию при температурах эксплуатации [13, 30, 33]. Для нового сплава применяется режим старения при больших температурах с увеличенным временем выдержки при сниженном содержании кремния и алюминия, состояние твердых растворов в нем более стабильно.

Заключения

Сравнительный анализ механических свойств прутков, штамповок лопаток и поковок из нового сплава в отожженном состоянии и после термомеханической обработки и старения свидетельствует о повышенном уровне прочности полуфабрикатов из нового сплава. Особенности композиции и структуры, а также высокий уровень прочности обеспечивают прирост предела выносливости, что показано на примере прутков в отожженном состоянии и штамповок лопаток, изготовленных методом термомеханической обработки. Свойства сплава достаточно стабильны благодаря технологичности материала на операциях горячей деформации и термической обработки при температурах двухфазной области. Это открывает широкие перспективы его применения в деталях, воспринимающих высокие повторно-статические и усталостные нагрузки при температурах до 500–550 °С.

Список источников

1. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.
2. Сутягин А.Н. Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: конспект лекций. Рыбинск: РГАТУ, 2016. 142 с.

3. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
4. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожье: Мотор-Сич, 2003. Ч. 1. 396 с.
5. Качан А.Я., Уланов С.А. Закономерности формирования остаточных напряжений в пере лопаток технологическими методами с учетом технологической наследственности // *Вестник двигателестроения*. 2019. № 1. С. 61–67.
6. Багмет М.Н., Жданов И.А., Колтун С.К. Металлографические исследования материала лопаток после холодного вальцевания // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 9 (25). С. 28–31.
7. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава BT46 // *Труды ВИАМ*. 2016. № 9 (45). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
8. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
9. Zhang R., Zhao S., Ophus C. et al. Direct imaging of short-range order and its impact on deformation in Ti–6Al // *Science Advances*. 2019. Vol. 5. No. 12. DOI: 10.1126/sciadv.aax2799.
10. Попов А.А., Попова М.А. Изотермические диаграммы выделения силицидных и алюминидных фаз в жаропрочных титановых сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 11. С. 23–28.
11. Davies P., Pederson R., Coleman M., Biroscs S. The hierarchy of microstructure parameters affecting the tensile ductility in centrifugally cast and forged Ti-834 alloy during high temperature exposure in air // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 51–67. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.015.
12. Sabry S.Y., Zheng X., Ma Y. et al. Characterization of α_2 Precipitates in Ti–6Al and Ti–8Al Binary Alloys: A Comparative Investigation // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2021. Vol. 34. P. 710–718. URL: <http://link.springer.com/journal/40195> (дата обращения: 05.10.2021). DOI: 10.1007/s40195-020-01149-2.
13. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Заводов А.В. Явление образования и низкотемпературного распада метастабильных твердых растворов с выделением дисперсных частиц третичной α -фазы в жаропрочных титановых сплавах // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-3-22.
14. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Лукина Е.А. Исследование причин образования трещин на ступице диска КВД из сплава BT8 наземной ГТУ // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-97-106.
15. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α -титанового сплава BT41 // *Титан*. 2016. № 2 (52). С. 33–42.
16. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава BT22M, изготовленных с заключительной деформацией в ($\alpha + \beta$)- и β -областях // *Титан*. 2021. № 1 (70). С. 26–33.
17. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
18. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав. Структура. Свойства. М.: ВИС-МАТИ, 2009. 520 с.
19. Lutering G., Williams J.C. Titanium. 2nd ed. Springer, 2007. 442 p.

20. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. Scales of Metal Fatigue Limit // *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23. P. 120–127. DOI: 10.1134/S1029959920020034.
21. Naimark O.B., Matveenko V.P., Krommer M. et al. Multiscale Dynamics of Damage-Failure Transitions and Structures Control Under Intensive Loading // *Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines: Contributions from the 3rd International Workshop (Perm, Russia)*. Springer, 2019. P. 117–126. DOI: 10.1007/978-3-319-90884-7_13.
22. Белоусов Г.Г., Никитин А.Д., Шанявский А.А. Модель усталостного разрушения в эксплуатации титанового диска вентилятора двигателя ТА12-60 // *Научный вестник МГТУГА*. 2013. № 187. С. 103–107.
23. High-strength alpha-beta titanium alloy: pat. US 2018/0340249 A1; filed 02.08.18; publ. 29.11.18.
24. Tetyukhin V.V., Leder M.O., Kropotov V.A. et al. Status and Progress in wrought processing of titanium // *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*. Metals & Materials Society, 2016. P. 249–256.
25. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
26. Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А., Строков В.В. Технологические возможности специализированных изотермических прессов силой 6,3 и 16 МН в производстве деталей авиационного назначения // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2015. № 9. С. 36–40.
27. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Мамонов И.М., Шмырова А.В. Прогнозирование механических свойств прутков из сплава Ti–6Al–4V в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену // *Титан*. 2021. № 2 (71). С. 25–33.
28. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. CRC Press, 2005. 216 p. DOI: 10.1201/9781420037678.
29. Тетюхин В.В., Шибанов А.С., Пузаков И.Ю. и др. Разработка технологии изготовления полуфабрикатов сплавов титана, исключаящей дефектообразование и повышающей контролепригодность материала // *Сборник докладов VI Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 12–13 февр. 2015 г.)*. М.: ВИАМ, 2015. С. 47.
30. Солонина О.П., Глазунов С.Г. *Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях*. М.: Металлургия, 1974. 448 с.
31. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
32. Солдатенко И.В. Экспрессный метод количественной оценки микроструктуры ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2017. № 2. С. 73–85.
33. Аношкин Н.Ф., Брун М.Я., Шаханова Г.В. Требования к бимодальной структуре с оптимальным комплексом механических свойств и режимы ее получения // *Титан*. 1998. №1 (10). С. 35–41.

References

1. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. *Production of blades for gas turbine engines*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2002, 376 p.
2. Sutyagin A.N. *Modern problems of aircraft engine production technology: lecture notes*. Rybinsk: RGATU, 2016, 142 p.
3. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. Hardening of the surface of titanium alloys by ion implantation method and ionic modification. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
4. Boguslaev V.A., Muravchenko F.M., Zhemanyuk P.D. et al. *Technological support of operational characteristics of gas turbine engine parts*. Zaporozhe: Motor Sich, 2003, part 1, 396 p.

5. Kachan A.Ya., Ulanov S.A. Patterns of formation of residual stresses in the shoulder blades by technological methods, taking into account technological heredity. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2019, no. 1, pp. 61–67.
6. Bagmet M.N., Zhdanov I.A., Koltun S.K. Metallographic studies of the blade material after cold rolling. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2005, no. 9 (25). pp. 28–31.
7. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Kondrateva A.R. Research of influence of alloying elements content on properties of high strength near alpha heat resistance titanium alloy VT46. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
8. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
9. Zhang R., Zhao S., Ophus C. et al. Direct imaging of short-range order and its impact on deformation in Ti–6Al. *Science Advances*, 2019, vol. 5, no. 12. DOI: 10.1126/sciadv.aax2799.
10. Popov A.A., Popova M.A. Isothermal diagrams of precipitation of silicide and aluminide phases in heat-resistant titanium alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2016, no. 11, pp. 23–28.
11. Davies P., Pederson R., Coleman M., Biroscas S. The hierarchy of microstructure parameters affecting the tensile ductility in centrifugally cast and forged Ti-834 alloy during high temperature exposure in air. *Acta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 51–67. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.015.
12. Sabry S.Y., Zheng X., Ma Y. et al. Characterization of α_2 Precipitates in Ti–6Al and Ti–8Al Binary Alloys: A Comparative Investigation. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, vol. 34, pp. 710–718. Available at: <http://link.springer.com/journal/40195> (accessed: October 05, 2021). DOI: 10.1007/s40195-020-01149-2.
13. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Zavodov A.V. The phenomenon of formation and low-temperature diffusion transformation of metastable solid solutions with the release of dispersed particles of intragranular Widmanstätten alpha phase in heat-resistant titanium. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-3-22.
14. Ospennikova O.G., Napriyenko S.A., Lukina E.A. Study of operational destruction of the GTP compressor disk of alloy VT8. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-97-106.
15. Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the manufacture of semi-finished products from pseudo- α titanium alloy VT41. *Titan*, 2016, no. 2 (52). pp. 33–42.
16. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhnina V.A., Naprienko S.A. Investigation of resistance to fatigue failure of forgings from high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in ($\alpha + \beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70). pp. 26–33.
17. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
18. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Compound. Structure. Properties*. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
19. Luther G., Williams J.C. *Titanium*. 2nd ed. Springer, 2007. 442 p.
20. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. Scales of Metal Fatigue Limit. *Physical Mesomechanics*, 2020, vol. 23, pp. 120–127. DOI: 10.1134/S1029959920020034.
21. Naimark O.B., Matveenko V.P., Krommer M. et al. Multiscale Dynamics of Damage-Failure Transitions and Structures Control Under Intensive Loading. *Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines: Contributions from the 3rd International Workshop (Perm, Russia)*. Springer, 2019, pp. 117–126. DOI: 10.1007/978-3-319-90884-7_13.
22. Belousov G.G., Nikitin A.D., Shanyavsky A.A. Model of fatigue failure in operation of the titanium disk of the TA12-60 engine fan. *Nauchnyy vestnik MGTUGA*, 2013, no. 187, pp. 103–107.

23. *High-strength alpha-beta titanium alloy*: pat. US 2018/0340249 A1; filed 02.08.18; publ. 29.11.18.
24. Tetyukhin V.V., Leder M.O., Kropotov V.A. et al. Status and Progress in wrought processing of titanium. *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*. Metals & Materials Society, 2016, pp. 249–256.
25. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryaev A.A., Nochovnyaya N.A. The use of ADL VAR L200 vacuum-arc furnace for ingots fabrication of high-temperature titanium aluminides base alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
26. Ponomarenko D.A., Skugorev A.V., Sidorov S.A., Stokov V.V. Technological capabilities of specialized isothermal presses with a force of 6.3 and 16 MN in the production of aircraft parts. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniyem*, 2015, no. 9, pp. 36–40.
27. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Mamonov I.M., Shmyrova A.V. Prediction of the mechanical properties of bars from the Ti–6Al–4V alloy depending on the strength equivalents for aluminum and molybdenum. *Titan*, 2021, no. 2 (71). pp. 25–33.
28. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. CRC Press, 2005. 216 p. DOI: 10.1201/9781420037678.
29. Tetyukhin V.V., Shibyanov A.S., Puzakov I.Yu. et al. Development of manufacturing technology for semi-finished products of titanium alloys, which excludes defect formation and increases the testability of the material. *Collection of reports VI All-Russia. conf. on testing and research of the properties of materials "TestMat"* (Moscow, February 12–13, 2015). Moscow: VIAM, 2015, p. 47.
30. Solonina O.P., Glazunov S.G. *Modern heat-resistant titanium alloys and prospects for their use in engines*. Moscow: Metallurgiya, 1974. 448 p.
31. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Yushin V.D. Influence of the type of loading on high-cycle fatigue of heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 09, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
32. Soldatenko I.V. Express method for quantitative assessment of the microstructure of ($\alpha + \beta$)-titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2017, no. 2, pp. 73–85.
33. Anoshkin N.F., Brun M.Ya., Shakhanova G.V. Requirements for a bimodal structure with an optimal set of mechanical properties and modes of its production. *Titan*, 1998, no. 1 (10). pp. 35–41.

Информация об авторах

Калашников Владимир Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Решетило Лилия Павловна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чучман Олег Викторович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Наприенко Сергей Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir S. Kalashnikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Lilia P. Reshetilo, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg V. Chuchman, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Naprienko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.11.2021.

The article was submitted 09.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 12.11.2021.