

---

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-51-66

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК ДИСКОВ КОМПРЕССОРА ИЗ СПЛАВА VT6, ИЗГОТОВЛЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

О.С. Кашапов<sup>1</sup>, Т.В. Павлова<sup>1</sup>, Д.В. Зайцев<sup>1</sup>, О.В. Чучман<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Приведены механические свойства штамповок дисков из сплава VT6, изготовленных в различных производственных условиях, отличающихся режимами термической обработки. Результаты исследований получены в начальный период работ по внедрению сплава VT6 для деталей двигателя и подтверждены в дальнейшем при паспортизации штамповок дисков массой до 100 кг. Приведено сравнение характеристик механических свойств штамповок одного вида из сплавов марок VT6 и VT3-1. Рассмотрены причины снижения характеристик вязкости материала.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, VT6, VT6ch, Ti6-4, микроструктура, механические свойства, термомеханическая обработка, термическая обработка, диски компрессора

**Для цитирования:** Кашапов О.С., Павлова Т.В., Зайцев Д.В., Чучман О.В. Сравнительный анализ механических свойств поковок и штамповок дисков компрессора из сплава VT6, изготовленных в различных производственных условиях // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 51–66. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-51-66.

Scientific article

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL OF VT6 ALLOY DISK FORGINGS, MANUFACTURED BY VARIOUS METHODS AND PRODUCTION CONDITIONS

O.S. Kashapov<sup>1</sup>, T.V. Pavlova<sup>1</sup>, D.V. Zaitsev<sup>1</sup>, O.V. Chuchman<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The article presents the mechanical properties of VT6 alloy disk forgings manufactured under various production conditions with different heat treatment modes. The research results presented in the main part of the article were obtained in the initial period of work on the introduction of VT6 alloy for engine parts and were confirmed later during the certification of disk forging weighing up to 100 kg. A comparison of the mechanical properties of stampings of the same type made of VT6 and VT3-1 alloys is given. The discussion pays special attention to the factors leading to a decrease in the viscosity characteristics of the material.

**Keywords:** titanium alloys, VT6, VT6ch, Ti6-4, microstructure, mechanical properties, thermomechanical treatment, heat treatment, compressor disks

**For citation:** Kashapov O.S., Pavlova T.V., Zaitsev D.V., Chuchman O.V. Comparative analysis of mechanical properties of the material of VT6 alloy disk forgings, manufactured by various methods and production conditions. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 51–66. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-51-66.

### Введение

Представленная статья продолжает тему качества материала штамповок из сплава VT6 для ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Ранее подробно рассмотрен вопрос о влиянии методов изготовления штамповок рабочих лопаток из сплава VT6 на механические свойства материала, проведен сравнительный анализ серийных штамповок лопаток из сплавов VT3-1 и VT6 с учетом анизотропии характеристик в зависимости от места (перо, замок) и направления (продольное, поперечное) вырезки образцов [1].

Переходя от штамповок лопаток к поковкам и штамповкам дисков, следует отметить следующие особенности технологии изготовления:

- изготовление исходных прутковых заготовок протяжкой в фигурных (вырезных) бойках с большой степенью накопленной деформации в двухфазной области на окончательных операциях, использование закалки в воде на операциях изготовления промежуточной заготовки;

- осадка в торец мерных заготовок, штамповка с возможностью некоторого варьирования температуры нагрева под деформацию при температурах двухфазной области;

- проведение термической обработки штамповок возможно по нескольким режимам (одноступенчатый отжиг, двойной отжиг с охлаждением на спокойном воздухе, под вентилятором или в воде после высокотемпературной ступени отжига).

При освоении изготовления штамповок дисков из сплава VT6 стояла задача по замене сплава VT3-1 по аналогии с штамповками из сплава VT6 для лопаток. Вариант сплава VT6 для дисков и лопаток отличался повышенным содержанием алюминия, ванадия и железа при меньшем содержании кислорода относительно зарубежного сплава-аналога Ti–6Al–4V [2–5]. Особо отметим, что в начальный период освоения сплава VT6 содержание кислорода в нем было заметно меньше. В данной статье представлены результаты исследования промышленных штамповок дисков, изготовленных в середине 1980-х гг. из слитков нескольких плавов с различным химическим составом. Проведено сравнение механических свойств поковок из сплава VT6, изготовленных в настоящее время, представлены результаты металлофизических исследований материала этих поковок, позволяющие указать причину снижения ударной вязкости и вязкости разрушения.

### Материалы и методы

Исследуемые в работе штамповки дисков изготавливали в промышленных условиях. По результатам анализа химического состава сплава VT6 содержание всех элементов и примесей соответствует действующим нормам. При этом для «фигурных» промышленных штамповок содержание примесей железа составило 0,35–0,40 % (по массе), кремния и углерода – по 0,01 % (по массе). Для штамповок в виде шайб специально варьировалось содержание железа: одна плавка была изготовлена без шихтовки железом (содержание железа в сплаве определялось содержанием примеси железа в титановой губке и шихтовых материалах), вторая плавка шихтовалась на предельное для сплава VT6 содержание железа, которое вводили в шихту в виде стружки. Уровень легирования плавов сплава VT6, использованных в данной работе, выраженный в алюминиевом и молибденовом структурных эквивалентах [6], приведен в табл. 1. Для сравнения

там же приведены средние значения по поковкам и штамповкам из сплава ВТ6 для деталей ГТД, изготавливаемым в настоящее время, а также для сплава ВТ6ч по имеющимся результатам приемо-сдаточных испытаний.

Таблица 1

**Уровень легирования материала штамповок дисков сплава ВТ6,  
исследованных в работе**

Сплав	Полуфабрикат	Уровень легирования, % (по массе), в структурных эквивалентах по алюминию и молибдену	
		[Al] <sup>eq</sup>	[Mo] <sup>eq</sup>
ВТ6	Штамповки дисков на период начала освоения производства	7,2–7,3	3,91–4,37
	Штамповки дисков* в настоящее время	7,9–8,2	3,7–4,2
	Штамповка в виде шайбы с минимальным содержанием железа 0,03 % (по массе) (без шихтовки железом)	7,6	3,06
	Штамповка в виде шайбы с максимальным содержанием железа 0,5 % (по массе)	7,4	3,93
	Штамповка в виде шайбы (исследование сварных соединений) с содержанием железа 0,4 % (по массе)	7,2	3,94
ВТ6ч	Поковки* со средним содержанием железа 0,17 % (по массе)	7,9	3,35
Тi6-4	Среднее по трем плавкам от разных производителей по данным работы [5]	8,13	3,18

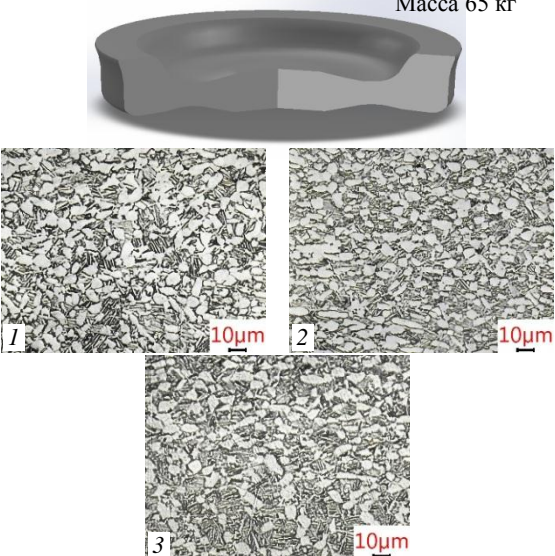
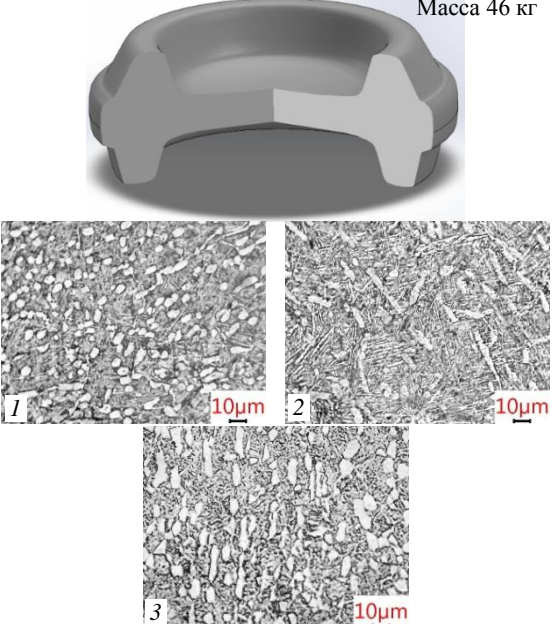
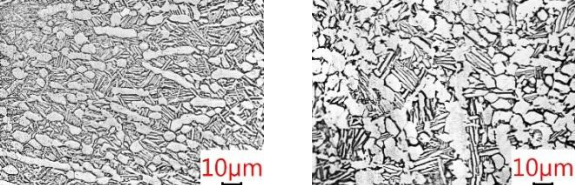
\* Средние значения.

Изготовление «фигурных» промышленных штамповок проводили из слитков сплава ВТ6 диаметром 540 мм, полученных методом двойного вакуумно-дугового переплава, которые подвергали всесторонней ковке при температурах  $\beta$ -области. После предварительной деформации слитков ковку продолжили вытяжкой на прутки при температурах нагрева в  $\beta$ -области при более низких температурах нагрева под деформацию. Полученные промежуточные прутки обтачивали и резали на мерные заготовки. Технологическая схема изготовления штамповок из мерных заготовок, их геометрическая форма и масса приведены в табл. 2.

Микроструктура материала всех исследуемых штамповок – глобулярно-пластинчатая, несколько отличающаяся по объемной доле первичной  $\alpha$ -фазы и степени сфероидизации частиц первичной  $\alpha$ -фазы.

Термическую обработку штамповок проводили по режиму одноступенчатого отжига [7], для штамповок типа «шайба» – температура первой ступени отжига увеличена на 50 °С [8–11].

Технологическая схема и геометрические характеристики  
штамповок дисков из сплава ВТ6

Условный номер штамповки	Схема изготовления	Геометрическая форма, масса, типичная микроструктура (1 – полотно, 2 – обод, 3 – ступица)
1	Осадка на шайбу в фигурном штампе в $\beta$ -области → калибровка шайбы в $\alpha + \beta$ -области → окончательная штамповка в $\alpha + \beta$ -области → термическая обработка	<p>Масса 65 кг</p> 
2	Осадка на шайбу в фигурном штампе в $\alpha + \beta$ -области → калибровка шайбы в $\alpha + \beta$ -области → окончательная штамповка в $\alpha + \beta$ -области → термическая обработка	<p>Масса 46 кг</p> 
Штамповки в виде шайбы	Осадка на шайбу плоским бойком в $\alpha + \beta$ -области за три выноса на высоту 35 мм, термическая обработка	 <p>Штамповка с максимальным содержанием железа      Штамповка с минимальным содержанием железа</p>

### Результаты и обсуждение

Механические свойства материала отдельных партий «фигурных» штамповок с учетом зон и направления вырезки образцов в формате «минимальное–максимальное» значения приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

#### Механические свойства «фигурных» штамповок дисков из сплава ВТ6 при комнатной температуре («минимальное–максимальное» значения)

Место вырезки образцов (направление вырезки)	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	$\psi$	КСУ	КСТ	$\sigma_{-1}$ , МПа, при $N = 2 \cdot 10^7$ цикл	$\sigma_0$ , МПа, при $N = 1 \cdot 10^4$ цикл
		%		Дж/см <sup>2</sup>		образцы гладкие/с надрезом (среднее значение, вероятность разрушения $P = 50\%$ )	
Штамповка 1							
Обод (хордовое)	971–1010	13,0–15,0	29,0–45,0	44–64	19–25	481/–	930/441
Полотно (хордовое)	991–1010	13,0–13,5	30,5–42,0	64–79	22–25		
Ступица (хордовое)	976–1030	13,0–15,0	32,0–49,0	44–59		–	–
Штамповка 2							
Обод (хордовое)	991–1030	15,0–16,5	46,0–51,0	49–59	25–31	470/235	890/421
Обод (высотное)	961–1020	13,0–13,5	39,0–49,0	51–55	31–34		
Полотно (хордовое)	971–991	12,0–16,0	40,0–44,0	59–79	–		
Полотно (радиальное)			42,0–47,0	59–62	23–27		

Таблица 4

#### Механические свойства «фигурных» штамповок дисков из сплава ВТ6 при температурах испытаний 350 и 400 °С (кратковременная прочность – минимальные значения, длительная прочность и ползучесть – средние значения)

Место вырезки образцов	$\sigma_b^{350^\circ}$	$\sigma_b^{400^\circ}$	$\sigma_{100}^{350^\circ}$	$\sigma_{500}^{350^\circ}$	$\sigma_{100}^{400^\circ}$	$\sigma_{500}^{400^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{350^\circ}$
	МПа						
Штамповка 1							
Обод, полотно	746	726	667	589	608	–	569
Штамповка 2							
Обод, полотно	755	736	706	687	618	589	–

Помимо результатов исследований партий «фигурных» штамповок двух видов из сплава ВТ6, обобщены результаты приемо-сдаточных испытаний аналогичных штамповок из сплава ВТ6 за двухлетний период и ранее изготавливаемых серийных штамповок из сплава ВТЗ-1 этих шифров. Результаты анализа механических свойств по результатам приемо-сдаточных испытаний образцов из контрольной зоны (обод, хордовое направление) приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Механические свойства штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ3-1 по результатам прямо-сдаточных испытаний при комнатной температуре («минимальное–максимальное»/среднее значения)**

Сплав	Тип штамповки	Количество испытаний	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	$\psi$	КСУ	КСТ
				%			
ВТ6	1	60	971–1118	9,0–17,0	29,0–54,0	34–69	17,7–35,3
			1040	12,1	43,8	44	22,6
ВТ3-1	1	140 (50 – для КСТ)	971–1128	8,0–20,0	22,0–51,0	30–59	7,4–34,3
			1055	13,2	35,0	35	16
ВТ6	2	15	979–1001	12,4–16,5	41,5–46,7	58–78,5	28,5–36,3
			989	14,4	44,1	68	32,4
ВТ3-1	2	15	1010–1045	8,0–20,0	35,0–48,0	33–61	11,8–25,5
			1030	14,0	41,5	48	18,6

Примечание. КСТ – камера соляного тумана.

Таблица 6

**Сопротивление усталости материала «фигурных» штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ3-1 (среднее значение, вероятность разрушения  $P = 50\%$ )**

Сплав	Тип штамповки	$\sigma_{-1}^L / \sigma_{-1}^H$ при 20 °С, МПа ( $N = 2 \cdot 10^7$ цикл)	$\sigma_{-1}^L / \sigma_{-1}^H$ при 350 °С, МПа ( $N = 2 \cdot 10^7$ цикл)	$\sigma_0^L / \sigma_0^H$ при 20 °С, МПа ( $N = 1 \cdot 10^4$ цикл)
ВТ6	1	510/–	481/177	932/442
ВТ3-1	1	461/–	–	883/363
ВТ6	2	471/235	–	883/422
ВТ3-1	2	432/157	–	–

Механические свойства материала штамповок в виде шайб двух плавов с различным содержанием железа приведены в табл. 7. В пунктах 3–5 этой таблицы приведены минимальные значения механических свойств для плавки сплава ВТ6 с содержанием железа 0,5 % (по массе) после дополнительного одноступенчатого отжига по режиму объемного послесварочного вакуумного отжига сварной секции ротора компрессора (пункт 3), последующий неполный отжиг для снятия напряжений, применяемый после механической обработки (пункт 4), и эксплуатационный нагрев (пункт 5).

Таблица 7

**Механические свойства штамповок в виде шайб из сплава ВТ6 в зависимости от содержания железа и термической обработки, исходное состояние – одноступенчатый отжиг (минимальные значения)**

Пункт	Состояние материала	$\sigma_b^{20^\circ}$ , МПа	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_b^{350^\circ}$ , МПа
			%			
1	Сплав без шихтовки железом	961	16	39	59	–
2	Сплав с 0,5 % (по массе) железа	1069	16	56	72	–
3	2 + дополнительный одноступенчатый отжиг со скоростью охлаждения ~10 °С/мин	1010	16	53	67	706
4	3 + неполный отжиг для снятия напряжений после механической обработки	1010	17	56	59	706
5	4 + выдержка 500 ч при температуре 300 °С	1010	16	50	49	–

«Фигурные» штамповки дисков из сплава ВТ6, отнесенные условно к первому типу (1), имеют большие показатели поперечного сужения, ударной вязкости и работы разрушения образцов с усталостной трещиной КСТ по сравнению со штамповками из сплава ВТЗ-1 (табл. 3 и 5) [12] при одинаковом уровне кратковременной прочности. «Фигурные» штамповки дисков из сплава ВТ6 другого вида (тип 2) при меньшем уровне кратковременной прочности (на ~50 МПа) также показывают заметно более высокие характеристики ударной вязкости и вязкости разрушения по сравнению со сплавом ВТЗ-1 [13]. Анализ результатов серийных приемо-сдаточных испытаний (табл. 5) показывает большую стабильность механических свойств материала штамповок второго типа, что, по-видимому, связано с большей величиной накопленной деформации в двухфазной области на операциях осадки на шайбу и штамповки. Как видно из данных табл. 6, материал исследованных штамповок массой до 65 кг из сплава ВТ6 обладает более высокими значениями предела выносливости гладких и надрезанных образцов как в малоцикловой области долговечности, так и в многоцикловой. Отметим, что для сплавов ВТЗ-1 и Тi6-4 характеристики ударной вязкости, вязкости разрушения и чувствительности к концентраторам напряжений при различных испытаниях могут снижаться в связи с выделением фазы Ti<sub>3</sub>Al.

Приведенные в данной статье результаты испытаний материала штамповок дисков в дальнейшем подтверждены при паспортизации (общей квалификации) [14–17] штамповок дисков из сплава ВТ6, проводимой в период с 1989 по 1992 г. на промышленных штамповках массой до 100 кг. Работы проводили на пяти партиях-плавках. Частично эти результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Механические свойства штамповок дисков из сплава ВТ6  
(«минимальное–максимальное»/среднее значения)  
после одноступенчатого отжига при комнатной температуре**

σ <sub>в</sub> , МПа	δ	ψ	КСУ	КСТ	K <sub>1с</sub> , МПа√м	σ <sub>0</sub> <sup>H</sup> , МПа, при N = 1·10 <sup>4</sup> цикл
	%		Дж/см <sup>2</sup>			
941–1040	11,0–18,0	30,0–55,0	44–70	16–50	86–108,5	490
991	14,5	40,0	53	35		

Значительный объем исследований по сплаву ВТ6 необходим, чтобы подтвердить как его технологические преимущества на этапах металлургического производства, так и достоинства, заключающиеся в его высоких значениях вязкости разрушения и низкой чувствительности к концентраторам напряжений.

Уровень механических свойств в деформированных полуфабрикатах из титановых сплавов зависит от производственных условий, разработанных технологических схем изготовления и фактических режимов термомеханической и термической обработки. Совокупность этих факторов образует специфический подход, который можно описать общеупотребительным термином – технологическая наследственность. При анализе качества продукции термин можно расширить до металлургических процессов, начиная с выплавки слитков, тем самым определяя фактическое содержание примесей и основных легирующих элементов. Так, в работе [5] для горячекатаных прутков из сплава ВТ6, изготовленных в условиях ЗАО «ПО «Зубцовский машиностроительный завод», выявлено снижение кратковременной прочности и повышение относительного удлинения с увеличением размера частиц первичной α-фазы. Этот вывод распространяется на прутки, термически обработанные по различным режимам. При этом уровень легирования сплава ВТ6, изготовленного в данных производственных условиях,

составляет  $[Al]^{eq} = 7,34 \%$  (по массе) и  $[Mo]^{eq} = 3,23 \%$  (по массе) и обеспечивает средний уровень прочности  $\sigma_b = 1013$  МПа. Недостаточный уровень легирования алюминия, кислородом, ванадием и железом, по сравнению со средним уровнем легирования сплава ВТ6 для деталей двигателя в настоящее время (табл. 1, строка 2), по уровню кратковременной прочности компенсируется повышенным содержанием примеси углерода, а также большей дисперсностью частиц первичной  $\alpha$ -фазы в катаных прутках (по сравнению с поковками и штамповками). Этим объясняется возможность значительного отклонения значений по ударной вязкости в прутках (характеристика КСУ изменяется от 31 до 90 Дж/см<sup>2</sup> при норме  $\geq 30$  или  $\geq 40$  Дж/см<sup>2</sup> в зависимости от диаметра).

Фактор термической обработки имеет существенное значение по совокупности прочностных характеристик, ударной вязкости и вязкости разрушения. Результаты приемо-сдаточных испытаний серийных штамповок дисков массой до 100 кг с химическим составом, близким к указанному в табл. 1, строка 2, изготавливаемых в настоящее время, показали следующее. Основные различия между одноступенчатым и двойным отжигом по механическим свойствам наблюдаются в уровне характеристик КСУ и КСТ: при приблизительно одинаковом уровне характеристик кратковременной прочности и пластичности (средние значения по табл. 8), материал штамповок дисков после двойного отжига имеет заметно более высокие показатели ударной вязкости с обоими видами надреза. По минимальным значениям ударной вязкости КСУ преимущество двойного отжига составляет ~17 %, по ударной вязкости КСТ значительно больше – около 70 %, т. е. близко к среднему уровню, указанному в табл. 8. Если рассматривать режим термической обработки с закалкой в воде от температуры вблизи верхней границы двухфазной области, то повышение температуры второй ступени с 750 до 800 °С статистически существенно не меняет уровень значений КСУ, однако для отдельных шифров штамповок позволяет обеспечить нормируемый показатель  $КСУ \geq 40$  Дж/см<sup>2</sup> с повышением минимального уровня КСТ более чем на 30 %. В целом применение охлаждения в воде после первой ступени термической обработки позволяет увеличить ряд прочностных характеристик: непосредственно кратковременную прочность в интервале рабочих температур, сопротивление усталости гладких образцов и образцов с надрезом, длительную прочность гладких образцов при температуре испытаний 350 °С. При определенных условиях охлаждение в воде демонстрирует весьма существенное преимущество по многоциклового усталости материала на гладких образцах по сравнению с одноступенчатым или двойным отжигом – более чем на 20 % при сохранении предела выносливости образцов с надрезом на том же уровне.

При испытаниях более крупных серийных штамповок дисков из сплава ВТ6 (массой >100 кг), проведенных в последнее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, получены следующие характеристики ударной вязкости и вязкости разрушения (табл. 9 и 10). В соответствии с действующими рекомендациями, наиболее крупные штамповки (табл. 10) проходили механическую обработку перед термической обработкой для снижения величины сечения, что улучшает условия охлаждения.

Таблица 9

**Ударная вязкость (минимальные значения) материала крупных серийных штамповок из сплава ВТ6 массой до 200 кг (по результатам паспортизации в 1994 г.)**

Показатель	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> , после термической обработки	
	Одноступенчатый отжиг	Охлаждение в воде + отжиг 750 °С
КСУ	$\geq 49$	$\geq 44$
КСТ	$\geq 20$	$\geq 15$

Таблица 10

**Ударная вязкость ( $K_{CU}$  и  $K_{CT}$ ) и вязкость разрушения ( $K_{Ic}$ ) материала крупных серийных штамповок из сплава ВТ6 массой >200 кг (фактическое сечение штамповок под механическую обработку не превышает 70 мм, масса обточенной штамповки ~119 кг)**

Показатель	Ударная вязкость и вязкость разрушения после термической обработки	
	Двойной отжиг (на одной плавке)	Охлаждение в воде + отжиг 750 °С (на одной плавке)
$K_{CU}$ , Дж/см <sup>2</sup>	49,0–56,8	46,1–54,9
$K_{CT}$ , Дж/см <sup>2</sup>	12,7–24,5	12,0–15,6
$K_{Ic}$ , МПа√м (среднее по трем образцам)	77,3	79,3

Видно, что характеристики  $K_{CT}$  и  $K_{Ic}$  материала штамповок заметно снижаются по сравнению с ранее полученными на штамповках массой до 100 и 200 кг.

К причинам, вызывающим снижение характеристик ударной вязкости и вязкости разрушения в крупных штамповках из сплава ВТ6 с глобулярно-пластинчатым типом микроструктуры, могут быть отнесены изменения в химическом составе частиц превращенной  $\alpha$ -фазы и прослоек  $\beta$ -фазы в зависимости от скорости охлаждения. При определенных скоростях охлаждения  $\beta$ -фаза «пересыщается» алюминием, а превращенная  $\alpha$ -фаза содержит избыточное по отношению к стабильному состоянию количество ванадия. Этот процесс подробно описан в работах [18, 19]. При нагреве сплавов типа Тi6-4 количество  $\beta$ -фазы существенно не изменяется до температуры 800 °С, аналогичную тенденцию следует ожидать и для других сплавов-аналогов. Тем не менее увеличение температуры на второй ступени термической обработки после охлаждения в воде до 800 °С по опыту со штамповками меньшей массы может дать прирост характеристик вязкости разрушения материала вследствие ускорения диффузионных процессов и стабилизации химического состава фаз.

При этом анализ технологии изготовления штамповки показал, что ее правку проводили при заниженной температуре относительно рекомендованного температурного интервала. Совокупное влияние вышеуказанных факторов можно расценивать как причину снижения свойств.

Если рассматривать работу разрушения образцов с усталостной трещиной  $K_{CT}$ , то ее низкие значения вместе с характеристикой вязкости  $K_{Ic}$  могут указывать на снижение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений при испытаниях на скорость роста трещины усталости (СРТУ), которое для титановых сплавов находится в области до  $\Delta K \approx 8$  и соответствует переходу от «малых» усталостных трещин к росту «больших» трещин [20–24], что требует дополнительных испытаний и исследований.

Важным для сплавов типа ВТ6 и Тi6-4 является влияние содержания кислорода, которое отражается не только на значениях ударной вязкости и вязкости разрушения, но и на накоплении повреждений в материале в условиях циклического нагружения, включая малоцикловую усталость с выдержкой при максимальном напряжении цикла. В модельном  $\alpha$ -сплаве Тi-7Al-O (с химическим составом первичной  $\alpha$ -фазы сплава Тi6-4) [25–27], увеличение содержания кислорода с 0,05 до 0,25 % (по массе) (уровень легирования  $\alpha$ -фазы возрастает с  $[Al]^{eq} \approx 7,5$  % (по массе) до  $[Al]^{eq} \approx 9,5$  % (по массе)) для одинаковых условий нагружения, повышенного содержания кислорода вместе с интенсивным выделением фазы Тi<sub>3</sub>Al приводит к существенному росту плотности дислокаций [28–31].

Исследуя уровень ударной вязкости и вязкости разрушения в отечественных сплавах типа ВТ6, нельзя не упомянуть сплав ВТ6ч [32, 33], применяемый для изготовления крупногабаритных поковок для деталей планера, кратно превосходящих по массе и габаритам штамповки и поковки дисков. Для таких сборочных единиц планера необходимо изготовление сварных конструкций. Большие сечения сваривают многопроходной электронно-лучевой сваркой, в отдельных случаях требуется ремонт и подварка в связи с растрескиванием из-за высоких послесварочных и термических напряжений [34]. Поэтому на базе сплава ВТ6, первоначально применяемого для конструкций планера в листовом варианте для деталей двигателя, появилась его модификация – сплав ВТ6ч со сниженным содержанием ванадия, железа, углерода и кислорода относительно сплава ВТ6 для деталей двигателя. Изделия из сплава ВТ6ч можно изготавливать путем деформации или термической обработки как в двухфазной области, так и в однофазной  $\beta$ -области. Последний метод в данной статье не рассматривается, так как штамповки дисков изготавливают при температурах двухфазной области. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на штамповках с преимущественно глобулярной микроструктурой из сплава ВТ6ч при комнатной температуре получен следующий уровень свойств (средние значения):  $\sigma_b = 922$  МПа,  $\delta = 9,0$  %,  $\psi = 16,2$  %,  $KCU = 52$  Дж/см<sup>2</sup>,  $K_{Ic} = 95$  МПа $\sqrt{м}$ . Серийные штамповки сечением 86–170 мм из сплава ВТ6ч, изготовленные в 2024 г., по данным всесторонних исследований обладают при комнатной температуре следующим уровнем свойств:  $\sigma_b \geq 898$  МПа,  $\delta \geq 14,7$  %,  $\psi \geq 28,9$  %,  $KCU \geq 44$  Дж/см<sup>2</sup>. При несколько меньшей средней кратковременной прочности, сниженных характеристиках пластичности из-за различия в накопленной деформации при температурах двухфазной области, особо крупные поковки из сплава ВТ6ч сохраняют преимущества по значениям ударной вязкости и вязкости разрушения.

### Заключения

Переходя к результатам испытаний, представленным в данной статье, а также обобщая ранее опубликованные результаты исследований штамповок лопаток из сплава ВТ6, следует отметить следующее.

Как в отечественном сплаве ВТ6, так и в зарубежном сплаве Ti6-4 железо относится к примесям, однако без его введения прочностные характеристики сплава ВТ6 находятся на низком уровне. В таком варианте сплав ВТ6 не может конкурировать с другими двухфазными титановыми сплавами, применяемыми для изготовления деталей ГТД. При этом содержании железа (на уровне, близком к предельно допустимому) сохраняются высокие характеристики пластичности и ударной вязкости материала.

Преимущества сплава ВТ6, заключающиеся в меньшей чувствительности к концентраторам напряжений при испытаниях на статическое растяжение и сопротивление усталости, позволили рекомендовать его для изготовления деталей двигателя с рабочей температурой до 300 °С. Аналогичные выводы сделаны по штамповкам лопаток (подробно об этом – см. работу [1]).

В отсутствии значимого скопления примесных элементов внедрения (прежде всего – кремния и углерода) ударная вязкость материала сохраняется на высоком уровне, в том числе в случае термической обработки с охлаждением в воде и высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), а также при высоком содержании железа.

Наличие контроля химического состава, требований к структуре материала и уровню механических свойств при испытаниях на растяжение и ударный изгиб позволяют в некоторой степени «дисциплинировать» производителя, выявляя основные особенности и причинно-следственные связи между действующей технологической цепочкой и результатами приемо-сдаточных испытаний. Отмечено, что при изготовлении продукции, предназначенной для деталей ГТД, в директивной технологической документации имеются обязательные требования к основным технологическим операциям

металлургического производства, начиная с шихтовки и выплавки слитков, видам контроля на каждом металлургическом цикле, а также дополнительным характеристикам, имеющим непосредственное отношение к подтверждению металлургического качества продукции конкретной партии-плавки. В качестве примера можно привести температуру полного полиморфного превращения, которая нормируется для каждой марки сплава. Исключение из сложившейся системы контроля металлургической продукции характеристик ударной вязкости *КСУ* и *КСТ* (для штамповок дисков и крупногабаритных штамповок лопаток), безусловно, снизит ее качество. Случаи снижения этих характеристик требуют объяснения и не должны игнорироваться производителем и потребителем продукции. Отметим, что случаи несоответствия характеристики *КСТ* по результатам контроля готовой продукции на штамповках дисков из жаропрочного титанового сплава ВТ9, имеющие место с 2022 г., по предварительным результатам анализа указывают на наличие критического количества введенных отходов (как кусковых, так и стружки) при производстве слитков. Подобный подход при производстве слитков недопустим – как для ответственных деталей авиационных двигателей, так и для изделий авиационной техники. Любые существенные изменения шихтовки производимых слитков должны сопровождаться работами с участием отраслевых институтов, включающими глубокий анализ статистических данных по колебанию механических свойств в зависимости от набора шихтовых материалов, а также непосредственную оценку итогового химического состава и свойств полуфабрикатов, изготовленных из опытных слитков. Сплав ВТ6ч в данном случае оказывается в более выгодном положении из-за ограничений по содержанию кислорода, углерода и железа.

В соответствии с ГОСТ Р 58175–2018 «Авиационная техника. Управление поставщиками при создании авиационной техники. Общие требования», введенном в действие 01.09.2018 и разработанном в рамках работы технического комитета по стандартизации № 323 «Авиационная техника», вся полнота ответственности за качество произведенного материала возложена на потребителя (головного разработчика, головного изготовителя). Между тем при возникновении вопросов по соблюдению технологических норм и по качеству материала, в отсутствие взаимодействия организаций, сертифицирующих производство, и организаций, контролирующих конкретное производство, потребитель не в состоянии принять решение. Поэтому в большинстве случаев потребитель обращается в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Ввиду этого является крайне важным закрепление в выпускаемой нормативной документации за институтом функции контроля соблюдения требований к технологии и свойствам полуфабрикатов путем согласования отчетов о всесторонних исследованиях, а также направление для анализа статистики по результатам приемосдаточных испытаний. Для обеспечения прослеживаемости взаимосвязи состава, процессов изготовления, свойств и характеристик применяемые в авиационной отрасли материалы должны пройти общую квалификацию в соответствии с ПНСТ 658-2022 [15]. При этом основная функция института осталась прежней – разработка новых авиационных материалов [35].

Приведенные в данной статье отдельные сведения по работам, связанным с освоением производства полуфабрикатов из сплава ВТ6, свидетельствуют о значительных практических усилиях, требуемых от всех заинтересованных сторон ввиду необходимости масштабных работ по подтверждению тех или иных технических решений. В этом смысле действующая нормативная документация длительно совершенствовалась. Нормируемые показатели технических требований к материалу не следует путать с расчетными значениями прочностных характеристик, которые определяются при специальной квалификации [36–38] нормами Авиационных правил и характеристиками надежности [39, 40]. Отметим, что действующая отраслевая документация прямо предусматривает введение по соглашению сторон дополнительных технических требований к материалу при наличии такой необходимости.

Проблема снижения характеристик ударной вязкости и вязкости разрушения, разброса значений долговечности при испытании образцов с надрезом на малоцикловую усталость крупных штамповок из сплава ВТ6 массой 200–500 кг ставит под сомнение целесообразность применения сплава ВТ6 в подобных изделиях. В связи с этим производитель обязан установить причинно-следственные связи, провести производственные мероприятия для исправления ситуации со штамповками дисков из сплава ВТ6.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность А.В. Заводову за проведенные исследования материала штамповок дисков из сплава ВТ6 методом просвечивающей электронной микроскопии, а также А.Р. Кондратьеву, А.В. Несоленову за помощь, которую они оказали при оформлении статьи. Авторы отдельно благодарят сотрудников лаборатории титановых сплавов за замечания и предложения при обсуждении рукописи статьи.

### **Список источников**

1. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В., Гончарова Л.Ю. Сравнительный анализ механических свойств материала штамповок из сплава ВТ6, изготовленных различными методами, а также в различных производственных условиях // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). С. 22–37. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-25-37.
2. Du S., Song Y., He Y. et al. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Alloy under Heat Treatment and Multi-Axial Forging // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 1060–1079. DOI: 10.3390/ma17051060.
3. Yan-Wei S., Ai-Hui L., Bang-Sheng L., Jing-Jie G. Relationship between Thickness of Lamellar  $\alpha+\beta$  Phase and Mechanical Properties of Titanium Alloy // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 311–313. P. 1916–1919. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.1916.
4. Julien R., Velay V., Vidal V. et al. Characterization and modeling of forged Ti–6Al–4V Titanium alloy with microstructural considerations during quenching process // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 142–143. P. 456–467. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.05.023.
5. Neminathan P.V., Yadav J.S., Reddy K.R. et al. Development of disc forgings in Ti–6Al–4V alloy for aero-engine application // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2008. Vol. 61. No. 5. P. 363–370.
6. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В. Влияние химического состава и параметров глобулярной структуры на механические свойства прутков из титанового сплава ВТ6 // *Электротехнология*. 2025. № 2. С. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-2-20-29.
7. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. 1st ed. CRC Press, 2005. 216 p. DOI: 10.1201/9781420037678.
8. Ji H., Zhanshuo P., Xiaomin H. et al. Dynamic recrystallization of Ti–6Al–4V titanium alloy based on cellular automata // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 237. DOI: 10.1177/09544089221125575.
9. Seo S., Jung M., Park J. Microstructure control for enhancing the combination of strength and elongation in Ti–6Al–4V through heat treatment // *Metals*. 2024. Vol. 14. P. 985. DOI: 10.3390/met14090985.
10. Senkov O.N., Senkova S.V., Valencia J. et al. Effect of cooling rate on microstructure of Ti–6Al–4V forging // *Materials Science and Technology*. 2002. Vol. 18. P. 1470–1478. DOI: 10.1179/026708302225007808.
11. Elmer J.W., Palmer T.A., Babu S.S. et al. In situ observations of lattice expansion and transformation rates of  $\alpha$  and  $\beta$  phases in Ti–6Al–4V // *Materials Science and Engineering A*. 2005. Vol. 391. P. 104–113.
12. Денисов Ю.П. Исследование химической микронеоднородности в двухфазных титановых сплавах на примере ВТ3-1: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 25 с.
13. Солонина О.П., Глазунов С.Г. *Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях*. М.: Металлургия, 1974. 448 с.

14. Горбовец М.А., Славин А.В. Доказательство соответствия материала требованиям Части 33 Авиационных правил // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
15. ПНСТ 658–2022. Материалы авиационные. Порядок общей и специальной квалификации. URL: <https://gostassistant.ru/doc/0f8e057e-14bd-4e3f-b3bd-6b67c5efb163> (дата обращения: 17.05.2025).
16. Беренсон В.Ф., Шевченко Ю.Н., Компаниец А.С. Паспортизация и сертификация авиационных материалов – гарантия их качества // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002 гг. М.: ВИАМ, 2002. С. 409–412.
17. Горбовец М.А., Ходинев В.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). С. 96–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
18. Callegari B., Marçola J.V., Aristizabal K. et al. Effect of microstructure on Ti<sub>3</sub>Al precipitation during ageing of Ti–6Al–4V alloy // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 321. P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/202032103013.
19. Radecka A., Bagot P.A.J., Martin T.L. et al. The formation of ordered clusters in Ti–7Al and Ti–6Al–4V // Acta Materialia. 2016. Vol. 112. P. 141–149. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.080.
20. Tabei V., Toda H., Hassanipour M. et al. 3D short fatigue crack closure behavior in Ti–6Al–4V alloy investigated using in-situ high resolution synchrotron X-ray tomography // Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 249. Art. 107755. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107755.
21. Junet A., Messenger A., Weck A. et al. Internal fatigue crack propagation in a Ti–6Al–4V alloy: an in situ study // International Journal of Fatigue. 2023. Vol. 168. Art. 107450. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107450.
22. Wang K., Wang F., Cui W. et al. Prediction of short fatigue crack growth of Ti–6Al–4V // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2014. Vol. 37. P. 1075–1086. DOI: 10.1111/ffe.12177.
23. Wei K., Ma Q., Wang G. et al. Exploration of the material transfer effect in local loading forming of ultra-large-size integrated component with multi-rib // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 108. P. 1413–1427. DOI: 10.1007/s00170-020-05517-1.
24. Kuntz L., Pokorný P., Koněčná R. et al. Propagation of long fatigue cracks in Ti6Al4V alloy produced by direct metal laser sintering // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 17. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.030.
25. Ivanov B., Manokhin S.S., Kolobov Y.R. et al. Phase composition and microstructure of Ti–6Al–4V alloy after hydrogen-plastic working // Materials Physics and Mechanics. 2010. Vol. 10. P. 62–71.
26. Gardner H., Radecka A., Rugg D. et al. Study of interaction of oxygen with the  $\alpha_2$  phase in model alloy Ti-7 wt.% Al // Scripta Materialia. 2020. Vol. 185. P. 111–116. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.048.
27. Venkataraman A., Shade P., Adebisi R. et al. Structure and deformation pathways in Ti-7Al using atomistic simulations, experiments, and characterization // Metallurgical and Materials Transactions A. 2017. Vol. 48A. P. 2222–2235. DOI: 10.1007/s11661-017-4024-y.
28. Chatterjee K., Venkataraman A., Garbaciak T. et al. Study of grain-level deformation and residual stresses in Ti-7Al under combined bending and tension using high energy diffraction microscopy (HEDM) // International Journal of Solids and Structures. 2016. Vol. 94–95. P. 35–49. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.05.010.
29. Worsnop F., Lim R., Bernier J. et al. The influence of alloying on slip intermittency and implications for dwell fatigue in titanium // Nature Communications. 2022. Vol. 13. Art. 5949. DOI: 10.1038/s41467-022-33437-z.
30. Radecka A., Coakley J., Jones I. et al. Ordering and micromechanics of Ti-7Al // Materials Science and Engineering A. 2015. Vol. 646. P. 1–26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.070.
31. Xu Y., Worsnop F., Dye D., Dunne F. Slip intermittency and dwell fatigue in titanium alloys: discrete dislocation plasticity analysis: Preprint. 2023. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372286366\\_Slip\\_intermittency\\_and\\_dwell\\_fatigue\\_in\\_titanium\\_alloys\\_a\\_discrete\\_dislocation\\_plasticity\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/372286366_Slip_intermittency_and_dwell_fatigue_in_titanium_alloys_a_discrete_dislocation_plasticity_analysis) (дата обращения: 18.05.2025). DOI: 10.48550/arXiv.2307.05316.

32. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
33. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В. Исследование механических свойств и структуры штамповок из сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область // *Труды ВИАМ*. 2024. № 7 (137). С. 24–33. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.
34. Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности ремонта сварных конструкций больших толщин из титанового сплава ВТ6ч // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). С. 34–43. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-34-43.
35. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
36. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
37. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели*. 2014. № 31. С. 43–47.
38. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. № 4. С. 28–29.
39. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Славин А.В., Кабанов И.В., Громов В.И., Ампилогов А.Ю., Яковлев Н.О., Поляков А.Н., Якушева Н.А. Расчетные характеристики прочности сталей ВКС-9М и 300М // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 3. С. 51–60.
40. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. С. 9–11.

#### References

1. Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V., Goncharova L.Yu. Comparative analysis of mechanical properties of the material of VT6 alloy forgings, manufactured by various methods and production conditions. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), pp. 22–37. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-25-37.
2. Du S., Song Y., He Y. et al. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Alloy under Heat Treatment and Multi-Axial Forging. *Materials*, 2024, vol. 17, pp. 1060–1079. DOI: 10.3390/ma17051060.
3. Yan-Wei S., Ai-Hui L., Bang-Sheng L., Jing-Jie G. Relationship between Thickness of Lamellar  $\alpha+\beta$  Phase and Mechanical Properties of Titanium Alloy. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 311–313, pp. 1916–1919. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.1916.
4. Julien R., Velay V., Vidal V. et al. Characterization and modeling of forged Ti–6Al–4V Titanium alloy with microstructural considerations during quenching process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 142–143, pp. 456–467. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.05.023.
5. Neminathan P.V., Yadav J.S., Reddy K.R. et al. Development of disc forgings in Ti–6Al–4V alloy for aero-engine application. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2008, vol. 61, no. 5, pp. 363–370.
6. Egorova Yu.B., Davydenko L.V. Influence of chemical composition and parameters of globular structure on the mechanical properties of rods made of titanium alloy VT6. *Electrometallurgiya*, 2025, no. 2, pp. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-2-20-29.
7. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. 1st ed. CRC Press, 2005, 216 p. DOI: 10.1201/9781420037678.
8. Ji H., Zhanshuo P., Xiaomin H. et al. Dynamic recrystallization of Ti–6Al–4V titanium alloy based on cellular automata. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023, vol. 237. DOI: 10.1177/09544089221125575.
9. Seo S., Jung M., Park J. Microstructure control for enhancing the combination of strength and elongation in Ti–6Al–4V through heat treatment. *Metals*, 2024, vol. 14, p. 985. DOI: 10.3390/met14090985.

10. Senkov O.N., Senkova S.V., Valencia J. et al. Effect of cooling rate on microstructure of Ti–6Al–4V forging. *Materials Science and Technology*, 2002, vol. 18, pp. 1470–1478. DOI: 10.1179/026708302225007808.
11. Elmer J.W., Palmer T.A., Babu S.S. et al. In situ observations of lattice expansion and transformation rates of  $\alpha$  and  $\beta$  phases in Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 391, pp. 104–113.
12. Denisov Yu.P. *Study of chemical microheterogeneity in two-phase titanium alloys using VT3-1 as an example*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 1981, 25 p.
13. Solonina O.P., Glazunov S.G. *Modern heat-resistant titanium alloys and prospects for their application in engines*. Moscow: Metallurgy, 1974, 448 p.
14. Gorbovets M.A., Slavin A.V. Proof of material compliance with the requirements to part No. 33 of JARs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
15. Preliminary National Standard 658–2022. *Aviation Materials. General and Special Qualification Procedure*. Available at: <https://gostassistant.ru/doc/0fbc057e-14bd-4e3f-b3bd-6b67c5efb163> (accessed: May 17, 2025).
16. Berenson V.F., Shevchenko Yu.N., Kompaniets A.S. Passportization and certification of aviation materials – a guarantee of their quality. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: VIAM, 2002, pp. 409–412.
17. 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), pp. 96–104. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
18. Callegari B., Marçola J.V., Aristizabal K. et al. Effect of microstructure on Ti<sub>3</sub>Al precipitation during ageing of Ti–6Al–4V alloy. *MATEC Web of Conferences*, 2020, vol. 321, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/202032103013.
19. Radecka A., Bagot P.A.J., Martin T.L. et al. The formation of ordered clusters in Ti–7Al and Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 2016, vol. 112, pp. 141–149. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.080.
20. Tubei V., Toda H., Hassanipour M. et al. 3D short fatigue crack closure behavior in Ti–6Al–4V alloy investigated using in-situ high resolution synchrotron X-ray tomography. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, vol. 249, art. 107755. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107755.
21. Junet A., Messenger A., Weck A. et al. Internal fatigue crack propagation in a Ti–6Al–4V alloy: an in situ study. *International Journal of Fatigue*, 2023, vol. 168, art. 107450. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107450.
22. Wang K., Wang F., Cui W. et al. Prediction of short fatigue crack growth of Ti–6Al–4V. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, vol. 37, pp. 1075–1086. DOI: 10.1111/ffe.12177.
23. Wei K., Ma Q., Wang G. et al. Exploration of the material transfer effect in local loading forming of ultra-large-size integrated component with multi-rib. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 1413–1427. DOI: 10.1007/s00170-020-05517-1.
24. Kuntz L., Pokorný P., Koněčná R. et al. Propagation of long fatigue cracks in Ti6Al4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 17, pp. 222–229. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.030.
25. Ivanov B., Manokhin S.S., Kolobov Y.R. et al. Phase composition and microstructure of Ti–6Al–4V alloy after hydrogen-plastic working. *Materials Physics and Mechanics*, 2010, vol. 10, pp. 62–71.
26. Gardner H., Radecka A., Rugg D. et al. Study of interaction of oxygen with the  $\alpha_2$  phase in model alloy Ti-7 wt.% Al. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 185, pp. 111–116. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.048.
27. Venkataraman A., Shade P., Adebisi R. et al. Structure and deformation pathways in Ti-7Al using atomistic simulations, experiments, and characterization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48A, pp. 2222–2235. DOI: 10.1007/s11661-017-4024-y.

28. Chatterjee K., Venkataraman A., Garbaciak T. et al. Study of grain-level deformation and residual stresses in Ti-7Al under combined bending and tension using high energy diffraction microscopy (HEDM). *International Journal of Solids and Structures*, 2016, vol. 94–95, pp. 35–49. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.05.010.
29. Worsnop F., Lim R., Bernier J. et al. The influence of alloying on slip intermittency and implications for dwell fatigue in titanium. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, art. 5949. DOI: 10.1038/s41467-022-33437-z.
30. Radecka A., Coakley J., Jones I. et al. Ordering and micromechanics of Ti-7Al. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 646, pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.070.
31. Xu Y., Worsnop F., Dye D., Dunne F. *Slip intermittency and dwell fatigue in titanium alloys: discrete dislocation plasticity analysis*: Preprint. 2023. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/372286366\\_Slip\\_intermittency\\_and\\_dwell\\_fatigue\\_in\\_titanium\\_alloys\\_a\\_discrete\\_dislocation\\_plasticity\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/372286366_Slip_intermittency_and_dwell_fatigue_in_titanium_alloys_a_discrete_dislocation_plasticity_analysis) (accessed: May 18, 2025). DOI: 10.48550/arXiv.2307.05316.
32. Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrsky S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of VT6ch titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
33. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V. Investigation of the mechanical properties and structure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the  $\beta$ -area. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), pp. 24–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.
34. Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of repair of welded structures of large thicknesses from titanium alloy VT6ch. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), pp. 34–43. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-34-43.
35. Berenson V.F., Shevchenko Yu.N., Kompaniets A.S. Passportization and certification of aviation materials – a guarantee of their quality. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: VIAM, 2002, pp. 907–916.
36. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
37. Kablov E.N. Materials and Technologies of VIAM for Aviadvigatel. *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
38. Kablov E.N. New Generation Materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
39. Kablov E.N., Grinevich A.V., Slavin A.V., Kabanov I.V., Gromov V.I., Ampilogov A.Yu., Yakovlev N.O., Polyakov A.N., Yakusheva N.A. Calculated Strength Characteristics of VKS-9M and 300M Steels. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 3, pp. 51–60.
40. State Standard 27.002–2015. *Reliability in Engineering. Terms and Definitions*. Moscow: Standartinform, 2016, pp. 9–11.

#### Информация об авторах

**Кашапов Олег Салаватович**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Павлова Тамара Васильевна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Зайцев Денис Владимирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Чучман Олег Викторович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Oleg S. Kashapov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Tamara V. Pavlova**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Denis V. Zaitsev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Oleg V. Chuchman**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.06.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.06.2025.