

Научная статья

УДК 621.7.043

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ШТАМПОВОК ИЗ СПЛАВА VT6ч ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С НАГРЕВОМ В $\beta$ -ОБЛАСТЬ

В.А. Крохина<sup>1</sup>, А.А. Арисланов<sup>1</sup>, С.В. Путырский<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 механических свойств и микроструктуры штамповок из сплава VT6ч после термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область в зависимости от скорости охлаждения с температуры  $\beta$ -области, температуры второй ступени термической обработки, а также геометрических параметров штамповок. Приведены значения механических свойств при растяжении, ударной вязкости, вязкости разрушения и микроструктура штамповок, а также малоцикловая усталость и предел выносливости для сравнения свойств. Проведен сравнительный анализ полученных результатов испытаний.

**Ключевые слова:** штамповки из титанового сплава VT6ч, режимы термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область, механические свойства, вязкость разрушения, микроструктура

**Для цитирования:** Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В. Исследование механических свойств и структуры штамповок из сплава VT6ч после термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.

Scientific article

## INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF FORGINGS MADE OF VT6ch ALLOY AFTER HEAT TREATMENT WITH HEATING IN THE $\beta$ -AREA

V.A. Krokhina<sup>1</sup>, A.A. Arislanov<sup>1</sup>, S.V. Putyrskiy<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 results of a study of the mechanical properties and microstructure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the  $\beta$ -area, depending on the cooling rate from the temperature of the  $\beta$ -area, the temperature of the second stage of heat treatment, as well as the geometric parameters of the forgings. The values of mechanical properties under tension, impact strength, fracture toughness, microstructure of forgings, as well as low-cycle fatigue and endurance limit in terms of comparing properties are given. A comparative analysis of the obtained test results was carried out.

**Keywords:** forgings of titanium alloy VT6ch, modes of heat treatment with heating in the  $\beta$ -area, mechanical properties, fracture toughness, microstructure

**For citation:** Krokhina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V. Investigation of the mechanical properties and structure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the  $\beta$ -area. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.

## Введение

Наиболее широкое применение в российской авиации получил титановый сплав ( $\alpha + \beta$ )-класса средней прочности ВТ6ч, а в зарубежной – его аналог сплав Ti-6-4. Из сплава ВТ6ч изготавливают большое количество деталей и элементов изделий авиационной техники – например, силовые сварные и монолитные детали и узлы планера и шасси в гражданском среднемагистральном узкофюзеляжном самолете Сухой Суперджет (SSJ-100), а также в конструкциях самолета МС-21 и изделиях как гражданского, так и военного назначения ПАО «Гуполев» [1–8].

Увеличение значений вязкости разрушения, как неотъемлемой характеристики трещиностойкости, является одной из основных задач современных разработок [5–9]. В работе [2] показано, что, несмотря на высокие значения вязкости разрушения, заключительная деформация в  $\beta$ -области применяется лишь в тех случаях, когда необходимо выполнение требований по геометрическим параметрам крупногабаритных полуфабрикатов, а возможность изготовления данных полуфабрикатов с применением традиционных схем – с деформацией в ( $\alpha + \beta$ )-области – отсутствует. В свою очередь, за рубежом для полуфабрикатов из сплава Ti-6-4 толщиной до 110 мм находит применение отжиг с нагревом при температурах  $\beta$ -области ( $\beta$ -отжиг) [3, 4].

Как известно, после проведения процесса термической обработки образуется микроструктура с крупным размером  $\beta$ -зерна и большей текстурированностью внутризеренных пластин  $\alpha$ -фазы, поэтому вязкость разрушения увеличивается сильнее в сравнении с деформацией в  $\beta$ -области на заключительной стадии. Считается, что пластинчатые структуры обеспечивают высокие значения вязкости разрушения, сопротивления развитию трещин, характеристик жаропрочности при низких значениях прочности, пластичности и сопротивления усталости [10–15]. Однако проведенные ранее исследования [2] крупногабаритных полуфабрикатов из сплава ВТ6ч (поковки штампованные (штамповки) и кованные, профили), полученных по различным технологическим схемам, показали, что пластинчатая структура, формируемая при заключительной деформации в  $\beta$ -области, может обеспечить уровень механических свойств, сопоставимый с уровнем свойств полуфабрикатов с глобулярной структурой, полученной при заключительной деформации в ( $\alpha + \beta$ )-области, а также более высокие значения вязкости разрушения.

Согласно данным работы [10], вязкость разрушения титановых сплавов с пластинчатой структурой возрастает с увеличением диаметра первичных  $\beta$ -зерен, размеров  $\alpha$ -колоний и толщины  $\alpha$ -пластин, что связывают с более частым и резким изменением направления движения магистральной трещины и, соответственно, снижением скорости ее распространения.

Учитывая тот факт, что исследования, проведенные в последние годы [1–3], в некоторых выводах не совпадают с полученными ранее данными, что связано с применением нового, более современного оборудования и внесением корректировок в параметры технологических процессов при изготовлении полуфабрикатов, актуальной остается задача по исследованию процесса термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область.

В данной статье приведены результаты определения (и их сравнение) механических свойств и микроструктуры штамповок из титанового сплава ВТ6ч после процесса термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область в зависимости от скорости охлаждения, температуры второй ступени, а также геометрических параметров исследуемых полуфабрикатов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

Для проведения исследований использованы штамповки из титанового сплава ВТ6ч, изготовленные на опытно-промышленном производстве. Данные штамповки изготовлены с заключительной деформацией в  $(\alpha + \beta)$ -области.

Для исследования влияния скорости охлаждения на формирование  $\beta$ -структуры подобраны экспериментальные режимы термической обработки титанового сплава ВТ6ч, включающие нагрев при температуре  $\beta$ -области на первой ступени термической обработки  $((T_{п.п} + 30) \text{ }^\circ\text{C})$ , где  $T_{п.п}$  – температура полиморфного превращения) и различные скорости охлаждения с температуры  $\beta$ -области  $(750 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$  с последующим охлаждением на воздухе (режим 1), под вентилятором (режим 2) и медленным охлаждением с печью (режим 3).

Для исследования влияния температуры второй ступени термической обработки на свойства и микроструктуру штамповок выбраны режимы и проведена термическая обработка при нагреве и выдержке при температуре  $(T_{п.п} + 30) \text{ }^\circ\text{C}$  с охлаждением на воздухе и выдержка при температурах  $700 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  (режим 4),  $650 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  (режим 5) и  $600 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  (режим 6) с охлаждением на воздухе.

Для исследования влияния массогабаритных параметров на структуру и свойства штамповок проведена термическая обработка по режиму 4 на двух различных штамповках: массой 180 кг, а также массой 355 кг.

Испытания образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч на растяжение проводили согласно требованиям ГОСТ 1497–84, на ударную вязкость – по ГОСТ 9754–2020, на вязкость разрушения – по ГОСТ 25.506–85. Исследования микроструктуры выполняли на подготовленных травленых микрошлифах на оптическом металлографическом микроскопе.

Испытания на малоцикловую усталость проводили на двух различных типах образцов: полосе с отверстием и проушине, согласно требованиям ГОСТ 25.502–79. Для образцов типа «Полоса с отверстием» выбран теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 2,6$ , для образцов типа «Проушина» –  $\alpha_\sigma = 3,2$ ; коэффициент асимметрии  $R_\sigma = 0,1$  и частота  $\nu = 5 \text{ Гц}$ .

Испытания на многоцикловую усталость проводили на двух различных типах образцов: на гладких образцах и на образцах с надрезом при изгибе с вращением, согласно требованиям ГОСТ 25.502–79; коэффициент асимметрии  $R = -1$ , частота  $\nu = 50 \text{ Гц}$ , цикл нагружения синусоидальный.

### Результаты и обсуждения

В табл. 1 представлены результаты проведенных испытаний (средние значения) на растяжение, ударную вязкость и вязкость разрушения образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после трех режимов термической обработки с различными скоростями охлаждения с температуры  $\beta$ -области. На рис. 1 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

Таблица 1

**Свойства образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после различных режимов термической обработки (средние значения)**

Условный номер режима	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Модуль упругости, ГПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_{1c}$ , МПа $\sqrt{м}$
1	920	843	117	7,5	16,5	530	100
2	850	783	120	10,0	24,0	557	83
3	840	783	119	9,1	18,5	610	75

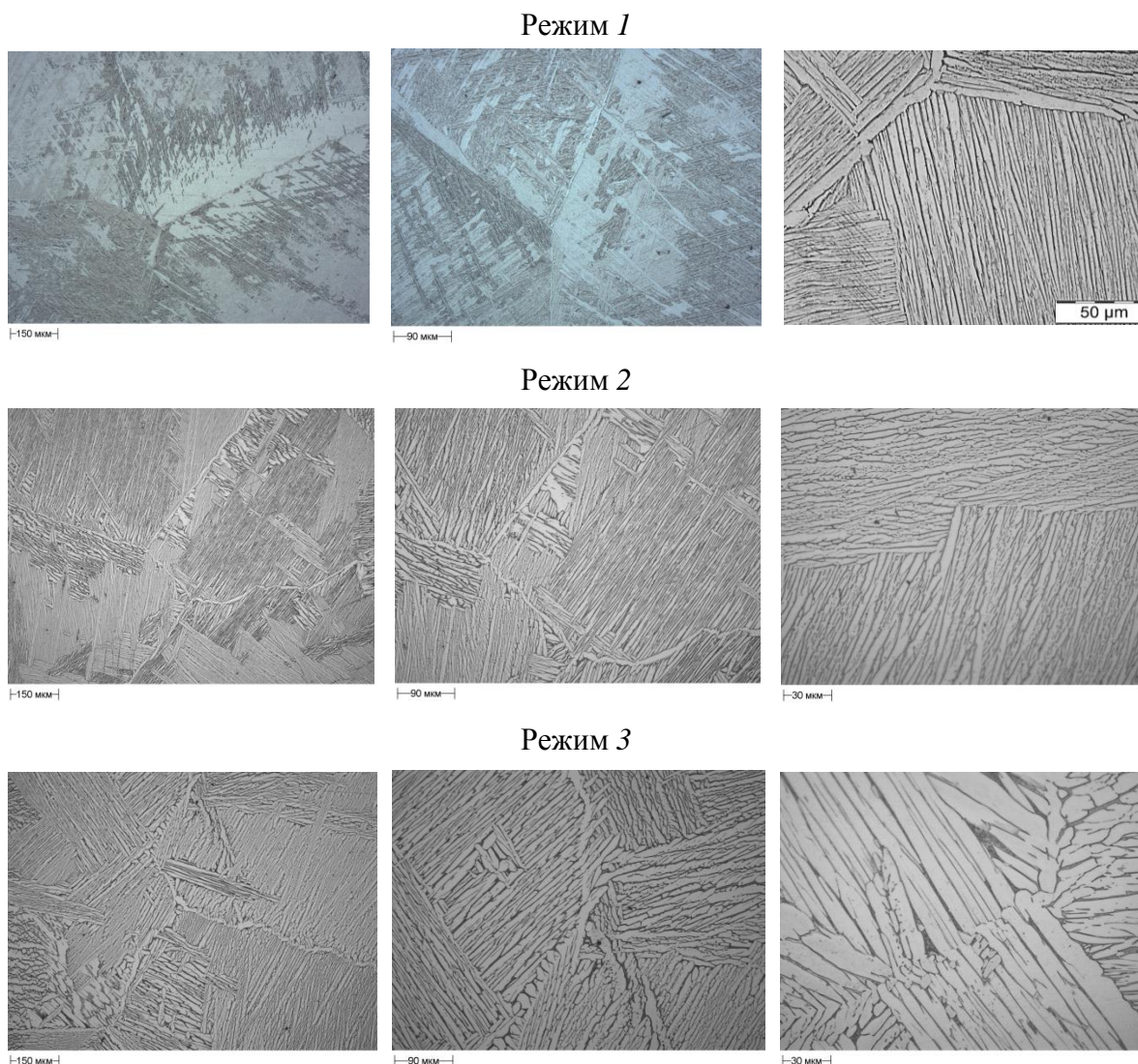


Рис. 1. Микроструктура образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после трех режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область (поперечное сечение)

Микроструктура исследованных образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч представлена крупными  $\beta$ -зернами и разориентированными колониями  $\alpha$ -пластин внутри них, отличающихся по размеру  $\alpha$ -пластин в зависимости от скорости охлаждения с температуры  $\beta$ -области (с увеличением скорости охлаждения размер уменьшается). С уменьшением размера  $\alpha$ -пластин (режим 1) увеличивается прочность при растяжении с сохранением уровня характеристик пластичности. При этом показатели вязкости разрушения после режима 1 значительно превышают значения, полученные после медленного охлаждения с температуры  $\beta$ -области. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наилучшие свойства штамповки обеспечиваются после режима с охлаждением на воздухе. Поэтому дальнейшие исследования проводили с охлаждением из  $\beta$ -области на воздухе.

В табл. 2 представлены результаты испытаний на определение свойств образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с различной температурой второй ступени. На рис. 2 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

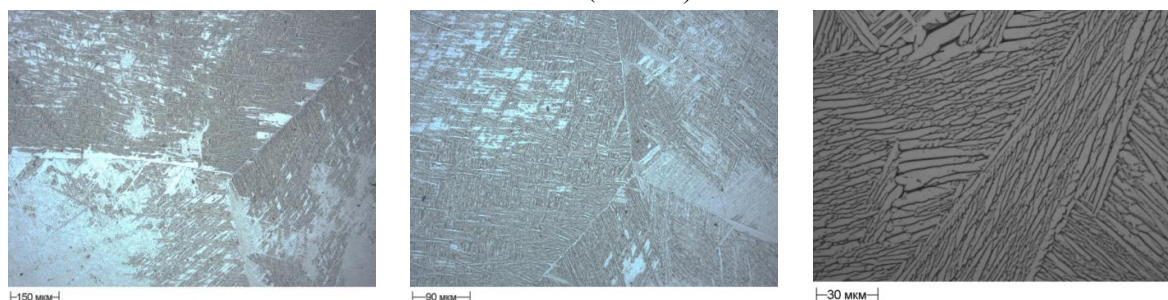
**Свойства образцов от штамповок из сплава ВТ6ч  
после режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область  
с различной температурой второй ступени (средние значения)**

Условный номер режима	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Модуль упругости, ГПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, кДж/м <sup>2</sup>	$K_{1c}$ , МПа $\sqrt{м}$
1	920	843	117	7,5	16,5	530	100
4	930	860	119	8,0	12,0	530	99
5	940	860	119	8,2	14,5	570	98
6	890	830	119	7,4	16,2	735	128

Режим 4 (700 °С)



Режим 5 (650 °С)



Режим 6 (600 °С)

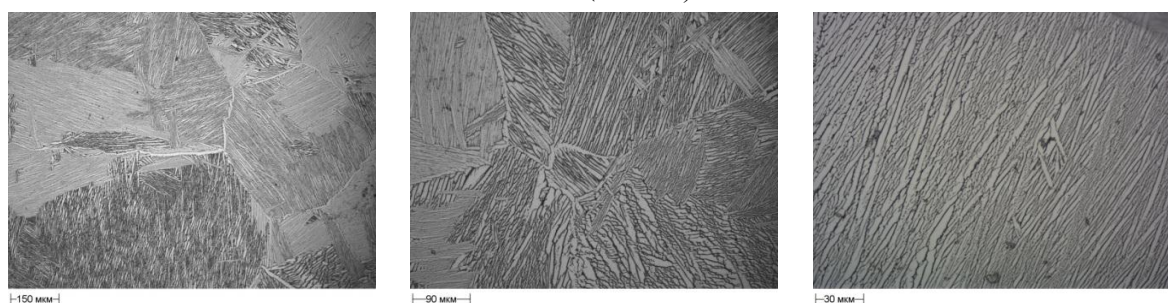


Рис. 2. Микроструктура образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область с различной температурой второй ступени (поперечное сечение)

Для наглядности в табл. 2 также представлены результаты испытаний после нагрева до 750 °С. Результаты испытаний показывают, что снижение температуры второй ступени термической обработки до 600 °С приводит к уменьшению прочности и значительному увеличению характеристик ударной вязкости и вязкости разрушения.

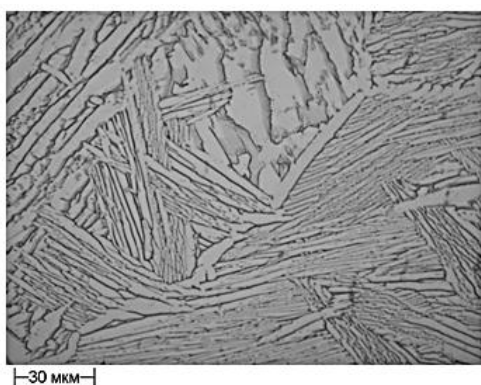
С увеличением температуры второй ступени увеличивается толщина  $\alpha$ -пластин и средний размер  $\beta$ -зерен. Ориентировка  $\alpha$ -пластин в зависимости от режима термической обработки не отличается.

В табл. 3 представлены результаты испытаний на определение свойств образцов от различных типов штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области. На рис. 3 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

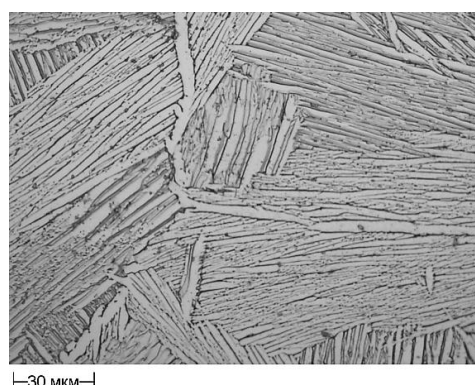
Таблица 3

**Свойства образцов от различных типов штамповок из сплава ВТ6ч после режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область (средние значения)**

Масса штамповки, кг, полученной по режиму 4	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$
180	896	795	9,6	18,3	617	118
355	853	793	11,5	21,0	655	130



Штамповка массой 180 кг



Штамповка массой 355 кг

Рис. 3. Микроструктура образцов от различных типов штамповок из сплава ВТ6ч после режимов термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область (поперечное сечение)

Полученные результаты исследований влияния скорости охлаждения с температур  $\beta$ -области подтверждают тот факт, что титановый сплав ВТ6ч крайне чувствителен к скоростям охлаждения с температур  $\beta$ -области аналогично сплаву ВТ6 [13–15]. Медленное охлаждение приводит к образованию более широких пластин  $\alpha$ -фазы, в результате чего уменьшаются значения вязкости разрушения и прочности. Таким образом, можно предположить, что для получения высоких значений вязкости разрушения при формировании  $\beta$ -структуры в процессе термической обработки необходимо формирование тонких пластин  $\alpha$ -фазы.

Исследование влияния температуры второй ступени термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области показало, что повышение температуры приводит к росту толщины пластин  $\alpha$ -фазы, за счет чего уменьшается вязкость разрушения. Аналогично стандартному режиму отжига, повышение температуры приводит к увеличению предела прочности. Следует отметить, что начиная с температуры 650 и до 750 °С разница в значениях предела прочности, пластичности, ударной вязкости и вязкости разрушения – незначительная.

Для исследования влияния массогабаритных параметров на формирование структуры и механические свойства штамповок после термической обработки с нагревом в  $\beta$ -область выбран режим 4, который обеспечил средние показатели по

всем исследуемым механическим свойствам. Следует отметить, что на штамповке массой 355 кг суммарная степень деформации была больше, за счет чего сформировалось более мелкое зерно в сравнении со штамповкой массой 180 кг. Результаты испытаний показали, что на крупногабаритной штамповке (массой 355 кг) получены более высокие значения вязкости разрушения, что может быть связано с размером зерна, который тем больше, чем меньше степень деформации. Разница в полученных значениях вязкости разрушения, прочности и пластичности, приведенных в табл. 2 и 3, также может быть связана с различной предшествующей деформацией.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что на показатели вязкости разрушения при процессе термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области влияет как размер  $\beta$ -зерна и  $\alpha$ -пластин, так и исходная структура полуфабриката из титанового сплава ВТ6ч.

Благодаря проведенным исследованиям, можно утверждать, что термическая обработка с нагревом при температуре  $\beta$ -области является применимой для полуфабрикатов из сплава ВТ6ч, где необходимо обеспечение высоких значений вязкости разрушения с сохранением прочностных характеристик. Для сравнения рассмотрим полученные значения со значениями штамповки, изготовленной по стандартной технологии: заключительная деформация в  $(\alpha + \beta)$ -области и последующий отжиг, а также со значениями для штамповки с заключительной деформацией в  $\beta$ -области и последующим отжигом в  $(\alpha + \beta)$ -области, при которой образуется структура, обеспечивающая высокие значения вязкости разрушения [2]. В табл. 4 представлены сравнительные результаты испытаний штамповок, полученных по различным технологическим режимам [2].

Таблица 4

**Механические свойства образцов от штамповок из сплава ВТ6ч (средние значения)**

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, кДж/м <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$
В $(\alpha + \beta)$ -области + отжиг в $(\alpha + \beta)$ -области	922	847	9,0	16,2	520	95
В $\beta$ -области + отжиг в $(\alpha + \beta)$ -области	941	901	8,3	19,2	520	120
В $(\alpha + \beta)$ -области + отжиг с нагревом в $\beta$ -область	853	793	11,5	21,0	655	130

Видно, что после термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области существенно снижаются значения прочности при растяжении. Однако высокие значения вязкости разрушения и ударной вязкости показывают преимущество применения данного метода.

Как упоминалось ранее в статьях [2, 6, 16–20], большой интерес представляют усталостные свойства, характеризующие способность материала полуфабрикатов сопротивляться усталостному разрушению. В табл. 5 и 6 представлены результаты испытаний на малоцикловую и многоцикловую усталость образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области. Результаты испытаний штамповки с заключительной деформацией в  $\beta$ -области для сравнения результатов взяты из статьи [2].

Полученные значения малоциклового усталости показывают, что после термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области материал более чувствителен к концентратору типа «Полоса с отверстием», чем типа «Проушина». Число циклов до разрушения незначительно меньше по сравнению с традиционной технологией изготовления штамповок. Значения предела выносливости находятся на одном уровне.

Таблица 5

**Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов от штамповок  
из сплава ВТ6ч (средние значения)**

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	Напряжение $\sigma_{\text{нетто}}$ , МПа	Число циклов до разрушения $N_{\text{разр}}$
Образцы типа «Полоса с отверстием» ( $K_t = 2,6$ )		
В $\beta$ -области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	274,4	174 030
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг с нагревом в $\beta$ -область		128 780
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области		215 530
Образцы типа «Проушина» ( $K_t = 3,2$ )		
В $\beta$ -области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	196	175 885
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг с нагревом в $\beta$ -область		155 650
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области		324 500

Таблица 6

**Средние значения предела выносливости образцов от штамповок из сплава ВТ6ч**

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	Предел выносливости на базе $N = 10^7$ циклов
На гладких образцах	
В $\beta$ -области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	470
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг с нагревом в $\beta$ -область	450
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	390
На образцах с надрезом (теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,33$ )	
В $\beta$ -области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	180
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг с нагревом в $\beta$ -область	160
В ( $\alpha + \beta$ )-области + отжиг в ( $\alpha + \beta$ )-области	180

### Заключения

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе термической обработки с нагревом при температуре  $\beta$ -области с целью обеспечения высоких значений вязкости разрушения необходима структура с первичными зёрнами  $\beta$ -фазы и тонкими пластинами  $\alpha$ -фазы в виде переплетающихся колоний. Полученные данные противоречат выводам, сделанным в работе [10], о том, что вязкость разрушения сплавов с пластинчатой структурой увеличивается с ростом диаметра первичных  $\beta$ -зёрен, толщины  $\alpha$ -пластин и размеров  $\alpha$ -колоний. Для титанового сплава ВТ6ч рост пластин  $\alpha$ -фазы и  $\beta$ -зёрен приводит к снижению вязкости разрушения. Однако в зависимости от требуемых механических свойств штамповки необходим тщательный подбор режима в зависимости от исходной структуры и степени деформации.

### Список источников

1. Арисланов А.А., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч. // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
2. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
3. 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.
4. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K., Motyka M. Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys // Titanium Alloys-Advances in Properties Control. London: InTech, 2013. P. 69–80.

5. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
6. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
7. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
8. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2003. No. 5. P. 419–427. DOI: 10.1002/adem.2003-06-26.
9. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
10. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
11. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // *Технология легких сплавов*. 1993. № 7–8. С. 47–54.
12. 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: 15.04.2024).
13. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Metallurgy, 1974. 368 с.
14. Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А., Ливанов В.А. Титановые сплавы. Metallography титановых сплавов. М.: Metallurgy. 1980. 464 с.
15. 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.
16. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава VT22M, изготовленных с заключительной деформацией в (α+β)- и β-областях // *Титан*. 2021. № 1 (70). С. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
17. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава VT6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://journal.viam.ru>. (дата обращения: 13.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
18. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Особенности структурно-фазового состава и механических свойств псевдо-β-титанового сплава VT47, легированного добавками кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 04. URL: <http://journal.viam.ru>. (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
19. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. С. 177.
20. Sauer C., Luetjering G. Thermo-mechanical processing of high strength-titanium alloys and effects on microstructure and properties // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. No. 117 (3). P. 311–317. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00788-9.

#### References

1. Arislanov A.A., Putyrskiy S.B., Yakovlev A.L., Gribkov M.S. Analysis of microstructure and mechanical properties of welded joint from VT6ch. alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
2. Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrsky S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of VT6ch titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
3. 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.
4. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K., Motyka M. Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys. *Titanium Alloys-Advances in Properties Control*. London: InTech, 2013, pp. 69–80.
5. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. et al. *Technology for the production of titanium aircraft structures*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1995, 448 p.

6. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia*: collection of scientific information materials. 3rd ed., revised and additional. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
7. Kablov E.N. What will the future be made of? New generation materials, technologies for their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
8. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2003, no. 5, pp. 419–427. DOI: 10.1002/adem.2003-06-26.
9. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a  $\alpha+\beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– $\beta$ -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
10. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: reference book. Moscow: VILS–MATI, 2009, 520 p.
11. Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation equipment and other industries. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7–8, pp. 47–54.
12. 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: April 15, 2024).
13. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
14. Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Livanov V.A. *Titanium alloys. Metallography of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.
15. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryayev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
16. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhnina V.A., Naprienko S.A. Study of resistance to fatigue fracture of forgings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the ( $\alpha+\beta$ )- and  $\beta$ -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
17. 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: March 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
18. Nochovnaya N.A., Shiryayev A.A. Features of the structural and phase composition, mechanical properties of metastable  $\beta$ -titanium alloy VT47 alloyed with silicon. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
19. Mylnikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I. *Cyclic strength and durability of structural materials*. N. Novgorod: NNGASU, 2018, p. 177.
20. Sauer C., Luetjering G. Thermo-mechanical processing of high strength-titanium alloys and effects on microstructure and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, no. 117 (3), pp. 311–317. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00788-9.

**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)

**Information about the authors**

**Victoria 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)

Статья поступила в редакцию 06.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.06.2024.  
The article was submitted 06.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.06.2024.