
Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-67-75

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23M

А.А. Ширяев¹, В.А. Крохина¹, С.В. Путырский¹, А.Ю. Анисимова¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований структуры и физико-механических свойств штамповок из титанового ($\alpha + \beta$)-сплава VT23M после термической обработки. Обоснован выбор типа термической обработки (двойной отжиг) и исследовано влияние технологических параметров на особенности микроструктуры, уровень прочностных и пластических характеристик, а также ударной вязкости. По результатам анализа выбраны температуры первой и второй ступеней двойного отжига штамповок из сплава VT23M, обеспечивающие сбалансированный комплекс механических свойств и благоприятную микроструктуру.

Ключевые слова: титановые сплавы, сплав VT23M, штамповки, термическая обработка, микроструктура, механические свойства

Для цитирования: Ширяев А.А., Крохина В.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Влияние параметров режима термической обработки на механические свойства и структуру полуфабрикатов из высокопрочного титанового сплава VT23M // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-67-75.

Scientific article

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF SEMI-FINISHED PRODUCTS MADE OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY VT23M

A.A. Shiryayev¹, V.A. Krohina¹, S.V. Putyrskiy¹, A.Yu. Anisimova¹

¹Federal 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 results of the structure study, as well as physical and mechanical properties of forgings made of titanium ($\alpha + \beta$) alloy VT23M after heat treatment. The choice of the heat treatment type (double annealing) is has been reasoned. The influence of process parameters on the microstructure features and the level of strength and ductile characteristics, impact toughness, are studied. Based on the analysis, the temperatures of the first and the second stages of double annealing of forgings made of VT23M alloy are selected, providing the balanced set of mechanical properties and the favorable microstructure.

Keywords: titanium alloys, alloy VT23M, forgings, heat treatment, microstructure, mechanical properties

For citation: Shiryayev A.A., Krohina V.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. The influence of heat treatment parameters on mechanical properties and structure of semi-finished products made of high-strength titanium alloy VT23M. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no.06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-67-75.

Введение

В настоящее время активно ведутся работы, направленные не только на достижение максимально высокого уровня физико-механических и эксплуатационных свойств изделий из отечественных титановых сплавов, но и на импортозамещение агрегатов, элементов конструкций авиационной техники, изготовленных из материалов иностранного производства [1].

При этом особенно важным остается вопрос как сохранения на текущем уровне, так и повышения весовой эффективности элементов конструкций и изделий авиационно-космического транспорта за счет использования материалов с улучшенными свойствами [2].

В частности, остро стоит вопрос о возможности замены применяемых в настоящее время двигателей, производимых по иностранной лицензии и устанавливаемых на отечественные самолеты гражданского назначения, на аналогичные отечественные двигатели. Ожидается, что применение усовершенствованных агрегатов, в том числе газогенератора, модернизированных и перспективных отечественных двигателей, обеспечит снижение расхода топлива, а также стоимости двигателя и его технического обслуживания.

Для уменьшения габаритов и массы конструкций серийных авиационных двигателей зачастую требуется переработка узлов подвески (пилонов). Это возможно реализовать за счет повышения характеристик прочности материала силовых деталей, входящих в конструкцию пилона (например, балки), путем изменения технологических режимов изготовления полуфабрикатов из применяемого в настоящее время сплава ВТ6ч [3–5] либо путем замены на сплав с более высоким уровнем прочности.

Одними из наиболее перспективных материалов являются высокопрочные титановые ($\alpha + \beta$)-сплавы мартенситного класса: ВТ23/ВТ23М, ВТ16 и зарубежные Ti-17, SP700, Ti6246, Beta III [6].

Среди отечественных сплавов данного класса можно выделить сплав марки ВТ23М, обладающий суженным диапазоном легирования, высокой технологичностью, совокупностью необходимых механических и эксплуатационных свойств (прочность, ударная вязкость и вязкость разрушения) [7].

Результаты исследований различных авторов [8–11] показали, что посредством изменения технологии изготовления и термической обработки полуфабрикатов из сплава ВТ23М и его аналогов возможно обеспечение различных комбинаций механических свойств и структурно-фазового состояния (высокопластичное отожженное; сверхвысокопрочное [12]; промежуточное, более сбалансированное, с умеренно высоким уровнем прочности, сопротивления усталостному разрушению и характеристик надежности). Зачастую структурно-фазовый состав, обеспечивающий сбалансированный комплекс свойств ($\alpha + \beta$)-сплавов мартенситного класса, реализуется посредством проведения термической обработки деформированных полуфабрикатов по режимам двойного отжига. Это особенно актуально для крупногабаритных полуфабрикатов и их сварных соединений [13]. При этом скорость охлаждения с температуры первой ступени двойного отжига может оказывать существенное влияние на структуру и механические свойства сплава [14, 15].

В данной статье представлены результаты исследований влияния технологических параметров двойного отжига на механические свойства и микроструктуру штамповок из титанового сплава ВТ23М, направленных на обеспечение сбалансированного комплекса характеристик (прочностных, пластических и ударной вязкости), для замены используемого в настоящее время сплава ВТ6ч применительно к силовым деталям конструкции пилона подвески двигателя.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»). Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [16].

Материалы и методы

Для проведения исследований в условиях опытного производства НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ» методом двойного вакуумно-дугового переплава выплавлены слитки. Химический состав слитков соответствует требованиям ОСТ 1 90013–81 для сплава ВТ23М.

Полуфабрикаты изготовлены по разработанной технологической документации в соответствии с технологической схемой, включающей горячую деформацию путем всесторонней ковки слитка в β -области и всестороннюю ковку заготовки со сменой осей в $(\alpha + \beta)$ -области с последующей осадкой до окончательной толщины (~50 мм). Термическая обработка заготовок под образцы проведена по экспериментальным режимам в камерной печи сопротивления в соответствии с требованиями ПИ 1.2.587–2002.

Механические свойства определены в соответствии с ГОСТ 1497–2023 на универсальных испытательных машинах. Ударную вязкость определяли на образцах с U-образным надрезом по ГОСТ 9454–78.

Анализ микроструктуры методом оптической металлографии проводили в соответствии с ПИ 1.2.785–2009 визуально на травленых микрошлифах с помощью металлографического микроскопа при увеличениях до $\times 1500$. Травление осуществляли в водном растворе плавиковой кислоты (10 % (объемн.)).

Результаты

С целью исследования влияния технологических параметров двойного отжига на микроструктуру и механические свойства штамповок из сплава ВТ23М, изготовленных в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, опробованы экспериментальные режимы, представленные в табл. 1. После нагрева и выдержки на каждой ступени отжига осуществляли охлаждение штамповок на воздухе.

Таблица 1

Экспериментальные технологические режимы и параметры термической обработки (двойного отжига) штамповок из титанового сплава ВТ23М

Условный номер режима	Температура нагрева, °С, на ступени отжига	
	первой	второй
1	$T_{п.п} - 100$	$T_{п.п} - 340$
2	$T_{п.п} - 70$	$T_{п.п} - 340$
3	$T_{п.п} - 70$	$T_{п.п} - 290$
4	$T_{п.п} - 60$	$T_{п.п} - 390$
5	$T_{п.п} - 60$	$T_{п.п} - 340$
6	$T_{п.п} - 60$	$T_{п.п} - 290$
7	$T_{п.п} - 20$	$T_{п.п} - 390$
8	$T_{п.п} - 20$	$T_{п.п} - 340$

Примечание. $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения.

Выбор нижней границы температуры нагрева первой ступени отжига $T_{п.п} - 100$ °С, где $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения, обусловлен тем, что проведение отжига при температурах менее $T_{п.п} - 190 \dots 140$ °С практически не оказывает

влияния на количественное соотношение α - и β -фаз, а β -фаза имеет высокую термодинамическую стабильность [13]. Это не позволит при дальнейшем охлаждении на второй стадии отжига существенно изменить структурно-фазовый состав и комплекс механических свойств сплава в требуемых пределах.

Охлаждение после первой ступени отжига осуществляли для всех режимов на воздухе, что, как показано для сплава SP700, обеспечивает получение более крупной морфологии первичной α -фазы (как глобулярной, так и пластинчатой) без мартенсита, склонного к быстрому интенсивно упрочняющему распаду на второй ступени отжига [15]. Матричная β -фаза распадается менее интенсивно, не вызывает такого сильного фазового наклепа, поэтому и вторая ступень отжига может проводиться при более низких температурах и длительных выдержках. Аналогичные результаты получены для сплава BT23: закалка в воду с температуры 800 °С приводит к образованию до ~20 % мартенситной α'' -фазы, а закалка с 860 °С – до 80–90 %. После дальнейшего старения это существенно повышает уровень прочностных свойств (σ_b изменяется с 1050 до 1580 МПа), но при этом кардинально уменьшаются относительное удлинение и ударная вязкость до неудовлетворительных значений ($\delta_5 = 1,5$ %, $KCV = 35$ кДж/м²) [17]. Это ограничивает рациональный выбор верхней границы температуры нагрева первой ступени отжига T_1 величиной 840–860 °С [18]. Таким образом, одна из наиболее важных задач, которую необходимо решить в данной работе при выборе технологических параметров термической обработки, – предотвращение образования промежуточной мартенситной α'' -фазы и при этом формирования слишком грубодисперсных первичных фазовых составляющих в структуре сплава BT23M.

Температуры выдержки на второй ступени отжига (T_2) в данном экспериментальном плане выбраны менее $T_{пл} - 290$ °С вследствие того, что, как показано рядом сторонних исследований, применение более высоких температур (в частности, 720 °С) хоть и обеспечивает для сплавов-аналогов типа SP700 (Ti–4,5Al–3V–2Mo–2Fe) высокий уровень пластичности и ударной вязкости в широком диапазоне температур T_1 (от 830 до 900 °С), однако прочностные свойства остаются на невысоком уровне ($\sigma_b = 980$ –1040 МПа) [14].

Механические свойства штамповок из сплава BT23M после термической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства (средние значения) при растяжении штамповок из титанового сплава BT23M при температуре 20 °С

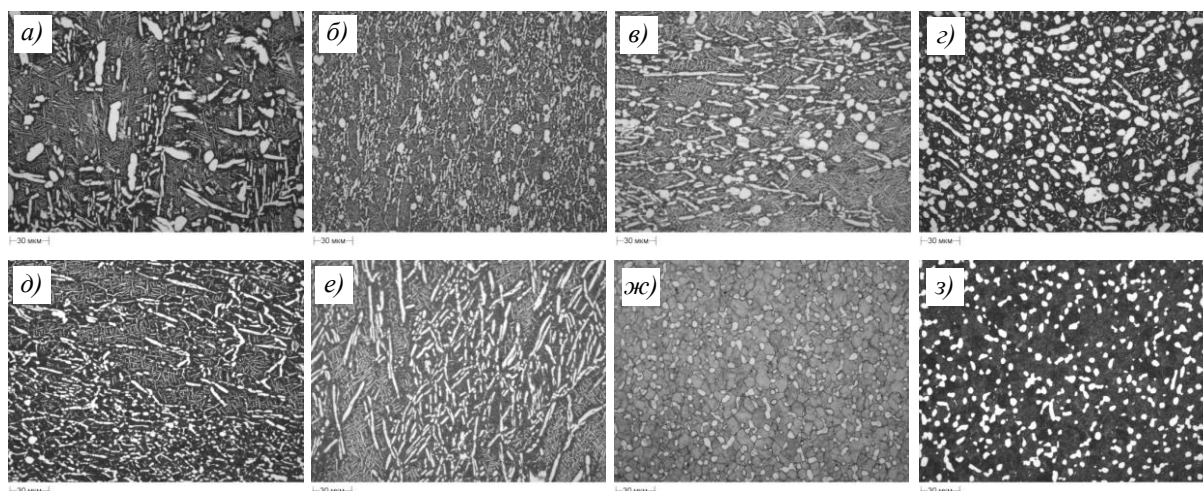
Условный номер режима	Модуль упругости E , ГПа	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
1	117,3	1170	1100	13,0	37	50
2	117,6	1230	1140	11,0	35	37
3	115,6	1140	1090	15,0	52	51
4	121,3	1270	1170	9,8	31	27
5	117,1	1220	1140	11,0	38	36
6	116,1	1160	1100	12,0	45	50
7	117,3	1270	1180	11,5	46	34
8	117,9	1180	1090	12,0	45	44
Сплав Ti–6Al–4V (США)	114	910	840	≥10	≥20	–
Сплав BT6ч (РФ)	–	890	–	13	34	69

Анализ полученных результатов показывает, что изменение температуры выдержки первой и второй ступеней отжига не оказывает существенного влияния на значения модуля упругости полуфабрикатов. Исключением является режим 4, для которого зафиксировано наиболее высокое значение модуля упругости. Повышение температуры первой ступени с $T_{п.п} - 100$ до $T_{п.п} - 20$ °С при неизменной $T_2 = T_{п.п} - 340$ °С сначала приводит к некоторому увеличению прочностных характеристик, снижению пластичности и в значительной степени ударной вязкости, а затем, наоборот, к снижению прочностных и повышению пластических свойств. Для температуры $T_2 = T_{п.п} - 390$ °С в интервале $T_1 = T_{п.п} - 60 \dots 20$ °С также наблюдается повышение пластичности и ударной вязкости, однако характеристики прочности не изменяются.

Повышение T_2 с $T_{п.п} - 340$ до $T_{п.п} - 290$ °С при температуре первой ступени отжига $T_{п.п} - 70$ и $T_{п.п} - 60$ °С значительно снижает уровень прочностных свойств (на величину до 90 МПа), увеличивает пластические показатели (δ_5 на 1–4 п.п.), а также ударную вязкость (на $\sim(35-40)$ %).

При более высокой температуре первой ступени отжига $T_1 = T_{п.п} - 20$ °С повышение T_2 с $T_{п.п} - 390$ до $T_{п.п} - 340$ °С также снижает уровень прочностных свойств на 90 МПа, при этом относительное удлинение практически не повышается, а ударная вязкость возрастает на ~ 30 %.

Проведены исследования микроструктуры штамповок из титанового сплава ВТ23М. Изображения микроструктуры представлены на рисунке.



Микроструктуры (оптическая микроскопия, анализируемая плоскость – поперечная) штамповок из титанового сплава ВТ23М после термической обработки по режиму 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж) и 8 (з)

В соответствии с девятитипной шкалой микроструктур для штамповок и поковок ПИ 1.2.785–2009 определен тип микроструктуры сплава ВТ23М в зависимости от режима термической обработки:

Условный номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип микроструктуры	2а–2б	2а–2б	2–2б	2а–2б	2–3	4–3б	1а–1б	1а

Первичная α -фаза после двойного отжига по режимам 1–4 представлена как пластинчатой, так и глобулярной морфологиями. При этом для режима 1 характерна наиболее грубая морфология как первичной, так и вторичной α -фазы. Морфология первичной α -фазы после двойного отжига по режимам 5 и 6 преимущественно пластинчатая с незначительной долей частиц глобулярной морфологии. Пластины α -фазы расположены преимущественно неориентированно по объему материала. Для режимов 7 и 8

характерна мелкозернистая структура с первичной α -фазой исключительно глобулярной морфологии и очень мелкодисперсной смесью частиц пластинчатой морфологии вторичных α - и β -фаз.

Участки расположения исходной матричной β -фазы, сформировавшиеся после первой стадии двойного отжига для всех опробованных режимов, представляют собой мелкодисперсную однородную смесь частиц вторичной α -фазы тонкопластинчатой морфологии, расположенных преимущественно неориентированно, и остаточную равновесную β -фазу между ними.

Обсуждение результатов

Сравнение микроструктур показало, что повышение температуры первой ступени с $T_{п.п} - 100$ до $T_{п.п} - 60$ °С при неизменной $T_2 = T_{п.п} - 340$ °С заметно уменьшает размер и изменяет морфологию частиц первичной α -фазы. Если при температуре $T_{п.п} - 100$ °С первичная α -фаза представлена достаточно крупными частицами скругленной формы и толстыми пластинами как зернограничной, так и внутризеренной топологии, то при $T_{п.п} - 70$ и $T_{п.п} - 60$ °С первичная α -фаза представлена преимущественно пластинами и меньшим количеством частиц глобулярной морфологии. Дальнейшее повышение температуры T_1 до $T_{п.п} - 20$ °С приводит к формированию частиц первичной α -фазы исключительно глобулярной морфологии.

Вследствие того, что для всех режимов термической обработки охлаждение осуществляли на воздухе, в структуре практически отсутствует первичная α -фаза тонкопластинчатой и игольчатой морфологий, в отличие от структуры сплавов-аналогов, сформированной при быстром охлаждении в воде [19].

Уровень механических свойств штамповок из сплава ВТ23М соответствует аналогичным значениям, полученным для зарубежного сплава-аналога SP700 (Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe) после термической обработки по режимам двойного отжига и с учетом выбранной авторами исследования [14] более высокой температуры второй стадии отжига, способствующей укрупнению и глобуляризации пластин α -фазы.

Анализ механических свойств и структурных особенностей в данном исследовании выявил положительную взаимосвязь количества частиц глобулярной α -фазы и относительного удлинения сплава ВТ23М, что также является характерным для значительной части гетерофазных титановых сплавов [20]. Наличие в структуре сплава значительной доли грубопластинчатых выделений первичной и вторичной α -фазы коррелирует с более высокими значениями ударной вязкости.

Согласно полученным результатам, режимы двойного отжига 3, 1 и 6 в наибольшей степени соответствуют поставленной цели по обеспечению сбалансированного комплекса механических свойств. Для режима 3 ($T_1 = T_{п.п} - 70$ °С и $T_2 = T_{п.п} - 290$ °С) характерна глобулярно-пластинчатая морфология первичной α -фазы, обеспечивающая высокий уровень пластичности и ударной вязкости при достаточном уровне прочностных свойств. При этом мелкодисперсная смесь с пластинчатой вторичной α -фазой реализует требуемый уровень прочности сплава.

Ожидается, что данный тип структуры также обеспечит высокий уровень сопротивления усталостному разрушению и вязкости разрушения сплава за счет сопротивления зарождению трещин усталости вследствие значительной доли глобулярной составляющей α -фазы, а также дополнительного ветвления и изменения направления распространения трещин в процессе их продвижения в бимодальной структуре с пластинчатыми выделениями различной степени дисперсности, расположенными неориентированно.

Заключения

Исследовано влияние технологических параметров двойного отжига на структуру и физико-механические свойства штамповок из титанового сплава ВТ23М с целью

обеспечения сбалансированного комплекса прочностных, пластических характеристик и ударной вязкости.

Установлено, что требуемый уровень механических свойств обеспечивается при температурах первой и второй (T_1/T_2) ступеней отжига $T_{п.п} - 100$ °С/ $T_{п.п} - 340$ °С и $T_{п.п} - 70...60$ °С/ $T_{п.п} - 290$ °С. В процессе двойного отжига по данным режимам формируются структура пластинчатой или бимодальной глобулярно-пластинчатой морфологии первичной α -фазы, а также мелкодисперсная смесь с пластинчатыми неориентированными выделениями вторичной α -фазы.

В качестве режима двойного отжига, обеспечивающего наиболее сбалансированный комплекс прочностных и пластических свойств, а также ударной вязкости, выбран режим 3 ($T_1 = T_{п.п} - 70$ °С и $T_2 = T_{п.п} - 290$ °С), для которого характерна бимодальная морфология первичной α -фазы.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
3. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путьрский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
4. Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава ВТ6 при усталости // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
5. Дуюнова 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: 09.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
6. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Eds. C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, 2003. 513 p.
7. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств деформированных полуфабрикатов сплавов ВТ23М и ВТ43, оценка их климатической стойкости в условиях арктического климата // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-101-110.
8. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
9. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
10. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
11. Швецов О.В., Кондратьев С.Ю. Влияние режимов закалки и старения на эксплуатационные свойства сплава ВТ23 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 119–133. DOI: 10.18721/JEST.240210.
12. Гладковский С.В., Веселова В.Е., Дубинский С.В. и др. Влияние режимов термической обработки на характеристики трещиностойкости и механизмы разрушения метастабильного титанового сплава ВТ23 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. 2023. Т. 25. № 1. С. 16–26. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.02.

13. Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава VT23 // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
14. Gunawarman G., Niinomi M., Eylon D. et al. Effect of β Phase Stability at Room Temperature on Mechanical Properties in β -Rich $\alpha+\beta$ Type Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe Alloy // ISIJ International. 2002. Vol. 42. No. 2. P. 191–199.
15. Gunawarman G., Niinomi M., Fukunaga K. et al. Effect of Cooling Rate on Microstructure and Fracture Characteristics of β -Rich $\alpha+\beta$ Type Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe Alloy // Materials Transactions. 2001. Vol. 42. No. 7. P. 1339–1348.
16. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. № 4. С. 36–46.
17. Веселова В.Е., Гладковский С.В., Ковалев Н.И. Влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства метастабильного титанового сплава VT23 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 4. С. 31–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.04.
18. Ильин А.А., Скворцова С.В., Попова Ю.А., Куделина И.М. Влияние термической обработки на формирование структуры и свойств крупногабаритных полуфабрикатов из сплава VT23 // Титан. 2010. № 4. С. 48–53.
19. Fukai H., Minakawa K.-N., Ouchi C. Strength–Ductility Relationship in Solution Treated and Aged $\alpha+\beta$ Type Ti-4.5%Al-3%V-2%Fe-2%Mo Titanium Alloy // ISIJ International. 2004. Vol. 44. No. 11. P. 1911–1917.
20. Xu J., Zeng W., Zhao Y. et al. Effect of globularization behavior of the lamellar alpha on tensile properties of Ti-17 alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 673. P. 86–92.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 10, no. 93, pp. 907–916.
2. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al-Si-Cu-Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
3. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
4. Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R. Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
5. 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: June 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
6. *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Eds. C. Leyens, M. Peters. Wiley-VCH, 2003, 513 p.
7. Putyrsky S.V., Arislanov A.A., Yakovlev A.L., Nochovna N.A. Studing of mechanical properties of deformed semi-finished products of VT23M and VT43 alloys, assessment of their climatic stability in the Arctic climate. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 26, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-101-110.
8. Lyasotskaya V.S. *Heat treatment of welded joints of titanium alloys*. Moscow: Ekomet, 2003, 352 p.

9. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Titanium alloys. Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
10. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
11. Shvetsov O.V., Kondratiev S.Yu. Effect of hardening and aging modes on the operational properties of VT23 alloy. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 119–133. DOI: 10.18721/JEST.240210.
12. Gladkovsky S.V., Veselova V.E., Dubinsky S.V. et al. Effect of heat treatment modes on crack resistance characteristics and fracture mechanisms of metastable titanium alloy VT23. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye. Materialovedeniye*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 16–26. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.02.
13. Dzunovich D.A., Panin P.V., Lukina E.A., Shiryaev A.A. Heat treatment effect on structure and properties of welded large-dimensioned semi-finished products from VT23 titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 1 (61), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
14. Gunawarman G., Niinomi M., Eylon D. et al. Effect of β Phase Stability at Room Temperature on Mechanical Properties in β -Rich $\alpha+\beta$ Type Ti–4.5Al–3V–2Mo–2Fe Alloy. *ISIJ International*, 2002, vol. 42, no. 2, pp. 191–199.
15. Gunawarman G., Niinomi M., Fukunaga K. et al. Effect of Cooling Rate on Microstructure and Fracture Characteristics of β -Rich $\alpha+\beta$ Type Ti–4.5Al–3V–2Mo–2Fe Alloy. *Materials Transactions*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 1339–1348.
16. Kablov E.N., Kirillov V.N., Zhirnov A.D., Startsev O.V., Vapirov Yu.M. Centers for climatic testing of aviation PCM. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2009, no. 4, pp. 36–46.
17. Veselova V.E., Gladkovsky S.V., Kovalev N.I. Influence of heat treatment modes on the structure and mechanical properties of metastable titanium alloy VT23. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 31–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.04.
18. Ilyin A.A., Skvortsova S.V., Popova Yu.A., Kudelina I.M. Influence of heat treatment on the formation of the structure and properties of large-sized semi-finished products made of VT23 alloy. *Titan*, 2010, no. 4, pp. 48–53.
19. Fukai H., Minakawa K.-N., Ouchi C. Strength–Ductility Relationship in Solution Treated and Aged $\alpha+\beta$ Type Ti–4.5%Al–3%V–2%Fe–2%Mo Titanium Alloy. *ISIJ International*, 2004, vol. 44, no. 11, pp. 1911–1917.
20. Xu J., Zeng W., Zhao Y. et al. Effect of globularization behavior of the lamellar alpha on tensile properties of Ti-17 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 673, pp. 86–92.

Информация об авторах

Ширяев Андрей Александрович, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Крохина Виктория Александровна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Путырский Станислав Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Анисимова Анна Юрьевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey A. Shiryaev, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Stanislav V. Putyrskiy, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna Yu. Anisimova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.07.2025.

The article was submitted 27.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.07.2025.