

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-25-34

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В  $\beta$ -ОБЛАСТИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА VT22M**В.А. Крохина<sup>1</sup>, А.А. Арисланов<sup>1</sup>, С.В. Путьрский<sup>1</sup>, С.А. Наприенко<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.** Представлены результаты исследования структуры и механических свойств полуфабрикатов из сплава VT22M после различных режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -области. Режимы отличались скоростью охлаждения из  $\beta$ -области и наличием промежуточных выдержек. Проведены исследования механических свойств при растяжении, ударной вязкости и вязкости разрушения, выполнен анализ макро- и микроструктуры. После испытаний на вязкость разрушения выполнены фрактографические исследования для оценки характера разрушения образцов. Показано влияние режимов термической обработки в  $\beta$ -области на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава VT22M.

**Ключевые слова:** титановый сплав VT22M, термическая обработка в  $\beta$ -области, микроструктура, механические свойства, фрактографический анализ

**Для цитирования:** Крохина В.А., Арисланов А.А., Путьрский С.В., Наприенко С.А. Исследование влияния режимов термической обработки в  $\beta$ -области на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава VT22M // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-25-34.

Scientific article

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES IN THE  $\beta$ -REGION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM THE VT22M ALLOY**V.A. Krokhdina<sup>1</sup>, A.A. Arislanov<sup>1</sup>, S.V. Putyrskiy<sup>1</sup>, S.A. Naprienko<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.** Presents the results of a study of the structure and mechanical properties of semi-finished products from the VT22M alloy after various modes of heat treatment with heating in the  $\beta$ -region. The regimes differed in the rate of cooling from the  $\beta$ -region and the presence of intermediate exposures. The study of mechanical properties in tension, impact strength and fracture toughness was carried out, the analysis of macrostructure and microstructure was carried out. After testing for fracture toughness, fractographic studies were performed to assess the nature of the fracture of the samples. The effect of heat treatment modes in the  $\beta$ -region on the structure and mechanical properties of semi-finished products from the VT22M alloy is shown.

**Keywords:** titanium alloy VT22M, heat treatment in the  $\beta$ -region, microstructure, mechanical properties, fractographic analysis of fractures

**For citation:** Krokhdina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Naprienko S.A. Investigation of the influence of heat treatment modes in the  $\beta$ -region on the structure and mechanical properties of semi-finished products from the VT22M alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-25-34.

### Введение

Термическая обработка титановых сплавов с нагревом в  $\beta$ -области представляет большой интерес, поскольку благодаря структуре, сформированной в результате такой обработки, возможно получить повышенные значения характеристик вязкости разрушения [1–5]. Но при этом ее применение требует подбора режимов, не допускающих формирования грубой структуры, образование которой приводит к снижению прочностных и пластических характеристик.

Помимо типа структуры, формирующейся при термообработке в  $\beta$ -области, на уровень вязкости разрушения влияют также размеры и форма различных структурных составляющих. Так, для наиболее высоких значений вязкости разрушения,  $\alpha$ -пластины, формирующиеся в  $\beta$ -зерне, должны располагаться близко друг к другу и быть короткими для обеспечения изменения направления движения растущей трещины. Зарубежные исследователи отмечают, что для оптимизации механических свойств путем регулирования микроструктуры в процессе термомеханической обработки одной из важнейших задач является предотвращение или ограничение образования  $\alpha$ -фазы вдоль границ зерен  $\beta$ -фазы. Это связано с тем, что указанная морфология оказывает негативное влияние на некоторые механические свойства (прочность при растяжении, пластичность, вязкость разрушения), особенно в случае образования больших равноосных зерен  $\beta$ -фазы [4–10].

Проведенные ранее исследования (на полуфабрикатах из сплава VT22M) показали, что структура, полученная после деформации с заключительной ступенью в  $\beta$ -области, обеспечивает высокие значения вязкости разрушения. Однако для формирования структуры, обеспечивающей достижение требуемых значений комплекса характеристик, необходима высокая степень деформации в  $\beta$ -области, что ограничивает применение данного метода для изготовления полуфабрикатов [5, 11].

Перспективность изготовления деталей и узлов из титановых сплавов с  $\beta$ -структурой, полученной при термической обработке, подтверждается опытом их успешного внедрения в авиационной технике. Например, для сплавов составов Ti–6Al–4V и Ti–10V–2Fe–3Al используется  $\beta$ -отжиг. Термическая обработка в  $\beta$ -области широко применяется к ответственным элементам конструкции планера и шасси для изготовления деталей новых серийных самолетов компании Boeing (стойки пилона, узел кессона крыла и др. из сплава состава Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr) [4, 9, 10, 12].

Для получения  $\beta$ -структуры с помощью термической обработки необходимым условием достижения высоких значений комплекса механических свойств полуфабрикатов из титановых сплавов является формирование мелкозернистой структуры деформированного полуфабриката, что достигается путем последовательного применения приемов термомеханической обработки, включающих фазовую перекристаллизацию, контроль степени деформации и т. д. – отковки слитка до непосредственно штамповки с заключительной стадией в  $(\alpha + \beta)$ -области. Последнее связано с тем, что при изготовлении полуфабрикатов, деформированных в  $\beta$ -области, повышение температуры отжига до температур, соответствующих  $\beta$ -области, резко ускоряет рост рекристаллизованных зерен за счет деформированных. Независимо от скорости нагрева мелкие рекристаллизованные зерна вырастают до соприкосновения, и далее идет собирательная рекристаллизация, приводящая к образованию полиэдрической крупнозернистой структуры. Из-за интенсивного роста  $\beta$ -зерна структура отожженных в  $\beta$ -области сплавов почти всегда крупнозернистая, с размером зерна в несколько сотен микрометров. Сравнительно мелкое  $\beta$ -зерно можно получить используя скоростной нагрев, позволяющий сократить время пребывания металла в  $\beta$ -области до нескольких секунд. Однако в промышленном производстве данный метод трудозатратен и малоосуществим [6–8, 13–17].

В данной статье приведены результаты исследования механических свойств полуплавок из высокопрочного титанового сплава ВТ22М после различных режимов термической обработки в  $\beta$ -области.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [18, 19].

### Материалы и методы

Для изготовления заготовок и проведения исследований в вакуумно-дуговой печи VAR-L200 выплавлены слитки из сплава ВТ22М, которые подвергали механической обработке и исследованию химического состава. Содержание основных легирующих элементов (кислорода, азота и водорода) слитков соответствовало требованиям ОСТ 1 90013–81 для титанового сплава ВТ22М. Исследования механических свойств и структуры заготовок из сплава ВТ22М проводили после деформации с чередованием нагревов в  $\beta$ - и  $(\alpha + \beta)$ -областях. Заключительная деформация проведена в  $(\alpha + \beta)$ -области. После деформации заготовки подвергали термической обработке в  $\beta$ -области по следующим режимам ( $T_{п.п}$  – температура полиморфного превращения):

– режим 1 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка, медленное охлаждение с печью до 750 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (первая ступень ступенчатого отжига с нагревом в  $\beta$ -области);

– режим 2 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка, охлаждение с контролируемой скоростью в печи с вентилятором до 750 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (первая ступень ступенчатого отжига с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области);

– режим 3 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка, медленное охлаждение с печью до 750 °С, выдержка и охлаждение на воздухе; нагрев до 580 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (ступенчатый режим);

– режим 4 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка, охлаждение с контролируемой скоростью в печи с вентилятором до 750 °С, выдержка и охлаждение на воздухе; нагрев до 580 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (ступенчатый режим с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области);

– режим 5 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка и медленное охлаждение с печью; нагрев до 580 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (режим двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области);

– режим 6 – нагрев до  $(T_{п.п} + 30)$  °С, выдержка и охлаждение с контролируемой скоростью в печи с вентилятором; нагрев до 580 °С, выдержка и охлаждение на воздухе (режим двойного отжига с быстрым охлаждением в печи из  $\beta$ -области).

Режимы 1 и 2 относятся к неполной термической обработке и проводятся с целью исследования влияния скорости охлаждения из  $\beta$ -области на структуру и свойства сплава.

Исследования микроструктуры выполняли на анализаторе фрагментов твердых частиц на базе металлографического микроскопа Olympus GX51. Анализ проводили на подготовленном поперечном срезе разрушенной половинки образца для определения ударной вязкости КСУ.

Испытания на растяжение образцов из титанового сплава ВТ22М проводили по ГОСТ 1497–84.

Испытания на ударную вязкость КСУ образцов проводились по ГОСТ 9754–2020. Испытания на определение вязкости разрушения выполняли по ГОСТ 25.506–85.

Фрактографические исследования проводили на разрушенных образцах методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе Zeiss EVO MA10 после испытаний на определение вязкости разрушения.

### Результаты и обсуждение

Проведенный визуальный анализ макроструктуры образцов после всех режимов термической обработки показал, что общий фон макроструктуры основного металла характеризуется блестящей тональностью, области с отличающимся фоном травимости отсутствуют, структура материала равномерная.

На рис. 1 приведены изображения микроструктуры образцов из заготовок сплава BT22M после различных режимов термической обработки в  $\beta$ -области.

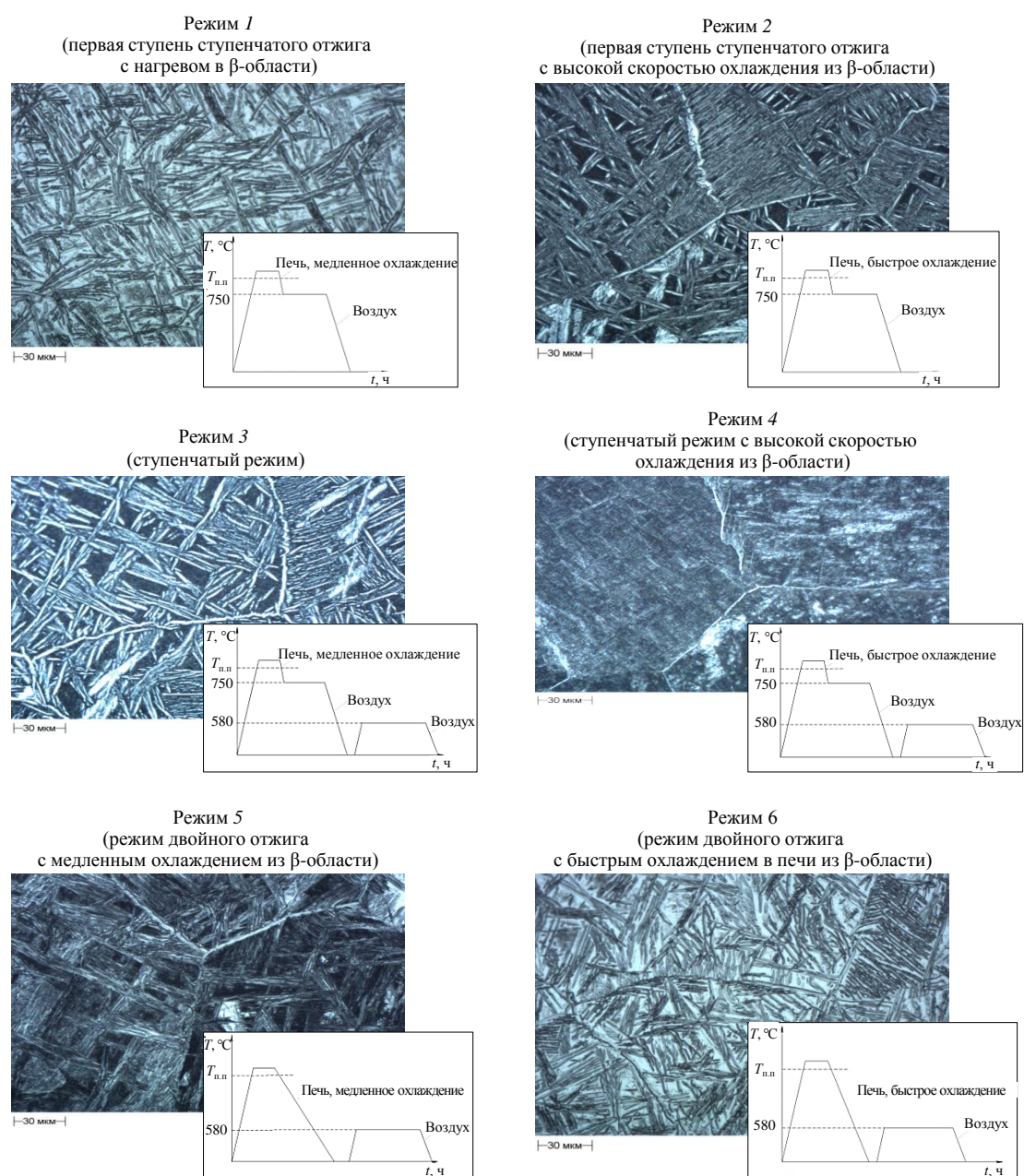


Рис. 1. Микроструктура заготовок из титанового сплава BT22M после различных режимов термической обработки

Микроструктура исследованных образцов из сплава ВТ22М в общем виде представлена крупными  $\beta$ -зернами и  $\alpha$ -фазой пластинчатой морфологии. Микроструктура после первой ступени ступенчатого отжига с медленным охлаждением до температуры 750 °С (режим 1) представлена преимущественно длинными  $\alpha$ -пластинами по всему объему  $\beta$ -зерен, обладающих тонкими границами. На границах  $\beta$ -зерен образуется незначительное количество колоний  $\alpha$ -пластин. При высокой скорости охлаждения из  $\beta$ -области (режим 2) наблюдаются участки, свободные от выделения  $\alpha$ -пластин, по границам  $\beta$ -зерен образуется большее количество колоний пластин  $\alpha$ -фазы по сравнению с режимом 1.

После проведения второй ступени отжига при медленном охлаждении из  $\beta$ -области (режим 3) границы  $\beta$ -зерен становятся ярко выраженными,  $\alpha$ -пластины становятся более тонкими и короткими, между колониями образуются зоны без  $\alpha$ -пластин. На границах  $\beta$ -зерен сохраняется незначительное количество  $\alpha$ -колоний. После ступенчатого режима отжига с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области (режим 4) также наблюдается уменьшение размеров  $\alpha$ -пластин с сохранением колоний пластин  $\alpha$ -фазы на границах  $\beta$ -зерен.

Микроструктура, полученная после режима двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области (режим 5), близка к микроструктуре, полученной после режима 3. Однако после режима 5 получены еще более тонкие пластины  $\alpha$ -фазы и большее количество свободных от выделения  $\alpha$ -пластин участков. По границам  $\beta$ -зерен расположено больше колоний  $\alpha$ -пластин, однако их размеры гораздо меньше, чем размеры пластин в  $\beta$ -зернах. После режима двойного отжига с быстрым охлаждением в печи из  $\beta$ -области (режим 6) образуются  $\alpha$ -пластины различной толщины и размеров по всему объему  $\beta$ -зерен, граница которых слабо выражена. На границах  $\beta$ -зерен присутствует большое количество колоний  $\alpha$ -пластин.

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении, ударную вязкость и вязкость разрушения образцов из сплава ВТ22М после термообработки по представленным режимам приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Свойства заготовок из сплава ВТ22М после различных режимов термической обработки (средние значения)**

Условный номер режима	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	Модуль упругости, ГПа	$\delta$	$\psi$	$KCU, \text{кДж/м}^2$	$K_{1c}, \text{МПа} \sqrt{\text{м}}$
	МПа			%			
1 (первая ступень ступенчатого отжига с нагревом в $\beta$ -области)	927	903	101	19,5	37,0	623	109
2 (первая ступень ступенчатого отжига с высокой скоростью охлаждения из $\beta$ -области)	1180	1090	116	7,4	13,5	363	82
3 (ступенчатый режим)	1170	1083	117	8,5	12,5	300	114
4 (ступенчатый режим с высокой скоростью охлаждения из $\beta$ -области)	1113	1040	117	11,5	20,5	340	90
5 (режим двойного отжига с медленным охлаждением из $\beta$ -области)	1053	990	114	14,5	24,0	490	115
6 (режим двойного отжига с быстрым охлаждением в печи из $\beta$ -области)	937	910	102	18,5	40,0	647	112

Результаты испытаний показывают, что наибольшим пределом прочности при растяжении обладают образцы после режимов 2 (первая ступень ступенчатого отжига с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области), 3 (ступенчатый режим) и 4 (ступенчатый режим с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области). Из них наилучшие характеристики пластичности обеспечиваются после режима 4 (ступенчатый режим с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области). Высокая ударная вязкость при наибольшей прочности также получена после режимов 2 (первая ступень ступенчатого отжига с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области) и 4 (ступенчатый режим с высокой скоростью охлаждения из  $\beta$ -области). Высокими значениями вязкости разрушения обладают все образцы, однако после режима 5 (режим двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области) получены наивысшие значения.

Исследовано влияние продолжительности выдержки при температурах нагрева в  $\beta$ -области при ступенчатом режиме 3. Изображения микроструктуры после термообработки представлены на рис. 2, результаты испытаний приведены в табл. 2.

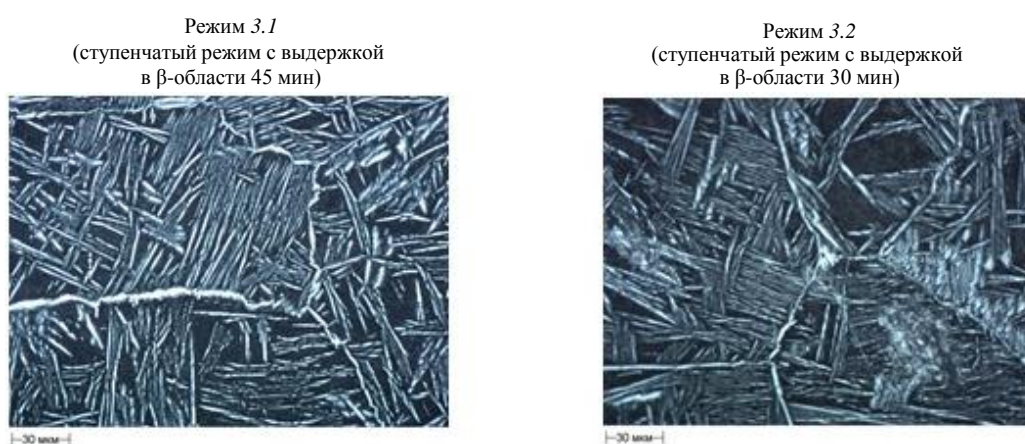


Рис. 2. Микроструктура заготовок из титанового сплава ВТ22М после ступенчатой термической обработки (по режиму 3) с различной продолжительностью выдержки в  $\beta$ -области

Микроструктура представлена крупными  $\beta$ -зернами и неравномерно распределенными  $\alpha$ -пластинами. С уменьшением времени выдержки неравномерность увеличивается, свободных от выделения  $\alpha$ -пластин участков становится больше.

Таблица 2

Свойства заготовок из сплава ВТ22М после ступенчатой термической обработки (режим 3) с различным временем выдержки в  $\beta$ -области (средние значения)

Условный номер режима	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	Модуль упругости, ГПа	$\delta$	$\psi$	$K_{CU}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$
	МПа			%			
3.1 (ступенчатый режим с выдержкой в $\beta$ -области 45 мин)	1180	1100	117	8,2	10,5	260	72
3.2 (ступенчатый режим с выдержкой в $\beta$ -области 30 мин)	1190	1120	117	6,6	8,3	250	73

Результаты механических испытаний показывают, что уменьшение времени выдержки приводит к снижению характеристик пластичности и ударной вязкости.

Для оценки характера разрушения образцов после испытаний на вязкость разрушения проведены фрактографические исследования после режимов 1 (первая ступень ступенчатого отжига с нагревом в  $\beta$ -области), 3 (ступенчатый режим) и 5 (режим двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области).

Характер изломов образцов после испытаний на вязкость разрушения представлен на рис. 3.

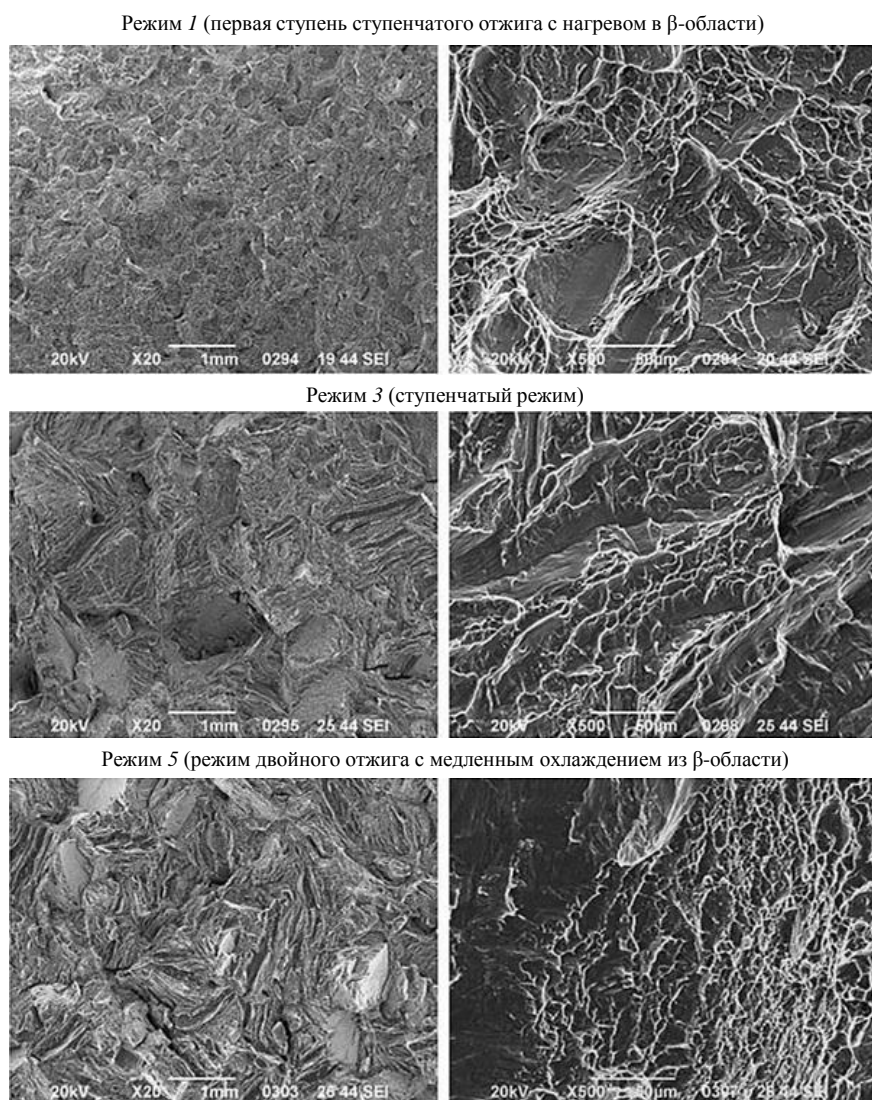


Рис. 3. Структура изломов после режимов термической обработки 1, 3 и 5

Разрушение во всех случаях развивалось с формированием пластичного ямочно-го микрорельефа. При этом ямки после первой ступени ступенчатого отжига с нагревом в  $\beta$ -области имеют равноосную морфологию, в то время как на образцах после ступенчатого режима и режима двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области наблюдаются вытянутые пластичные участки, имеющие различную ориентацию по отношению к поверхности и направлению разрушения. Данные фрактографические особенности связаны с разрушением оторочек  $\alpha$ -фазы на границах  $\beta$ -зерен и однонаправленных колоний пластин  $\alpha$ -фазы внутри зерен.

### Заключения

Исследования микроструктуры показали, что скорость охлаждения из  $\beta$ -области (режимы 1 и 2) сильно влияет на количество и форму  $\alpha$ -пластин. С увеличением скорости охлаждения объем образовавшихся  $\alpha$ -колоний по границам  $\beta$ -зерен увеличивается, что, по-видимому, приводит к снижению значений вязкости разрушения (режимы ступенчатой обработки 3 и 4). После режимов двойного отжига (режимы 5 и 6) из-за высокой

скорости охлаждения также наблюдается увеличение размеров  $\alpha$ -пластин и снижение прочности.

Результаты испытаний по определению механических свойств показали, что для сплава VT22M (с учетом области его применения) оптимальным уровнем свойств обладают заготовки после ступенчатого режима (режим 3) и режима двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области (режим 5). Однако наилучший комплекс свойств с учетом результатов определения вязкости разрушения получен после ступенчатого режима (режим 3). Проведенные для данного режима исследования по определению оптимальной продолжительности выдержки при температурах  $\beta$ -области показали, что с уменьшением времени выдержки увеличивается неравномерность распределения  $\alpha$ -пластин в  $\beta$ -зернах, что приводит к снижению характеристик пластичности и ударной вязкости.

Фрактографические исследования также подтверждают то, что высокие значения вязкости разрушения обеспечиваются благодаря частицам  $\alpha$ -фазы пластинчатой морфологии, меняющей направление движения трещин (рис. 3). Такая микроструктура получена после режимов 3 и 5. Идентичный характер разрушения после этих режимов может свидетельствовать о том, что микроструктура должна обладать тонкими и короткими пластинами  $\alpha$ -фазы, равномерно распределенными внутри первичного  $\beta$ -зерна.

Исходя из полученных результатов исследований, можно сделать вывод, что для обеспечения высоких значений вязкости разрушения в микроструктуре должны быть равномерно распределенные небольшие  $\alpha$ -пластины внутри  $\beta$ -зерна с наименьшим количеством колоний по границам зерен (что подтверждает зарубежные исследования титановых сплавов в данной области [4, 9]). Увеличение скорости охлаждения из  $\beta$ -области приводит к снижению вязкости разрушения ввиду формирования зон, свободных от выделения  $\alpha$ -фазы пластинчатой морфологии. После режима двойного отжига с медленным охлаждением из  $\beta$ -области (режим 5) получены максимальные значения вязкости разрушения при удовлетворительных значениях механических свойств для сплава VT22M.

Таким образом, термическая обработка сплава VT22M с нагревом в  $\beta$ -области обеспечивает высокие значения вязкости разрушения с сохранением значений комплекса свойств на удовлетворительном уровне при формировании микроструктуры описанной ранее морфологии, что достигается выбором режима термической обработки. Для обеспечения возможности применения разработанных режимов для термической обработки заготовок деталей необходима их отработка в опытно-промышленных условиях на крупногабаритных полуфабрикатах.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-инф. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. № 5. С. 2–6.
4. Demakov S.T., Gadeev D.V., Illarionov A.G., Ivasishin O.M. Effect of heat treatment in the structure and fracture behavior of titanium alloy VST5553 // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57. No. 7–8. P. 473–479.
5. Каблов Е.Н., Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава VT22M, изготовленных с заключительной деформацией в ( $\alpha + \beta$ )- и  $\beta$ -областях // Титан. 2021. № 1 (70). С. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
6. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.

7. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ. 2013. № 2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2022).
8. Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А., Ливанов В.А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Metallurgiya, 1980. 464 с.
9. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2003. Vol. 5. P. 419–427.
10. Тетюхин В.В., Левин И.В., Ледер М.О., Шибанов А.С. Разработка нового высокопрочного сплава: Ti 5Al–5Mo–5V–3Cr // *Современные научные проблемы и технологии в гражданской авиации*. М.: Наука, 2013. С. 240–251.
11. Крохина В.А., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Перспективы применения  $\beta$ -деформации для высокопрочного титанового сплава переходного класса VT22M // *Титан*. 2019. № 3 (65). С. 42–47.
12. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Osaka: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2014. P. 22–27.
13. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Давыдова Е.А. Исследование структурно-фазовых превращений в псевдо- $\beta$ -титановых сплавах и влияния скорости охлаждения с температуры гомогенизации на структуру и свойства сплава VT47. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-11-19.
14. 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: 20.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
15. 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: 08.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
16. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо- $\beta$ -титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-22-29.
17. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // *Наука в России*. 2012. № 4. С. 7–11.

### References

1. Kablov E.N. *Trends and guidelines for Russia's innovative development*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N. What is innovation. *Nauka i zhizn*, 2011, no. 5, pp. 2–6.
4. Demakov S.T., Gadeev D.V., Illarionov A.G., Ivasishin O.M. Effect of heat treatment in the structure and fracture behavior of titanium alloy VST5553. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 7–8, pp. 473–479.
5. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Investigation of resistance to fatigue failure of forgings from high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in ( $\alpha + \beta$ )- and  $\beta$ -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
6. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.

7. Horev A.I. Fundamental and applied works on structural titanium alloys and perspective directions of their development. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 15, 2022).
8. Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Livanov V.A. *Titanium alloys. Metallography of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.
9. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2003, vol. 5, pp. 419–427.
10. Tetyukhin V.V., Levin I.V., Leder M.O., Shibanov A.S. Development of a new high-strength alloy: Ti 5Al–5Mo–5V–3Cr. *Sovremennye nauchnyye problemy i tekhnologii v grazhdanskoy aviacii*, Moscow: Nauka, 2013, pp. 240–251.
11. Krokhnina V.A., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A. Prospects for the use of  $\beta$ -deformation for a high-strength titanium alloy of the transition class VT22M. *Titan*, 2019, no. 3 (65), pp. 42–47.
12. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. *Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry*. Osaka: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2014, pp. 22–27.
13. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Shiryayev A.A., Davydova E.A. Investigation of structural and phase transformations in metastable  $\beta$ -titanium alloys and effect of cooling rate from homogenization temperature on structure and properties of VT47 alloy. Part 2. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-11-19.
14. Dzunovich D.A., Panin P.V., Lukina E.A., Shiryayev 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: June 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
15. 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: December 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
16. Nochovnaya N.A., Shiryayev A.A. Effect of heat treatment on mechanical properties and structure of high-strength metastable  $\beta$ -titanium alloy with experimental composition. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-22-29.
17. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryayev A.A., Novak A.V. *A practical guide to the metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds: textbook*. allowance. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Kablov E.N. VIAM: continuation of the path. *Nauka v Rossii*, 2012, no. 4, pp. 7–11.

## Информация об авторах

**Крохина Виктория Александровна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Арисланов Аскаджон Абдурасулович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Путырский Станислав Владимирович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Наприенко Сергей Александрович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

## Information about the authors

**Viktoriya A. Krokhnina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Askadzhon A. Arislanov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Stanislav V. Putyrskiy**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Sergey A. Naprienko**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 19.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.01.2023.  
The article was submitted 19.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 24.01.2023.