

---

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-25-37

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ШТАМПОВОК ИЗ СПЛАВА VT6, ИЗГОТОВЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ, А ТАКЖЕ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Т.В. Павлова<sup>1</sup>, О.С. Кашапов<sup>1</sup>, О.В. Чучман<sup>1</sup>, Л.Ю. Гончарова<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 лопаток из сплава VT6, изготовленных тремя методами – объемной штамповкой с последующим одноступенчатым отжигом; совмещением высокотемпературной ступени отжига с нагревом под калибровку и последующим старением, а также методом высокотемпературной термомеханической обработки, заключающимся в нагреве под штамповку, проведении штамповки-калибровки с последующими закалкой в воде и старением. Особое внимание уделено характеристикам пластичности и ударной вязкости, а также усталостной долговечности с учетом актуальных вопросов обеспечения показателей надежности работы материала лопаток первых ступеней компрессора авиационных двигателей.

**Ключевые слова:** титановые сплавы VT6 и Ti6-4, микроструктура, механические свойства, метод термомеханической обработки, лопатки и диски компрессора

**Для цитирования:** Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В., Гончарова Л.Ю. Сравнительный анализ механических свойств материала штамповок из сплава VT6, изготовленных различными методами, а также в различных производственных условиях // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-25-37.

Scientific article

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

T.V. Pavlova<sup>1</sup>, O.S. Kashapov<sup>1</sup>, O.V. Chuchman<sup>1</sup>, L.Yu. Goncharova<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 blades forgings from VT6 alloy, manufactured using three methods – a bulk stamping followed by single-stage annealing; a combination of a high-temperature annealing stage with heating for calibration and subsequent aging, as well as the high-temperature thermomechanical treatment method, which consists of heating for stamping, stamping calibration followed by quenching in water and aging. Particular attention in the article is paid to the characteristics of plasticity and impact toughness, as well as fatigue strength, taking into account the current issues of ensuring the reliability of the material of the first stages of compressor blades of aircraft engines.

**Keywords:** titanium alloys VT6 and Ti6-4, microstructure, mechanical properties, thermo-mechanical treatment method, compressor blades and disks

**For citation:** 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), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-25-37.

### **Введение**

Двухфазный титановый сплав марки ВТ6 применяется при изготовлении ответственных деталей компрессора авиационных двигателей [1–6], прежде всего взамен сплава ВТЗ-1 [7]. К преимуществам сплава ВТ6, помимо высокой технологичности в условиях металлургического производства, относятся такие характеристики, как высокая ударная вязкость, вязкость разрушения, пластичность и низкая чувствительность к концентраторам напряжений при различных видах испытаний. При этом сплав ВТЗ-1 в отожженном состоянии обеспечивал более высокий уровень прочностных характеристик по сравнению со сплавом ВТ6. Для того чтобы повысить уровень прочностных характеристик материала штамповок из сплава ВТ6, разработаны и внедрены технологические методы термомеханической обработки и режимы термической обработки штамповок дисков и прутков, заключающиеся в переходе от одноступенчатого отжига к двойному отжигу с охлаждением в воде после высокотемпературной ступени; для изготовления штамповок лопаток разработаны технологические процессы термомеханической и высокотемпературной термомеханической обработок. В настоящее время, с учетом потребностей авиационной промышленности в освоении производства поковок из сплава ВТ6 со значительно возросшими массами и габаритными размерами изделий, на фоне изменений в металлургическом производстве основного предприятия – поставщика металлургической продукции [8], отмечается тенденция к нивелированию вышеуказанных преимуществ сплава ВТ6 вплоть до трудностей с обеспечением норм по ударной вязкости, имеющих в действующей отраслевой нормативной документации. При этом авторами А.В. Волковым, М.О. Ледером, М.В. Антоновой, Е.А. Шушаковой и др. в докладах «Назревшие вопросы регламентации системы управляемого использования титановых сплавов в конструкциях. К вопросу интеграции мирового опыта для пересмотра отечественной нормативной базы» на Международной конференции Ti-2024 в СНГ (г. Суздаль, май 2024 г.) и «Увеличение глубины параметризации материала, как залог обеспечения конкурентоспособности конструкции двигателя: проблемы и потенциал развития» на Международном форуме по двигателестроению МФД-2024 (г. Москва, октябрь 2024 г.) высказано мнение о нецелесообразности контроля характеристик ударной вязкости (на образцах типа КСУ) и работы разрушения образцов с усталостной трещиной (КСТ) для наиболее ответственных деталей двигателя из титановых сплавов. Ставятся также под сомнение те или иные технические требования действующей нормативной документации. Такое положение не может не беспокоить специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ как организацию-разработчика материала. В этой связи в ряде статей необходимо ознакомить широкий круг специалистов с результатами отдельных работ по сплаву ВТ6, отражающих фактический уровень механических свойств штамповок из сплава ВТ6 в зависимости от метода изготовления, содержания железа в сплаве и термической обработки. Ранее эти результаты не публиковались. Необходимо аргументированно показать возможные причины снижения значений отдельных характеристик механических свойств по результатам исследований серийного материала промышленной поковки из сплава ВТ6, изготовленной в настоящее время. Отметим, что основной объем работ по первичному освоению сплава ВТ6 для деталей двигателя пришелся на период с 1983 по 1992 г. Тогда обозначенные ранее преимущества сплава ВТ6 представлялись одинаково ценными для

разработчиков новых изделий авиационной техники, специалистов отраслевых институтов и производителей металлургической продукции. Проблема достижения максимальных показателей прочностных характеристик (особенно для крупных полуфабрикатов) стала очевидной после получения первых результатов исследований опытно-промышленных особокрупногабаритных штамповок лопаток из сплава ВТ6 в отожженном состоянии в сравнении с серийными штамповками из сплава ВТ3-1 (обобщенные данные по результатам приемо-сдаточных испытаний, всесторонних и специальных исследований). Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В табл. 1 приведено сравнение механических свойств штамповок лопаток в отожженном состоянии.

Таблица 1

**Механические свойства материала особокрупногабаритных штамповок  
из сплавов ВТ3-1 и ВТ6 в отожженном состоянии**

Сплав (термическая обработка)	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_{0,1}^H$ , МПа, при $N = 10^4$ цикл ( $\alpha_\sigma = 3,35$ )	$\sigma_{0,1}^{гл}$ , МПа, при $N = 10^4$ цикл
ВТ3-1 (изотермический отжиг)	1060–1165	12–20	26–52	34–69	355	1000
ВТ6 (одноступенчатый отжиг)	930–960	10–16	35–50	44–74	400	900

Видно, что штамповки из сплава ВТ6 в отожженном состоянии существенно уступают по прочностным характеристикам штамповкам из сплава ВТ3-1, но превосходят по ударной вязкости. Материал сплава ВТ6 обладает меньшей чувствительностью к концентраторам напряжений при усталостных испытаниях. Из-за существенно более низких показателей усталостной долговечности гладких образцов, особокрупногабаритные лопатки из сплава ВТ6 не нашли широкого применения, однако в виду очевидных преимуществ по характеристикам надежности, технологичности и себестоимости изготовления штамповок лопаток из сплава ВТ6 потребовалось решать задачу повышения уровня прочностных характеристик материала за счет изменения технологии термомеханической и термической обработок. Типовыми методами изготовления штамповок лопаток из двухфазных титановых сплавов, обеспечивающими повышение прочностных характеристик, являются методы ТМО (термомеханическая обработка с совмещением операции калибровки с высокотемпературной ступенью отжига и последующим старением) и ВТМО (высокотемпературная термомеханическая обработка, заключающаяся в проведении операций окончательной штамповки и калибровки за один нагрев с последующими закалкой в воде и старением). Для средне- и крупногабаритных штамповок лопаток первоначально ставилась задача по достижению гарантированного уровня прочности:  $\sigma_b \geq 1080$  МПа при уровне  $KCU \geq 40$  Дж/см<sup>2</sup> и  $KCT \geq 20$  Дж/см<sup>2</sup>, но по результатам выполненных работ уровень характеристик для включения в нормативную документацию пришлось скорректировать.

Об актуальности вопросов, связанных с повышением характеристик механических свойств сплавов типа ВТ6 и Тi6-4 и с технологией изготовления полуфабрикатов, заготовок и деталей, свидетельствуют многочисленные публикации как в отечественных, так и в зарубежных изданиях [9–15].

### Материалы и методы

В качестве исходной заготовки при проведении исследований по влиянию метода изготовления штамповок лопаток из сплава ВТ6 на механические свойства использовали горячекатаные прутки диаметром 50–60 мм промышленного производства. В расчетном составе сплава содержание железа составляло 0,3 % (по массе). Макроструктура прутков в поперечном сечении – однородная, матовая, соответствует 2–3 баллу по 10-балльной шкале ГОСТ 26492–85. Микроструктура прутков после одноступенчатого отжига: 4–5 типов по 9-типной шкале ГОСТ 26492–85. Химический состав материала соответствует техническим условиям и отраслевому стандарту. Уровень легирования плавок сплава ВТ6, использованных в данной работе, выраженный в алюминиевом и молибденовом структурных эквивалентах, приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Уровень легирования плавок штамповок лопаток и дисков сплава ВТ6, исследованных в данной работе**

Полуфабрикат	Уровень легирования	
	[Al] <sup>eq</sup> , %	[Mo] <sup>eq</sup> , %
Штамповки дисков	7,2–7,3	3,91–4,37
Штамповки лопаток	7,0–7,7	3,36–4,34

Механические свойства прутков после одноступенчатого отжига по результатам контрольных испытаний нескольких партий приведены в табл. 3 (общее количество испытаний 50).

Определение механических свойств проводили по стандартным методикам ГОСТ 94545–78, ГОСТ 9651–84, ГОСТ 10145–84, ГОСТ 1497–84, ГОСТ 25.502–79, принятым для испытания металлов. Испытания на малоцикловую усталость проводили по схеме «растяжение», на многоцикловую усталость – по схеме «чистый изгиб при вращении». Значения долговечности для малоцикловой усталости определены на базе  $10^4$  циклов, для многоцикловой – на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов.

Таблица 3

**Механические свойства прутков в отожженном состоянии в формате «минимальное–максимальное» значения**

Свойства	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
Диапазон значений	910–950	13–16	35–40	52–68
Технические требования, действовавшие до 1986 г.	900	$\geq 10$	$\geq 30$	$\geq 40$

Штамповки лопаток двух шифров изготавливали на молоте в условиях серийного металлургического производства с применением типовой для титановых сплавов схемы изготовления, включающей высадку (набор «головы» под замковую часть), предварительную и окончательную штамповку с последующей калибровкой и закалкой в воде за один нагрев при температурах двухфазной области (ВТМО). Готовые штамповки по площади проекции относятся к средне- и крупногабаритным. При проведении исследований образцы вырезали из пера лопатки в продольном и поперечном направлениях, а также из замков – в поперечном направлении.

### Результаты

На рис. 1 приведены зависимости изменения средних значений характеристик механических свойств штамповок лопаток после ВТМО в зависимости от температуры

старения в интервале от 450 до 700 °С, продолжительность старения не изменяли. Средние значения получены по результатам испытаний 5–8 образцов, вырезанных из замка и пера среднегабаритных штамповок лопаток.

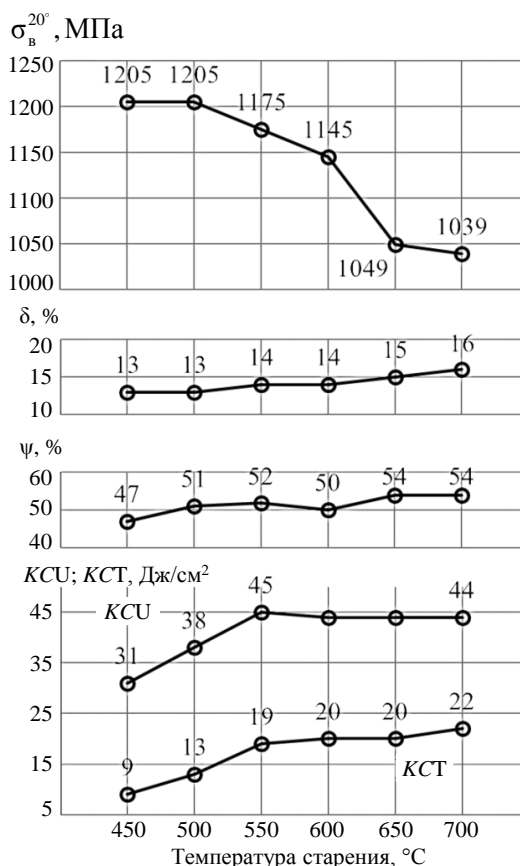


Рис. 1. Влияние температуры старения на свойства материала штамповок лопаток из сплава VT6 после VTMO

Исходя из полученных результатов, для дальнейших исследований для метода VTMO выбрана температура старения 600 °С. Механические свойства крупногабаритной штамповки лопатки после VTMO и выбранной температуры старения с учетом места вырезки образцов приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Механические свойства крупногабаритной штамповки лопатки из сплава VT6 (VTMO) в формате «минимальное–максимальное» значения**

Место вырезки образцов (направление)	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$	$\psi$	KCU	KCT
				Дж/см <sup>2</sup>	
Перо (продольное и поперечное)	1030–1130	12–15	40–50	44–54	21,5–34,3
Замок (поперечное)	960–1020	12–15	39–50	44–53	21,5–24,5

На одном из выбранных шифров среднегабаритных штамповок с массой ~10 кг и длиной ~500 мм провели сравнительное исследование свойств материала штамповок лопаток, изготовленных методами объемной штамповки, TMO и VTMO из исходного материала одной плавки. В табл. 5 приведены минимальные значения механических свойств материала в зависимости от метода изготовления и места вырезки образцов (перо или замок).

**Механические свойства материала штамповки лопатки  
в зависимости от метода изготовления  
(минимальное значение по результатам трех-пяти испытаний)**

Метод изготовления	Место вырезки образцов (направление)	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	KCU	KCT
		МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>	
Объемная штамповка	Перо (продольное)	960	1020	16,0	51,7	44	28,5
	Перо (поперечное)	915	980	15,0	45,0	63	30,4
	Замок (поперечное)	885	960	14,6	41,0	41	29,4
ТМО	Перо (продольное)	970	1020	14,0	50,0	43	24,5
	Перо (поперечное)	920	1000	14,0	38,0	52	29,4
	Замок (поперечное)	905	980	16,6	50,0	51	30,4
ВТМО	Перо (продольное)	1040	1100	13,8	49,0	45	23,5
	Перо (поперечное)	1000	1050	12,3	43,0	60	–
	Замок (поперечное)	980	1040	13,6	46,0	48	24,5

Для определения механических свойств материала штамповок из сплава ВТ6, изготовленных методом ВТМО при повышенных температурах, изготовлена дополнительная партия. Одновременно для объективного сравнения характеристик сплавов ВТ3-1 и ВТ6 в этих же производственных условиях с применением той же оснастки из серийных катаных прутков сплава ВТ3-1 методом ТМО изготовлена партия штамповок по серийным режимам. Результаты испытаний механических свойств материала пера штамповок лопаток одного шифра из сплавов ВТ3-1 (ТМО) и ВТ6 (ВТМО) приведены в табл. 6 (данные в формате «минимальное–максимальное» значения).

Таблица 6

**Сравнение механических свойств среднегабаритных штамповок пера лопаток  
из сплавов ВТ3-1 (ТМО) и ВТ6 (ВТМО), изготовленных в одних и тех же штампах**

Сплав (метод)	Направление вырезки образцов	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$	$\psi$	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B^H / \sigma_B^{ГЛ}$
			%			
ВТ3-1 (ТМО)	Продольное	1125–1150	12–16	35–48	29–45	1,3*
ВТ6 (ВТМО)	Поперечное	1030–1120	11–16	45–50	43–56	1,5

\* Значение получено на штамповках лопаток других шифров, изготовленных по аналогичной технологии.

В табл. 7 приведены прочностные и усталостные характеристики материала штамповок ВТМО из сплава ВТ6 при комнатной и повышенной температурах, на рис. 2 – результаты испытаний на ползучесть при температуре 300 °С за 100 ч.

Таблица 7

**Усталостные характеристики и длительная прочность среднегабаритных штамповок  
из сплава ВТ6 (ВТМО)**

Сплав (метод)	Место вырезки образцов (направление)	$\sigma_{-1}^{ГЛ}$	$\sigma_{-1}^H$	$\sigma_{0,1}^{ГЛ}$	$\sigma_{0,1}^H$	$\sigma_B^{350}$	$\sigma_{100}^{300}$
		МПа					
ВТ3-1 (ТМО)	Перо (продольное)	530	–	–	340	960	825
ВТ6 (ВТМО)	Перо (поперечное)	510	235	1000	470	805	725

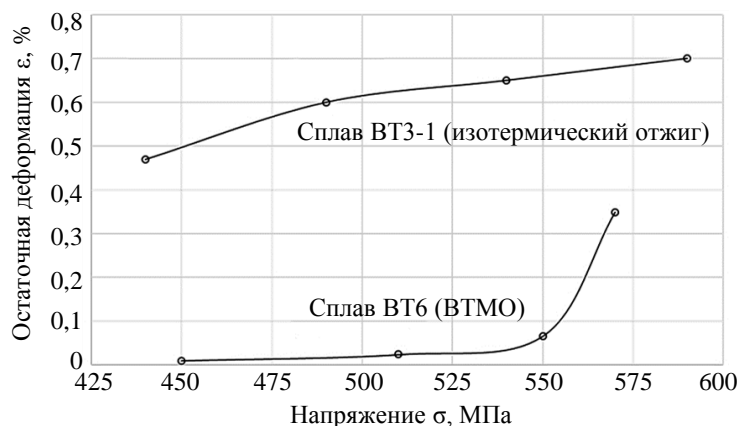


Рис. 2. Ползучесть сплава ВТ6 в состоянии ВТМО в сравнении с ползучестью сплава ВТЗ-1 при температуре 300 °С в течение 100 ч

### Обсуждение и заключения

Вначале сопоставим характеристики механических свойств исходных прутков и штамповок лопаток (табл. 3 и 5) в отожженном состоянии, полученных методом объемной штамповки. С учетом того, что при контроле прутков образцы вырезают в продольном направлении, для сравнения правильно использовать значения характеристик, полученные для образцов, вырезанных из пера лопатки в том же направлении. Объемная штамповка с последующим одноступенчатым отжигом приводит к существенному увеличению прочностных характеристик пера лопатки – не менее чем на 70 МПа при одновременном повышении характеристик пластичности. При этом величина ударной вязкости снижается на 11 Дж/см<sup>2</sup>. Такие изменения объясняются значительной «проработкой» микроструктуры пера лопатки при горячей деформации (накопленная суммарная деформация по перу составляет не менее 90 %). Помимо этого, особенностью термической обработки сплава ВТ6 по режиму одноступенчатого отжига является относительно низкая температура его проведения (рис. 3).

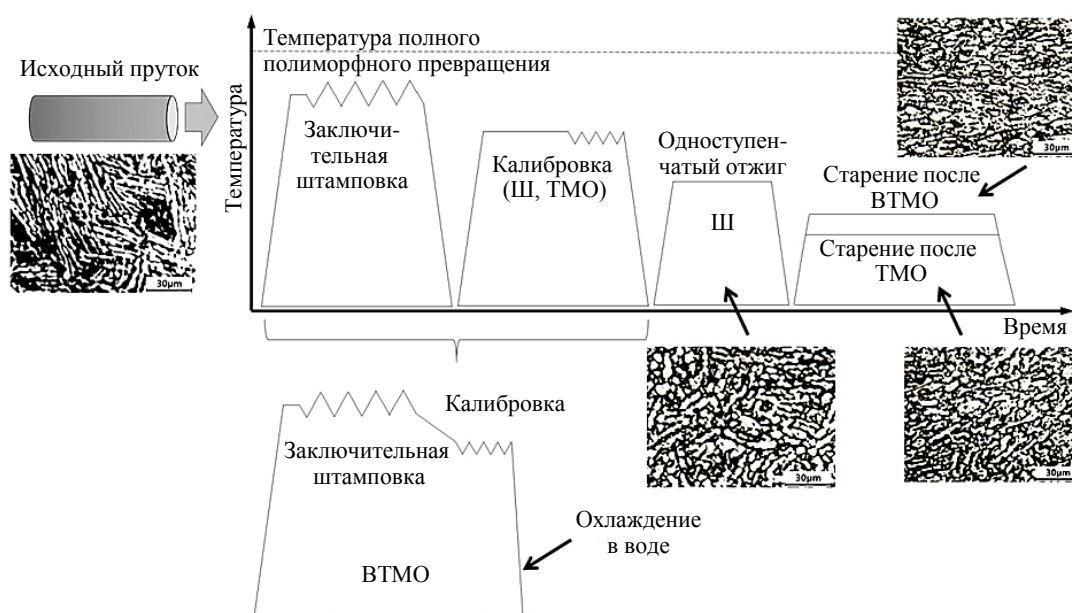


Рис. 3. Температурные области изготовления штамповок лопаток методами объемной штамповки (Ш), ТМО и ВТМО

При такой температуре прохождение процессов рекристаллизации и роста частиц  $\alpha$ -фазы ограничено [16]. Поэтому наблюдаемые изменения являются следствием дисперсионного упрочнения. В то же время реализация подобных условий термомеханической и термической обработок приводит к анизотропии механических свойств по перу лопатки в зависимости от направления вырезки образцов. В замковой части из-за меньшей накопленной деформации и проявления анизотропии фиксируются наименьшие характеристики механических свойств, за исключением работы разрушения образцов с усталостной трещиной. Большая анизотропия по перу лопатки имеет место только для метода ВТМО.

Сравнивая результаты исследования материала штамповок средне- и крупногабаритных лопаток, изготовленных методом ВТМО (табл. 4 и 5), следует отметить, что по всем исследованным характеристикам (за исключением минимальных значений относительного сужения) они близки с учетом места вырезки образцов.

Данные, приведенные в табл. 5, позволяют оценить анизотропию свойств материала пера штамповок лопаток в зависимости от направления вырезки – продольного или поперечного. Для всех методов изготовления наибольший уровень условного предела текучести, кратковременной прочности, относительных удлинения и сужения приходится на продольное направление. Ударная вязкость  $KCU$  выше у образцов, вырезанных в поперечном направлении из пера или замка лопатки. Работа разрушения образцов с усталостной трещиной  $KCT$  несколько ниже у продольных образцов из пера лопатки. Материал замка лопатки для всех методов изготовления имеет наименьшие показатели прочностных характеристик. Обобщая результаты по всем методам изготовления, получаем, что снижение прочностных характеристик по перу лопатки в зависимости от направления вырезки более существенное и составляет 20–49 МПа, в то время как при вырезке образцов в поперечном направлении из пера и замка лопатки величина снижения прочности составляет 10–35 МПа. Суммарное снижение уровня прочности от наибольших значений по перу лопатки в продольном направлении к замку лопатки в поперечном направлении – существенное, разница составляет от 39–78 МПа. Характер проявления анизотропии механических свойств одинаков для средне- и крупногабаритных штамповок лопаток, изготовленных методом ВТМО (табл. 4 и 5).

Представление о влиянии метода изготовления (состояния материала) на характеристики механических свойств можно получить, обобщив результаты, приведенные в табл. 5, подсчитав среднее из минимальных значений для трех различных мест отбора образцов для каждого из методов изготовления. Диаграммы изменения механических свойств приведены на рис. 4.

Видно, что уровень характеристик ударной вязкости и относительного сужения для штамповок из сплава ВТ6 практически не зависит от метода изготовления. Работа разрушения образцов с усталостной трещиной и относительное удлинение несколько снижаются при переходе от объемной штамповки к методам ТМО и ВТМО. Прочностные характеристики несколько возрастают при переходе от объемной штамповки к методу ТМО, значимый рост прочности материала обеспечивает только метод ВТМО. Несмотря на выраженную анизотропию механических свойств, метод ВТМО сохраняет преимущества сплава ВТ6 перед сплавом ВТ3-1 по характеристикам ударной вязкости и пластичности, чувствительности к концентраторам напряжений при статических и усталостных испытаниях (табл. 6 и 7). Из-за существенно более низких прочностных характеристик штамповок лопаток из сплава ВТ6 по сравнению с штамповками лопаток из сплава ВТ3-1 (табл. 7), изготовленными методом ТМО, рост действующих напряжений, характерных для новых изделий авиационной техники, будет являться существенным препятствием, ограничивающим применение сплава ВТ6 для изготовления

первых ступеней вентилятора и компрессора. Это касается и основной характеристики материала применительно к лопаткам компрессора. Для средне- и крупногабаритных штамповок лопаток из сплава ВТ6 достигнутый уровень долговечности  $\sigma_{-1}$  при ВТМО на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов можно считать близким к предельному. Для последующих ступеней компрессора при использовании метода ВТМО дополнительными ограничениями будут более низкие характеристики жаропрочности при рабочих температурах  $\sim 300$  °С (табл. 7). Уже при температуре 300 °С при достижении напряжений  $\sim 550$  МПа и более, в состоянии ВТМО резко возрастает деформация ползучести (рис. 2).

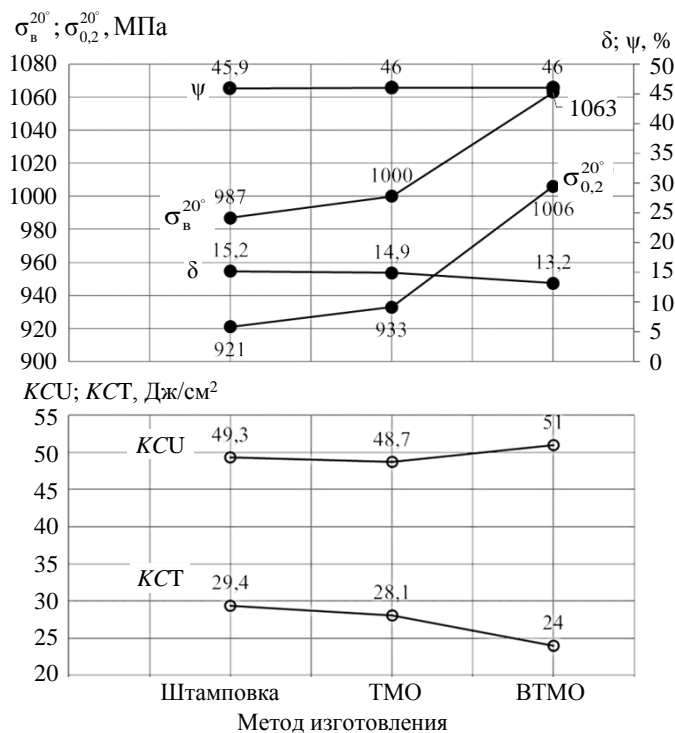


Рис. 4. Уровень характеристик механических свойств материала штамповок лопаток из сплава ВТ6 по перу и замку в зависимости от метода изготовления

Для сплава ВТ6, как и для его зарубежных аналогов – сплавов Тi6-4 и ТА6V [17, 18], для повышения уровня прочностных характеристик после объемной штамповки может применяться термическая обработка, заключающаяся в обработке на твердый раствор с охлаждением в воде с температур верхней части двухфазной области с последующим отжигом или старением (рис. 3). В работе [19] показано, что при такой термической обработке (закалка в воде с температуры полного полиморфного превращения  $T_{\text{п.п}} - 28$  °С + старение при 730 °С) долговечность материала существенно зависит от фактических условий охлаждения, а именно от времени задержки при переносе заготовок из печи в закалочную емкость. Результаты этого исследования можно сопоставить с исследованием на штамповках лопаток, так как в качестве исходного материала применялся горячекатаный прут  $\varnothing 85$  мм, а штампованная заготовка представляла собой пластину размером  $202 \times 189 \times 31$  мм, т. е. сопоставима со среднегабаритными штамповками лопаток. Обобщенные результаты приведены на рис. 5.

При максимальной задержке по времени переноса в закалочный бак в течение 70 с, кратковременная прочность и выносливость материала штамповок снижаются на 7–8 %. Различие в величине упрочнения твердых растворов в результате такой задержки, определяемое по твердости, составляет 14 %.

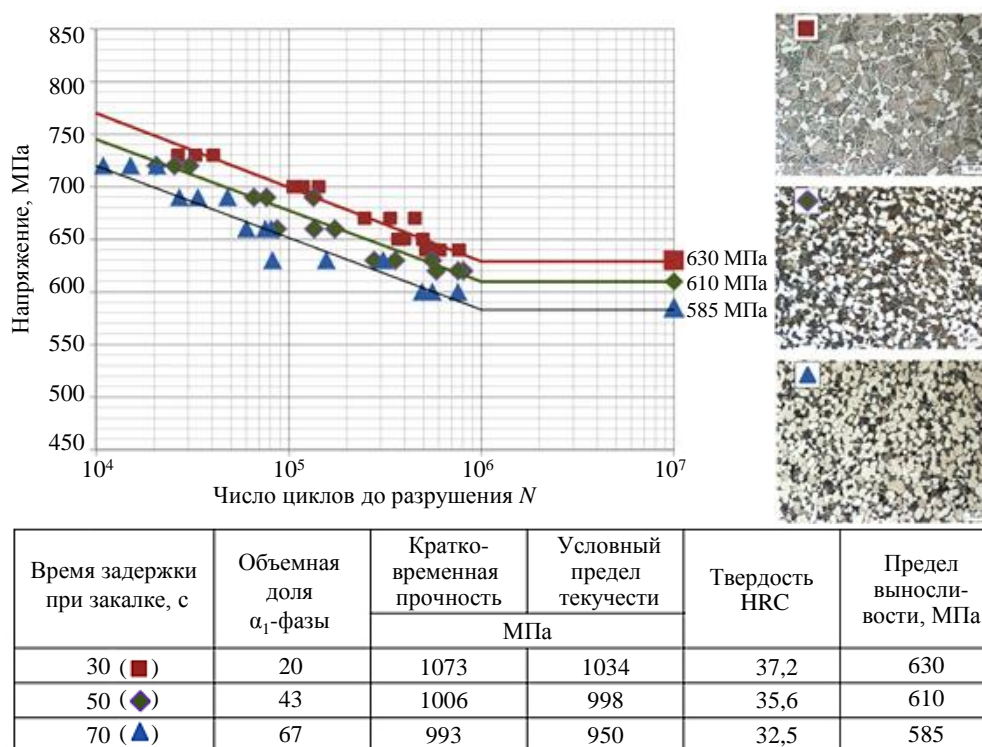


Рис. 5. Прочность и долговечность материала штампованных заготовок из сплава Ti-6Al-4V после обработки на твердый раствор и старения в зависимости от времени задержки при закалке в воде

При приблизительно одинаковом уровне кратковременной прочности штамповок лопаток ВТМО из сплава ВТ6 и штамповок из сплава Ti-6Al-4V после обработки на твердый раствор и старения, имеет место различие в характеристиках долговечности материалов. Это может быть обусловлено не только различием сплавов и состоянием материала, но и разницей в методиках испытаний (в случае сплава Ti-6Al-4V испытания проводили по схеме «изгиб при вращении», но на образцах с другими геометрическими размерами) и условиях изготовления материала (в данном случае для сплава ВТ6 – это промышленные условия, в случае сплава Ti-6Al-4V термическая обработка проведена в лабораторных условиях). Для сплава ВТ6 применение аналогичной термической обработки на промышленных штамповках для изделий авиационной техники, сопоставимых с особокрупногабаритными штамповками лопаток, средний уровень прочности составляет  $\sigma_b = 1045$  МПа и долговечности  $\sigma_{-1} = 550$  МПа на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов [20]. С учетом больших габаритов и сечений, а также увеличенной базы испытаний можно видеть, что эти характеристики сплавов вполне сопоставимы. Однако охлаждение в воде с температур, близких к температуре полного полиморфного превращения, для штамповок лопаток приводит к существенному их короблению, поэтому для авиационных штамповок лопаток из сплава ВТ6 этот режим не применяют. Штамповки лопаток, изготовленные по предложенной технологии ВТМО, обладают заданной чертежом точностью, не требуют правки после охлаждения в воде.

Отметим, что при необходимости дальнейшего повышения характеристик долговечности материала штамповок лопаток при сохранении высоких значений ударной вязкости и пластичности, следует рассматривать более совершенный титановый сплав ВТ8М-1, который в состоянии ТМО показал преимущества по основным служебным характеристикам перед другими отечественными и зарубежными сплавами вплоть до температуры 540 °C [21].

## Список источников

1. Дуонова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
2. 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- $\alpha$ -класса // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
3. Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности ремонта сварных конструкций больших толщин из титанового сплава ВТ6ч. // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-34-43.
4. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели*. 2014. № 31. С. 43–47.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7–17.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. № 4. С. 28–29.
7. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях. М.: *Металлургия*, 1974. 448 с.
8. Ежов А.О. Периодизация становления и развития титановой промышленности России: историография проблемы // *Вестник ТГУ*. 2015. № 11 (151). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/periodizatsiya-stanovleniya-i-razvitiya-titanovoy-promyshlennosti-rossii-istoriografiya-problemy> (дата обращения: 06.12.2024).
9. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С., Хайрутдинова Р.Р. Сверхпластическая деформация титанового сплава ВТ6с в составе композиционного материала ВТ6с-1201 при высоких гидростатических давлениях // *Технология легких сплавов*. 2023. № 1. С. 70–79.
10. Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Кутепов С.Н., Филонович А.В., Губанов О.М., Калинин А.А. Биметаллические пустотелые титано-алюминиевые панели, изготовленные диффузионной сваркой в вакууме // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. № 9. С. 640–645.
11. Добрынин Д.А. Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 // *Труды ВИАМ*. 2017. № 7 (55). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2.
12. Лекарев А.В., Юрчук Л.И., Меркулова Г.А. Исследование влияния альфирования на структуру и свойства сплава ВТ6 // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2023. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-alfirovaniya-na-strukturu-i-svoystva-splava-vt6> (дата обращения: 07.12.2024).
13. Золотов А.М., Чижик Т.А., Смирнов М.О. Построение диаграмм рекристаллизации третьего рода титанового сплава ВТ6 // *Глобальная энергия*. 2017. № 4. С. 118–126.
14. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Челпанов А.В., Каратаева Е.С. Прогнозирование механических свойств прутков из титанового сплава ВТ6 с разным типом структуры // *Технология легких сплавов*. 2022. № 3. С. 30–40.
15. Панин П.В., Дзунович Д.А. Влияние скорости охлаждения на фазовый состав и структуру титанового сплава ВТ6 после наводороживающего отжига // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-4-4.
16. 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. P. 1–18. DOI: 10.1177/09544089221125575.
17. Zhang J., Li H., Zhan M. Review on globularization of titanium alloy with lamellar colony // *Manufacturing Review*. 2020. Vol. 7 (18). URL: <https://mfr.edp-open.org> (дата обращения: 17.03.2024). DOI: 10.1051/mfreview/2020015.

18. 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. DOI: 10.3390/ma17051060.
19. 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.
20. Jadhav S., Powar A., Patil S. et al. Effect of volume fraction of alpha and transformed beta on the high cycle fatigue properties of bimodal Ti6Al4V alloy // 7th International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM 2017). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 201. P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/201/1/012035.
21. Оглодков М.С., Кашапов О.С., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Сравнительный анализ характеристик отечественных сплавов марок ВТ8, ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ9 и сплава Ti6242S (США) применительно к лопаткам компрессора высокого давления авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.

### References

1. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
2. 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- $\alpha$ -titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
3. 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), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-34-43.
4. Kablov E.N. Materials and technologies of VIAM for «Aviadvigatel». *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
5. 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.
6. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
7. Solonina O.P., Glazunov S.G. *Modern heat-resistant titanium alloys and prospects for their application in engines*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 448 p.
8. Ezhov A.O. Periodization of the formation and development of the titanium industry in Russia: historiography of the problem. *Vestnik TGU*, 2015, no. 11 (151). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/periodizatsiya-stanovleniya-i-razvitiya-titanovoy-promyshlennosti-rossii-istoriografiya-problemy> (accessed: December 06, 2024).
9. Fedorov A.A., Bepalov A.V., Komarov R.S., Khairutdinova R.R. Superplastic deformation of titanium alloy VT6s as part of composite material VT6s-1201 under high hydrostatic pressures. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2023, no. 1, pp. 70–79.
10. Gadalov V.N., Petrenko V.R., Kutepov S.N., Filonovich A.V., Gubanov O.M., Kalinin A.A. Bimetallic hollow titanium-aluminum panels manufactured by diffusion welding in vacuum. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2023, no. 9, pp. 640–645.
11. Dobrynin D.A. Electrolytic-plasma polishing of titanium alloys VT6 and VT8M-1. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2.
12. Lekarev A.V., Yurchuk L.I., Merkulova G.A. Study of the influence of alpha-forming on the structure and properties of VT6 alloy. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*, 2023, no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-alfirovaniya-na-strukturu-i-svoystva-splava-vt6> (accessed: December 07, 2024).

13. Zolotov A.M., Chizhik T.A., Smirnov M.O. Construction of third-order recrystallization diagrams of VT6 titanium alloy. *Globalnaya energiya*, 2017, no. 4, pp. 118–126.
14. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Chibisova E.V., Chelpanov A.V., Karataeva E.S. Prediction of mechanical properties of rods made of titanium alloy VT6 with different types of structure. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2022, no. 3, pp. 30–40.
15. Panin P.V., Dzunovich D.A. Effect of cooling rate on phase composition and structure of VT6 titanium alloy after hydrogenating annealing. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-4-4.
16. 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, pp. 1–18. DOI: 10.1177/09544089221125575.
17. Zhang J., Li H., Zhan M. Review on globularization of titanium alloy with lamellar colony. *Manufacturing Review*, 2020, vol. 7 (18). Available at: <https://mfr.edp-open.org> (accessed: March 17, 2024). DOI: 10.1051/mfreview/2020015.
18. 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. DOI: 10.3390/ma17051060.
19. 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.
20. Jadhav S., Powar A., Patil S. et al. Effect of volume fraction of alpha and transformed beta on the high cycle fatigue properties of bimodal Ti6Al4V alloy. *7th International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM 2017). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 201, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/201/1/012035.
21. Oglodkov M.S., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S., Kondratieva A.R. Comparative analysis of the characteristics of domestic alloys VT8, VT8M, VT8M-1, VT9 and Ti6242S alloy (USA) as applied to high-pressure compressor blades of aircraft gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.

#### Информация об авторах

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

**Кашапов Олег Салаватович**, начальник сектора, к.т.н. 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)

**Гончарова Любовь Юрьевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

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

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

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

**Lyubov Yu. Goncharova**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.01.2025.  
The article was submitted 24.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.01.2025.