

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT47

А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, А.А. Ширяев¹, А.В. Володин², А.В. Братухин²

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

²Акционерное общество «Нормаль», Нижний Новгород, Россия; main@normalnn.ru

Аннотация. Представлены результаты комплекса исследований, включающего анализ микроструктуры, определение механических свойств при воздействии разрушающих нагрузок при разрыве и срезе, а также определение усталостных характеристик при комнатной температуре крепежных изделий из псевдо- β -титанового сплава VT47. Проведен сравнительный анализ полученных результатов исследований, раскрывающий зависимость механических свойств крепежных изделий от структуры. Показана актуальность применения псевдо- β -титанового сплава VT47 в качестве материала для крепежных деталей.

Ключевые слова: псевдо- β -титановые сплавы, крепежные изделия, болты, деформация, холодная высадка, механические свойства, микроструктура, термическая обработка

Для цитирования: Арисланов А.А., Путырский С.В., Ширяев А.А., Володин А.В., Братухин А.В. Исследование структуры и механических свойств крепежных изделий из высокопрочного псевдо- β -титанового сплава VT47 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FASTENERS MADE OF VT47 HIGH-STRENGTH METASTABLE β -TITANIUM ALLOY

A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹, A.A. Shiryayev¹, A.V. Volodin², A.V. Bratukhin²

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

²Joint Stock Company «Normal», Nizhny Novgorod, Russia; main@normalnn.ru

Abstract. The article presents the results of a complex of studies: analysis of the microstructure, determination of mechanical properties under the influence of breaking loads at break, shear, as well as determination of fatigue characteristics at room temperature of fasteners made of VT47 pseudo- β -titanium alloy. A comparative analysis of the obtained research results was carried out, showing the dependence of the mechanical properties of fasteners on the structure. The relevance of the use of VT47 pseudo- β -titanium alloy as material of fasteners is shown.

Keywords: metastable β -titanium alloys, fasteners, deformation, cold forging, mechanical properties, microstructure, heat treatment

For citation: Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Shiryayev A.A., Volodin A.V., Bratukhin A.V. Study of the structure and mechanical properties of fasteners made of VT47 high-strength metastable β -titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38.

Введение

Вследствие постоянного повышения требований к характеристикам современных изделий авиационной техники существенно возрастают и требования к уровню свойств материалов, используемых в качестве крепежных изделий для соединения элементов конструкций [1–6]. Увеличение объема применения композиционных материалов в конструкции планера самолета создает предпосылки к повышению использования крепежных изделий, изготовленных из титановых сплавов. Это связано с тем, что в контакте с углепластиком коррозия не развивается только на нержавеющей сталях и титановых сплавах [7]. При этом титановые сплавы имеют плотность меньше, чем у сталей, и при условии достижения равных значений прочностных характеристик их применение позволит повысить весовую эффективность конструкции. Сплав ($\alpha + \beta$)-класса ВТ16, традиционно используемый для изготовления таких деталей крепления, как болты, винты и др., имеет следующий уровень прочностных характеристик: предел прочности $\tau_{cp} \geq 700$ МПа и сопротивление срезу $\sigma_b \geq 1040$ МПа (термически упрочненное состояние). Повысить значения характеристик прочности крепежных изделий можно за счет применения титановых сплавов, химический состав которых позволяет обеспечить более высокий уровень механических свойств в термически упрочненном состоянии [8–14].

Однако следует отметить, что особенностью сплава ВТ16 является то, что его химический состав позволяет из отожженного прутка, имеющего предел прочности ~ 850 МПа, в холодном состоянии без промежуточных отжигов осуществлять высадку головки болта, редуцирование стержня, а также шлифование и накатывание резьбы. Такая технология производства деталей в 2–3 раза экономичнее классической технологии горячей высадки головки и редуцирования стержня болта. Применение псевдо- β -титановых сплавов позволит повысить прочность крепежных изделий и при этом иметь возможность их изготовления путем холодной высадки. Перспективность данного подхода подтверждается зарубежным опытом, где для изготовления крепежа используют псевдо- β -сплав Timetal 21S (Ti–3Al–15Mo–2,7Nb–0,25Si), обладающий характеристиками прочности следующего уровня: $\tau_{cp} \geq 800$ МПа и $\sigma_b \geq 1300$ МПа [4, 15–25].

Применение для изготовления крепежных изделий перспективного отечественного псевдо- β -титанового сплава ВТ47 (Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–Y), разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», содержащего в системе легирования редкоземельный элемент иттрий (Y), с высокой технологической пластичностью, необходимой для использования холодной высадки, способствует достижению требуемого уровня прочностных характеристик, что, в свою очередь, повышает весовую эффективность конструкции современных изделий авиационной техники [19–21, 26].

С целью обеспечения необходимого уровня свойств выбраны режимы термической обработки и схема изготовления крепежных изделий из псевдо- β -титанового сплава ВТ47, а также проведены их испытания и сравнительный анализ свойств с титановым сплавом ВТ16 – аналогом по применению.

Материалы и методы

Для изготовления крепежных изделий (болтов), в том числе типа Hi-Lok (соединения с тарированной затяжкой), и проведения исследований использованы прутки диаметром 6,5 и 10,5 мм производства АО «Чепецкий механический завод», г. Глазов (рис. 1). Прутки получены по разработанной технологии изготовления прутков из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 в соответствии с ТУ 430–2021. Данная технология обеспечивает получение прутков, которые в отожженном состоянии имеют значения пластических характеристик, обеспечивающие уровень технологической пластичности при деформации, достаточный для изготовления крепежных изделий холодной высадкой.



Рис. 1. Внешний вид прутков из псевдо- β -титанового сплава BT47 производства АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов)

Изготовленные прутки обладают следующим уровнем механических свойств:

для прутков диаметром 6,5 мм

– в отожженном состоянии относительное удлинение $\delta \geq 23 \%$, относительное сужение $\psi \geq 56 \%$, остаточная деформация при осадке $\geq 70 \%$;

– в термически упрочненном состоянии $\sigma_b \geq 1232$ МПа, $\tau_{cp} \geq 808$ МПа, $\delta \geq 9 \%$, $\psi \geq 26 \%$;

для прутков диаметром 10,5 мм

– в отожженном состоянии $\delta \geq 17 \%$, $\psi \geq 53 \%$, остаточная деформация при осадке $\geq 70 \%$;

– в термически упрочненном состоянии $\sigma_b \geq 1265$ МПа, $\tau_{cp} \geq 803$ МПа, $\delta \geq 9 \%$, $\psi \geq 28 \%$.

Изготовление болтов происходило в промышленных условиях АО «Нормаль» (г. Нижний Новгород) по следующей схеме:

- резка прутков на заготовки под высадку болта;
- нанесение на заготовку технологического покрытия (бор-фторидного). Данная операция включает предварительное травление, нанесение технологического покрытия и омыливание;
- холодная штамповка – основное формообразование болта (высадка головки болта, высадка стержневой части);
- механическая обработка (снятие фаски, проточка головки и т. д.);
- старение в вакуумной печи с целью обеспечения требуемых характеристик изделия;
- обкатка радиуса под головкой, накатка резьбы;
- прошивка шестигранника (для болтов типа Hi-Lok).

Изготовлены три типа болтов из сплава BT47, в том числе типа Hi-Lok (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид болтов из псевдо- β -титанового сплава BT47, изготовленных в промышленных условиях АО «Нормаль» с плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok M10 (а), с уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой M6 (б) и с потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok M6 (в)

Исследование микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Определение фазового состава проводили при помощи дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (Германия). Параметры съемки: $\text{Cu } K_\alpha$ -излучение; фокус трубки 0,5×3 мм; напряжение 40 кВ; ток в трубке 40 мА.

Испытания на растяжение (σ_b) образцов прутков из титанового сплава ВТ47 осуществляли при температуре 20 °С на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 по ГОСТ 1497–84, а испытания на срез ($\tau_{ср}$) – на испытательной машине Zwick/Roell Z 250 в соответствии с ОСТ 1 90148–74.

Испытания на разрыв и на срез болтов из титанового сплава ВТ47 проводили при температуре 20 °С на испытательной машине Zwick/Roell HA 250 по ОСТ 1 31101–80, на статическую чувствительность к надрезу – по ОСТ 1 90052–72, а на мало-, многоцикловую усталость и усталостную прочность – по ГОСТ 25.502–79.

Результаты и обсуждение

При проведении исследований выбран режим термической обработки (где $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения) прутков в камерной печи Nabertherm [27]: отжиг при температуре ($T_{п.п} - 30$) °С, выдержка, охлаждение на воздухе + старение, выдержка, охлаждение на воздухе.

Данный режим термической обработки выбран как обеспечивающий достижение наилучших значений механических свойств материала прутков. При этом в отожженном состоянии (состояние поставки прутков) сплав обладает высоким уровнем технологической пластичности.

Результаты исследований микроструктуры прутков из сплава ВТ47 в исходном состоянии и после упрочняющей термообработки по указанному режиму представлены на рис. 3.

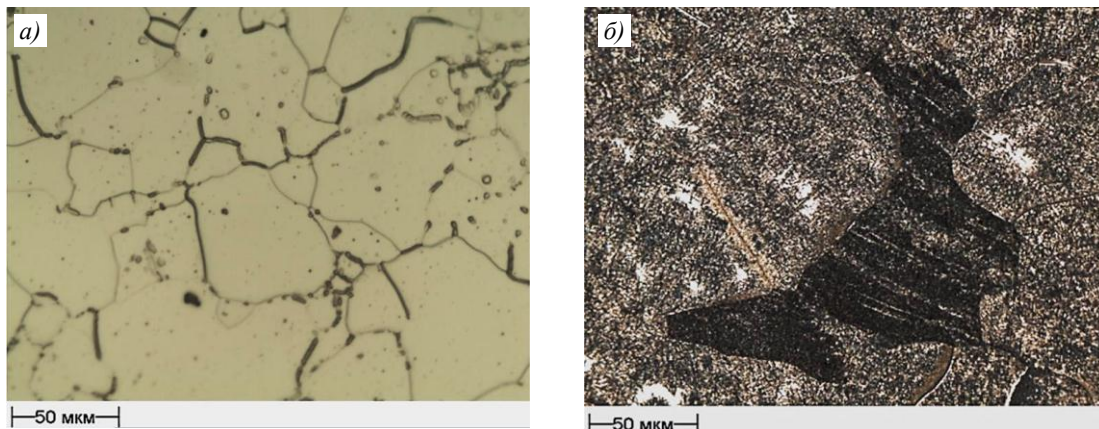


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) прутков из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 в исходном состоянии (а) и после упрочняющей термической обработки (б)

Микроструктура образцов в термоупрочненном состоянии представлена исходными β -зернами с мелкодисперсными выделениями частиц вторичной α -фазы высокой однородности внутри β -зерна, что обеспечивает повышенный уровень прочностных характеристик.

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении и сопротивлении срезу прутков из сплавов ВТ47 и ВТ16 после упрочняющей термообработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Механические свойства при растяжении и сопротивление срезу прутков
из сплавов ВТ47 и ВТ16 при температуре 20 °С**

Сплав	Режим термической обработки	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Сопротивление срезу $\tau_{ср}$, МПа
ВТ47	Отжиг из ($\alpha + \beta$)-области + старение	1310–1330	790–830
		1326	812
ВТ16	Закалка + старение	1030–1180	690–720

* В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Анализ представленных результатов показывает, что прутки из сплава ВТ47 после упрочняющей термической обработки имеют высокие показатели механических свойств и превосходят по ним прутки из сплава ВТ16.

Повышенные значения прочности при термической обработке с отжигом в высокотемпературной ($\alpha + \beta$)-области, по-видимому, обусловлено наличием после выдержки и охлаждения первичной α -фазы, а также сохранением дефектов кристаллического строения.

Исследование фазового состава образцов из прутков сплава ВТ47 проводили на дифрактометре фирмы Bruker. На рис. 4 представлена дифрактограмма образцов в закаленном (отжиг из ($\alpha + \beta$)-области) и термически упрочненном состояниях (отжиг из ($\alpha + \beta$)-области + старение).

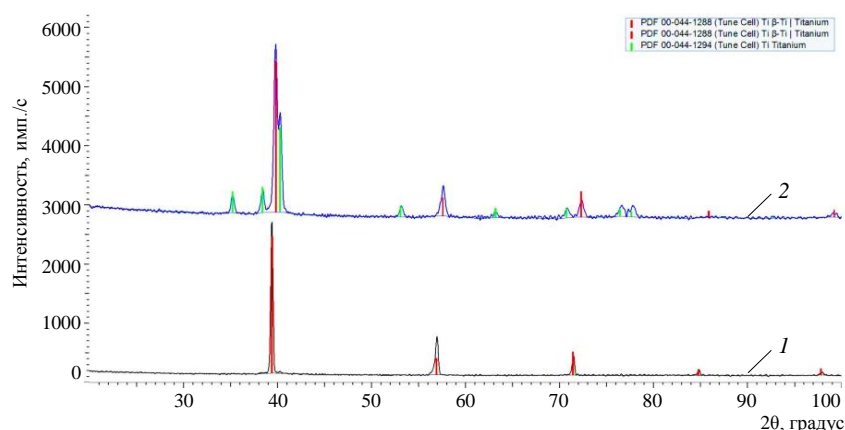


Рис. 4. Дифрактограмма материала образцов-свидетелей болта из псевдо- β -титанового сплава в исходном (1 – отжиг из ($\alpha + \beta$)-области) и термически упрочненном состояниях (2 – отжиг из ($\alpha + \beta$)-области + старение)

На дифрактограмме образца в исходном состоянии (отжиг) присутствует линия β -фазы [14], однако отсутствуют линии α -фазы, что характерно для псевдо- β -титановых сплавов в закаленном состоянии. Это свидетельствует о наличии незначительного количества α -фазы в образцах после закалки при температурах, приближенных к $T_{п.п.}$. На дифрактограмме образца в термически упрочненном состоянии (отжиг + старение) присутствуют линии α - и β -фаз, при этом линии дифрактограмм β -фазы образцов в исходном и термически упрочненном состояниях практически совпадают. Присутствие линий α -фазы свидетельствует о том, что в результате старения образуется типичная гетерофазная структура пластинчатого типа: происходит распад метастабильного пересыщенного твердого раствора β -фазы с выделением частиц вторичной α -фазы пластинчатой морфологии, что обеспечивает более высокий уровень прочностных характеристик. Кроме того, несмотря на малое количество первичной α -фазы, ее вклад в повышение

равномерности распада метастабильной β -фазы значителен, о чем можно судить по ранее проведенным исследованиям механических свойств.

Прутки из сплава ВТ47, предназначенные для изготовления крепежных изделий, поставлялись после отжига в высокотемпературной ($\alpha + \beta$)-области. Отличительной особенностью процесса упрочняющей термической обработки крепежных изделий, в сравнении с упрочняющей термической обработкой прутков, является проведение холодной деформации материала путем высадки, после которой осуществляется завершающая термическая обработка. Фактически реализуется схема низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО).

Результаты исследований микроструктуры болтов (центральная зона) из сплава ВТ47 представлены на рис. 5.

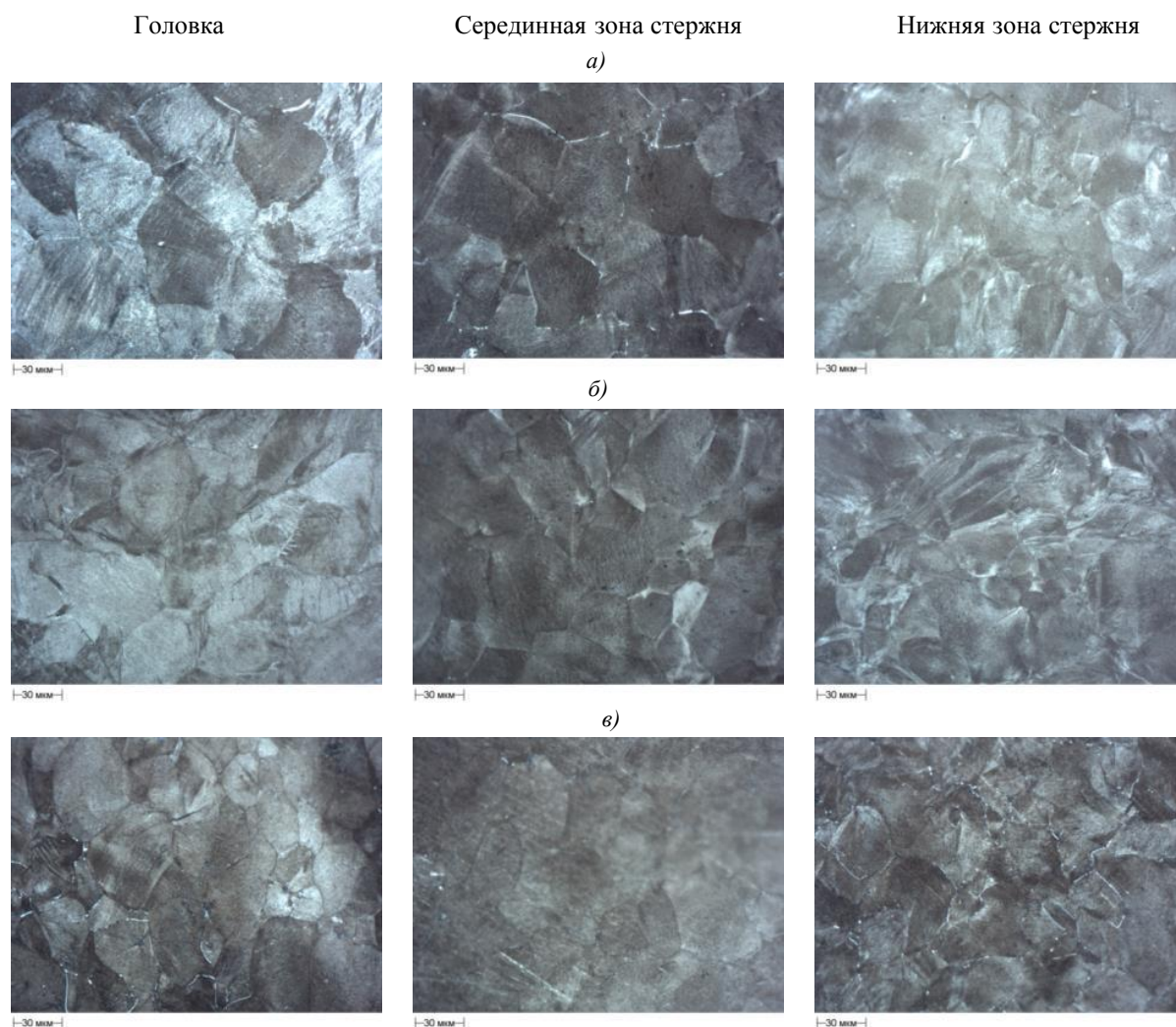


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) крепежных изделий (болтов) из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 в центральной зоне с уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой М6 (*a*), с потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok М6 (*б*) и с плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok М10 (*в*)

По результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

– микроструктура образцов болтов из сплава ВТ47 представлена исходными β -зернами с мелкодисперсными выделениями частиц вторичной α -фазы высокой однородности внутри β -зерна;

– микроструктура исследованных зон каждого из болтов идентична, размеры и фазовое строение зерен однородное, визуальных дефектов структуры не обнаружено.

В сравнении с микроструктурой прутков после упрочняющей термической обработки следует отметить, что частицы α -фазы внутри β -зерна более мелкопластинчатые, а также имеют преимущественно однонаправленную морфологию. Данная структура характерна для изделий, изготовленных с НТМО, и обеспечивает повышение уровня прочностных характеристик готовых крепежных изделий (болтов).

Пересыщенный β -твердый раствор сплава ВТ47 в состоянии после закалки является механически стабильным, поэтому при холодной деформации во время высадки не происходит выделения α -фазы. Однако возникающие в процессе холодной деформации дефекты кристаллического строения выступают в роли центров зарождения и роста частиц вторичной α -фазы при последующем старении, обеспечивают более однородную структуру болтов и ускоряют процесс распада метастабильной β -фазы. Это, в свою очередь, позволяет достичь стабильного высокого уровня механических свойств и характеристик надежности при повышенных разрушающих нагрузках, что подтверждают результаты проведенных исследований.

Для определения разрушающих нагрузок болтов проведены испытания на разрыв и на срез (в соответствии с ОСТ 1 31101–80), статическую чувствительность к надрезу (в соответствии с ОСТ 1 90052–72), мало- и многоцикловую усталость, а также усталостную долговечность (в соответствии с ГОСТ 25.502–79) на болтах (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Разрушающие нагрузки при разрыве и срезе, а также статическая чувствительность к надрезу болтов из псевдо- β -титанового сплава ВТ47*

Вид болта	Разрушающая нагрузка, Н, болтов из сплава				Статическая чувствительность к надрезу болта из сплава ВТ47, Н
	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16	
	при разрыве		при срезе		
С потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok М6	$\frac{14308-17640}{15307}$	–	$\frac{25744-25872}{25833}$	–	$\frac{64680-160720}{85750}$
С уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой М6	$\frac{28224-30380}{28910}$	$\frac{17456-19418}{18437}$	$\frac{25872-26166}{25989}$	$\frac{17604-19369}{18486}$	$\frac{96040-147000}{117200}$
С плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok М10	$\frac{82810-85940}{83104}$	–	$\frac{118580-123480}{120540}$	–	–

* В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Конструктивной особенностью крепежных изделий из титановых сплавов является то, что разрушение болтов обычно происходит в самом слабом месте – головке болта. Соответственно, болты с потайной головкой показывают меньшие значения разрушающих нагрузок при разрыве, в сравнении с болтами, имеющими более массивную классическую шестигранную или плоско-скругленную головку.

Результаты испытаний для определения разрушающих нагрузок показывают, что болты из сплава ВТ47 обладают высокими показателями механических свойств в сравнении с аналогичными изделиями из сплава ВТ16.

**Разрушающие нагрузки при мало- и многоциклового усталости,
а также усталостная долговечность болтов из псевдо- β -титанового сплава ВТ47**

Вид болта	Значения механических свойств, количество циклов					
	МЦУ		МнЦУ		усталостной долговечности	
	болтов из сплава					
	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16
С потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok M6	9442*	8510*	–	–	–	–
С уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой M6	42445**	37534**	83082***	75640***	–	–
С плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok M10	–	–	–	–	54622****	49610****

* При $P_{\min} = 1362$ МПа, $P_{\max} = 8173$ МПа, $\nu = 1$ Гц (где P_{\min} и P_{\max} – минимальная и максимальная растягивающая нагрузка цикла; ν – частота).
 ** При $P_{\min} = 1744$ МПа, $P_{\max} = 10476$ МПа, $\nu = 1$ Гц.
 *** При $P_{\min} = 4371$ МПа, $P_{\max} = 7860$ МПа, $\nu = 30$ Гц.
 **** При $P_{\min} = 2156$ МПа, $P_{\max} = 2151$ МПа, $\nu = 9$ Гц.

В целом применение НТМО на прутках из сплава ВТ47 в процессе изготовления крепежных изделий обеспечивает получение структуры материала с мелкопластинчатой α -фазой преимущественно однонаправленной морфологии, что, в свою очередь, обеспечивает достижение повышенного уровня механических свойств, таких как временное сопротивление и сопротивление срезу.

Заключения

Используемые прутки из псевдо- β -титанового сплава ВТ47, поставляемые в закаленном состоянии, обеспечивают достижение высокой степени деформации в холодном состоянии и позволяют реализовать возможность применения схемы, предусматривающей холодную высадку материала при изготовлении крепежных изделий (болтов).

В процессе старения прутков из данного сплава происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением частиц вторичной α -фазы, что подтверждается результатами проведенного качественного рентгеноструктурного анализа (рис. 2). Уровень прочности материала при растяжении, в первую очередь, определяется полнотой протекания процесса распада метастабильной β -фазы и равномерностью получаемого структурно-фазового состояния, что обусловлено реализацией доминирующего дисперсионного механизма упрочнения образцов из сплава ВТ47.

Помимо положительного влияния первичной α -фазы на распад метастабильной β -фазы в процессе старения следует отметить и благотворное влияние на свойства дефектов кристаллического строения и размера зерен β -фазы, наследуемых после холодной деформации при изготовлении прутков.

При учете влияния дефектов строения материала на процессы распада и значений механических свойств становится очевидно, что повышение прочности материала из сплава ВТ47 происходит за счет проведения операций холодной высадки, которая ограниченно применяется для высокопрочных ($\alpha + \beta$)-сплавов вследствие их невысокой

технологической пластичности при комнатной температуре. Однако повышенная технологическая пластичность закаленных псевдо- β -сплавов открывает широкие возможности для реализации данного метода, что подтверждается достижением высокого уровня механических и эксплуатационных свойств.

В результате проведенных исследований установлено, что применение операции холодной высадки на прутках из титанового сплава ВТ47 в процессе изготовления крепежных изделий обеспечивает получение структуры материала с мелкопластинчатой α -фазой преимущественно однонаправленной морфологии, что способствует реализации комплекса высоких механических свойств, таких как временное сопротивление и сопротивление срезу. Применение сплава ВТ47 для изготовления крепежных изделий (болтов) обеспечивает повышение их предела прочности более чем на 200 МПа в сравнении с применяемым в настоящее время для аналогичных целей сплавом ВТ16 с уровнем предела прочности ≥ 1040 МПа в термически упрочненном состоянии.

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний и анализ полученных данных показали следующее: крепежные изделия (болты), изготовленные из титанового сплава ВТ47, выдерживают при разрыве и срезе более высокие нагрузки – до ~ 40 и ~ 50 % соответственно (по сравнению с аналогичными деформационно-упрочненными изделиями из титанового сплава ВТ16), а также до ~ 20 % при разрыве и срезе по сравнению с аналогичными термоупрочненными изделиями из титанового сплава ВТ16). Это объясняется более высоким уровнем прочности сплава ВТ47 после окончательной термической обработки по сравнению со сплавом ВТ16.

Добиться дополнительного повышения уровня разрушающих нагрузок крепежных изделий (болтов) возможно за счет оптимизации процесса их производства, направленной на повышение механических характеристик в самом слабом месте изделия – зоне головки крепежных изделий (болтов).

Возможность достижения высоких значений прочностных характеристик в совокупности с высокой технологической пластичностью делает актуальным применение псевдо- β -сплава ВТ47 в качестве материала крепежных деталей.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // *Металлы Евразии*. 2017. № 3. С. 2–6.
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., 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.
4. Власов А.П. Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
5. Володин В.А. Крепежные системы для высоконагруженных авиационных конструкций. Опыт и перспективы применения в гражданских самолетах // *Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение*. М: НИЦ АСК, 2015. С. 125–128.
6. Володин В.А., Братухин В.А. Технологические особенности изготовления крепежных систем для соединения композиционных материалов // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2017. № 2 (117). С. 113–117.
7. 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.
8. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.

9. Ночовная Н.А. Исследование влияния параметров изотермической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства штамповки из сплава ВТ6ч. // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-3-3.
10. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.
11. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
12. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
13. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 12. С. 11–14.
14. Колачев Б.А., Садков В.В., Талалаев В.Д. Вакуумный отжиг титановых конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
15. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2003. 513 p.
16. Whittaker J.T. Ductility and Use of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners: Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. University of South Florida, 2015. 91 p.
17. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
18. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 148 с.
19. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry // Journal of Materials Engineering and Performance. 2005. Vol. 14 (6). P. 681–685.
20. Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
21. Панин П.В., Лукина Е.А., Алексеев Е.Б. Влияние легирования водородом на структуру и фазовый состав листовых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-49-57.
22. Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Влияние легирования водородом на технологическую пластичность и текстуру листовых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68.
23. Santhosh R., Geetha M., NageswaraRao M. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017. Vol. 70 (7). P. 1681–1688.
24. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners // Titanium-92 Science and Technology: Proceedings of the 7th World Conference on Titanium. Denver: Minerals, Metals & Materials Society, 1993. P. 2899–2906.
25. Золоторевский В.С. Механические свойства материалов: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
26. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical. 2014. Report No. 106. P. 22–27.
27. Дуюнова В.А., Путырский С.В., Арисланов А.А., Крохина В.А., Ширяев А.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства прутков из сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.

References

1. Kablov E.N. Dominant of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metally Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
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., 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– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
4. Vlasov A.P. *Progressive fasteners*. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 256 p.
5. Volodin V.A. Fastening systems for highly loaded aircraft structures. Experience and prospects for use in civil aircraft. *CALS International Encyclopedia. Aerospace engineering*. Moscow: NITs ASK, 2015, pp. 125–128.
6. Volodin V.A., Bratukhin V.A. Technological features of the manufacture of fastening systems for joining composite materials. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva*, 2017, no. 2 (117), pp. 113–117.
7. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev 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.
8. Lyasotskaya V.S. *Heat treatment of welded joints of titanium alloys*. Moscow: Ecomet, 2003. 352 p.
9. Nochovnaya N.A. Research of the influence of parameters of isothermal deformation and heat treatment on structure and mechanical properties punchings from alloy VT6ch. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 03, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-10-3-3.
10. Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation technology and other industries. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7–8, pp. 47–54.
11. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
12. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: reference. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
13. Moiseev V.N. Beta-titanium alloys and prospects for their development. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
14. Kolachev B.A., Sadkov V.V., Talalaev V.D. *Vacuum annealing of titanium structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 224 p.
15. Leyens C., Peters M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2003, 513 p.
16. Whittaker J.T. *Ductility and Use of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners*: Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. University of South Florida, 2015, 91 p.
17. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Threaded and flange connections*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 368 p.
18. Kolganov I.M., Dubrovsky P.V., Arkhipov A.N. *Manufacturability of aircraft structures, ways to improve*. Part 1: textbook. Ulyanovsk: UIGTU, 2003, 148 p.
19. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, vol. 14 (6), pp. 681–685.
20. Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM's contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
21. Panin P.V., Lukina E.A., Alekseev E.B. Effect of hydrogen doping on structure and phase composition of sheet semi-products of VT23 titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-49-57.
22. Panin P.V., Dzunovich D.A., Lukina E.A. Effect of hydrogen doping on processing ductility and texture of sheet semi-products of VT23 titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68.

23. Santhosh R., Geetha M., NageswaraRao M. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, vol. 70 (7), pp. 1681–1688.
24. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners. *Titanium-92 Science and Technology: Proceedings of the 7th World Conference on Titanium*. Denver: Minerals, Metals & Materials Society, 1993, pp. 2899–2906.
25. Zolotarevsky V.S. *Mechanical properties of materials: a textbook for universities*. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p.
26. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical*, 2014, report no. 106, pp. 22–27.
27. Duyunova V.A., Putyrskiy S.V., Arislanov A.A., Krokhhina V.A., Shiryaev A.A. Analysis of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of bars made of VT47 titanium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.

Информация об авторах

Арисланов Аскаджон Абдурасулович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

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

Володин Анатолий Вячеславович, генеральный директор, АО «Нормаль»; main@normalnn.ru

Братухин Анатолий Владиславович, главный конструктор, к.т.н., АО «Нормаль»; main@normalnn.ru

Information about the authors

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

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

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

Anatoly V. Volodin, Director General, JSC «Normal», main@normalnn.ru

Anatoly V. Bratukhin, Chief Designer, Candidate of Sciences (Tech.), JSC «Normal», main@normalnn.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.03.2022.

The article was submitted 28.02.2021; approved and accepted for publication after reviewing 09.03.2022.