

УДК 669.07:669.295

В.А. Дуюнова¹, С.В. Путырский¹, А.А. Арисланов¹, В.А. Крохина¹, А.А. Ширяев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВА VT47

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34

Представлены результаты проведенного комплекса исследований по анализу микроструктуры, а также определения механических свойств при растяжении, сопротивлении срезу и осадке при комнатной температуре катаных прутков из псевдо- β -титанового сплава VT47. Проведен сравнительный анализ полученных результатов исследований, показывающий зависимость механических свойств катаных прутков от различных режимов термической обработки, направленных на обеспечение повышенной технологической пластичности материала и упрочняющей термической обработки.

Ключевые слова: титановые сплавы, прутки, деформация, прокатка, механические свойства, микроструктура, термическая обработка.

V.A. Duyunova¹, S.V. Putyrskiy¹, A.A. Arislanov¹, V.A. Krokhhina¹, A.A. Shiryayev¹

ANALYSIS OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF BARS MADE OF VT47 TITANIUM ALLOY

The article presents the results of a complex of studies on the analysis of the microstructure, as well as the determination of the mechanical properties under tension, shear resistance and upsetting at room temperature of rolled bars made of pseudo- β -titanium alloy VT47. A comparative analysis of the obtained research results is carried out, showing the dependence of the mechanical properties of rolled bars on various heat treatment modes, aimed at providing increased technological plasticity of the material and strengthening heat treatment.

Keywords: titanium alloys, bars, deformation, rolling, mechanical properties, microstructure, heat treatment.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Вследствие повышения требований к характеристикам современных летательных аппаратов существенно увеличиваются и требования к уровню свойств материалов, используемых в качестве соединительных элементов конструкций [1–3].

В промышленности используются крепежные изделия с пределом прочности при растяжении (σ_B) от 300 до 2100 МПа. По международной классификации к высокопрочным относят болты с $\sigma_B \geq 800$ МПа [4–6].

Одна из основных тенденций в области изготовления крепежных изделий – изготовление более мелких крепежных деталей. Миниатюрные типы крепежных изделий совершенствуют для применения в конструкциях, ограниченных по габаритным параметрам и встречающихся в различных отраслях промышленности, в том числе и аэрокосмической. По мере того, как крепежные изделия становятся меньше, появляются инновационные системы автоматизации, облегчающие обработку и установку крепежных

изделий. Как в России, так и за рубежом наиболее распространенным методом изготовления крепежных изделий типа болт является холодная высадка головки и нанесение (накатывание) резьбы на болты с максимальным диаметром до 25,4 мм (1 дюйм). Холодная высадка имеет дополнительное преимущество, заключающееся в увеличении прочности резьбы болтов благодаря высоким поверхностным сжимающим напряжениям, аналогичным эффектам дробеструйной обработки. Этот процесс делает резьбу более устойчивой к усталостному растрескиванию [6–12].

В процессе изготовления болта конечную прочность определяет прочность исходного материала и его упрочнение. В настоящее время одним из основных сплавов для получения крупногабаритных деталей крепления остается сплав ВТ6 и зарубежный сплав-аналог Grade 5 (Ti–6Al–4V). Данные сплавы обеспечивают достижение предела прочности $\sigma_b \leq 950$ МПа [9–11].

В отечественном авиастроении для изготовления крепежных деталей также применяют сплавы ВТ3-1, ВТ16 и ВТ22, которые относятся к ($\alpha+\beta$)-классу за исключением сплава ВТ22 (переходного или псевдо- β -класса) [11]. Однако для изготовления крепежа из данных сплавов требуется применение горячей деформации и/или механической обработки. Сплавы ВТ3-1 и ВТ22 применяются в основном для изготовления относительно крупногабаритных деталей крепления. Для крепежных и других резьбовых деталей диаметром не более 40 мм, работающих при температурах до 300 °С, наиболее удачным сочетанием механических и технологических свойств обладает сплав ВТ16 [6]. Благодаря высокой технологической пластичности в холодном состоянии сплава ВТ16 в процессе холодного деформирования готовый болт приобретает гарантированный предел прочности $\sigma_b \geq 1040$ МПа и сопротивление срезу $\tau_{ср} \geq 700$ МПа.

Перспективным подходом к повышению прочностных характеристик крепежных изделий является применение при изготовлении псевдо- β -титановых сплавов, которые в настоящее время обеспечивают достижение наиболее высоких значений прочности ($\sigma_b \geq 1200$ МПа) в сочетании с высокими значениями характеристик пластичности. Такие значения пластических характеристик, особенно в закаленном состоянии, также позволяют применить для данных сплавов холодную высадку.

В настоящее время за рубежом для изготовления крепежных деталей находят применение сплавы марок 1-8-5 (Ti–1Al–8V–5Fe), Beta C (Ti–3Al–8V–6Cr–4Mo–4Zr), Timetal 21S (Ti–3Al–15Mo–2,7Nb–0,25Si) и Timetal 125 (Ti–6V–6Mo–6Fe–3Al) [9, 12]; из них:

– псевдо- β -сплав Timetal 21S обеспечивает высокую удельную прочность и хорошую холодную формуемость, широко применяется в авиационной промышленности при изготовлении высокопрочного крепежа, обеспечивающего уровень свойств $\tau_{ср} \geq 800$ МПа, $\sigma_b \geq 1300$ МПа;

– псевдо- β -сплав Timetal 125 специально разработан для изготовления высокопрочного крепежа и обеспечивает высокий уровень прочности – $\sigma_b \geq 1300$ МПа при удлинении $\delta \leq 6$ %, однако высокое содержание железа в сплаве может приводить к снижению термической стабильности под напряжением при повышенных температурах эксплуатации и, соответственно, ресурса работы крепежных изделий.

Для изготовления мелких крепежных деталей с применением холодной высадки необходимы прутки малого диаметра (до 10,5 мм), соответствующие высоким требованиям к геометрическим параметрам. Современные технологии изготовления прутковых заготовок из титанового сплава ВТ16, предназначенных для изготовления деталей крепления методом холодной высадки, позволяют получить катаные прутки мелкого сорта диаметром вплоть до 4 мм. Общая схема изготовления прутков из титанового сплава ВТ16 мелкого сорта следующая: изготовление слитков, деформационная

обработка, прокатка прутков, травление, вакуумный отжиг, прокатка в роликовой кассете, мойка, вакуумный отжиг, обточка, ультразвуковой контроль.

Применение псевдо- β -титанового сплава при изготовлении прутковых заготовок для крепежных изделий позволит повысить уровень механических свойств крепежных деталей вплоть до уровня зарубежных сплавов, таких как Timetal 21S [6, 11].

В целом для псевдо- β -титановых сплавов можно выделить важное с практической точки зрения преимущество – это возможность эффективно управлять комплексом их свойств в широких пределах посредством термической обработки. При этом существует возможность варьировать уровнем не только прочностных характеристик ($\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$), но и модуля упругости (E) в широком интервале значений. Для большинства псевдо- β -титановых сплавов в закаленном состоянии модуль упругости составляет ~ 83 ГПа, а после старения его значения возрастают до $\sim (103–110)$ ГПа [13–16].

Одним из наиболее эффективных способов повышения прочностных свойств сплавов с метастабильной β -структурой является низкотемпературная механическая обработка (НТМО), включающая закалку, холодную деформацию и старение. При термомеханической обработке псевдо- β -титановых сплавов возможно достижение высокого уровня прочностных и упругих характеристик. Кроме того, псевдо- β -титановые сплавы обладают высокой пластичностью при деформации при комнатной температуре: образующаяся после закалки объемноцентрированная кубическая решетка β -фазы имеет существенно больше систем скольжения, чем гексагональная плотноупакованная решетка α -фазы в α - или $(\alpha+\beta)$ -сплавах [17–19].

Перспективным отечественным сплавом псевдо- β -класса является разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ сплав ВТ47 системы Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–Y, содержащий в составе редкоземельный элемент – иттрий (Y). Сплав обеспечивает высокий уровень технологической пластичности в закаленном состоянии и прочностных характеристик после проведения упрочняющей термической обработки ($\sigma_{в} = 1210–1270$ МПа при $\delta_5 = 12,0–15,5$ %) [19–22].

Применение прутков из сплава ВТ47 для изготовления крепежных изделий методом холодной высадки требует решения следующих задач при выборе режимов термической обработки:

- выбор режима технологической термической обработки, обеспечивающей повышенную технологическую пластичность материала, а именно температур нагрева при отжиге/закалке заготовок; в этом состоянии будет осуществляться холодная высадка;
- выбор схемы и режимов упрочняющей термической обработки, обеспечивающей механические свойства конечного изделия.

В этой связи в данной работе проведены исследования влияния различных режимов термической обработки на структуру и механические свойства прутков из сплава ВТ47.

Материалы и методы

Традиционная технология изготовления полуфабрикатов из титановых сплавов предусматривает проведение операций деформации с чередованием нагревов в β - и $(\alpha + \beta)$ -областях. Такой подход обеспечивает мелкозернистую структуру преимущественно глобулярной морфологии. Однако, как известно, псевдо- β -титановый сплав ВТ47 имеет довольно низкую температуру полиморфного превращения в сравнении с $(\alpha + \beta)$ -сплавами. Вследствие этого при проведении горячей деформации псевдо- β -титановых сплавов при температурах $(\alpha + \beta)$ -области существует риск недостаточной степени деформирования и проработки структуры заготовок. Поэтому для данного класса сплавов получило распространение проведение горячей деформации в β -области

с постепенным снижением температуры. Более того, такая схема менее энергозатратна за счет применения меньших нагрузок для обеспечения качественной проработки структуры заготовок. Проведение заключительной деформации при температурах $(\alpha + \beta)$ -области является нецелесообразным вследствие выполнения последующей термической обработки с нагревом под закалку в β -область, что приводит к структурным изменениям, заключающимся в протекании процессов рекристаллизации и роста первичного β -зерна.

Для проведения исследований осуществлена выплавка слитков (рис. 1, а) из сплава ВТ47 массой ~30 кг в вакуумно-дуговой печи VAR-L200. Путем ковки на изотермическом прессе изготавливали заготовки, из которых получали катаные прутки (рис. 1, б). Все деформационные операции осуществляли при температуре β -области.

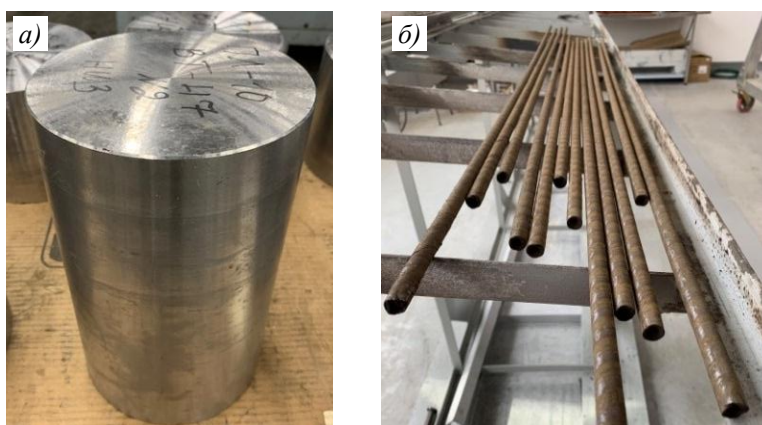


Рис. 1. Внешний вид слитка (а) и катаного прутка (б) из сплава ВТ47

Традиционный подход к термической обработке предусматривает проведение закалки с температуры β -области. Однако, согласно ряду исследований [13, 17, 21], существует возможность регулировать свойства материала в термоупрочненном состоянии путем выбора температуры закалки в $(\alpha + \beta)$ -области. В этом случае присутствие первичной α -фазы должно оказать положительное влияние на процесс распада β -фазы при старении.

При этом при применении заготовок из сплава ВТ47 для изготовления крепежных изделий проведение закалки с температур $(\alpha + \beta)$ -области должно обеспечивать необходимую технологическую пластичность для проведения холодной высадки.

Другим возможным вариантом повышения стабильности достижения высоких значений механических свойств является применение схемы НТМО, включающей следующие операции: закалка \rightarrow холодная деформация \rightarrow старение. В этом случае интенсифицируется распад пересыщенного β -твердого раствора за счет образования частиц α -фазы на дефектах кристаллического строения, образованных при холодной деформации.

Для высокопрочных титановых сплавов применяется схема высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), при которой старение проводится после охлаждения с температуры деформации без промежуточной закалки. Из-за того, что сплав ВТ47 является самозакаливающимся и с учетом малых сечений прутковых заготовок после охлаждения с температур деформации происходит преимущественная фиксация β -структуры. При этом в материале сохраняются дефекты кристаллического строения, полученные при деформации, и мелкозернистая структура. Эффект их влияния возможно ликвидировать с помощью рекристаллизационных процессов при нагреве и выдержке под закалку.

В результате анализа выбраны режимы и проведена термическая обработка (где $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения) катаных прутковых заготовок в камерной лабораторной печи Nobertherm по следующим режимам:

- 1 – закалка при температуре ($T_{п.п} - 30$) °С, выдержка и охлаждение на воздухе;
- 2 – закалка при температуре ($T_{п.п} + 30$) °С, выдержка и охлаждение на воздухе;
- 3 – закалка при температуре ($T_{п.п} - 30$) °С, выдержка, охлаждение на воздухе + старение, выдержка и охлаждение на воздухе;
- 4 – закалка при температуре ($T_{п.п} + 30$) °С, выдержка и охлаждение на воздухе + старение, выдержка и охлаждение на воздухе;
- 5 – закалка при температуре ($T_{п.п} + 40$) °С, выдержка и охлаждение на воздухе → холодная осадка → старение и охлаждение на воздухе (НТМО);
- 6 – горячая прокатка → старение и охлаждение на воздухе (ВТМО).

Проведение термической обработки по режимам 1 и 2 должно обеспечить необходимую для дальнейшей холодной высадки технологическую пластичность сплава.

Подбор режимов упрочняющей термической обработки по традиционной схеме (закалка с последующим старением) и термомеханической обработки позволяет провести исследования и оценить возможности достижения наилучшего сочетания комплекса механических свойств итогового изделия.

Исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе. Испытания на растяжение при температуре 20 °С образцов из титанового сплава ВТ47 проводили по ГОСТ 1497–84 на испытательной машине.

Испытания по определению механических свойств при сопротивлении срезу ($\tau_{ср}$) при температуре 20 °С проводили в соответствии с ОСТ1 90148–74 на испытательной машине.

Результаты

Результаты исследований микроструктуры прутковых заготовок из сплава ВТ47 после термообработки, НТМО и ВТМО по вышеуказанным режимам представлены на рис. 2.

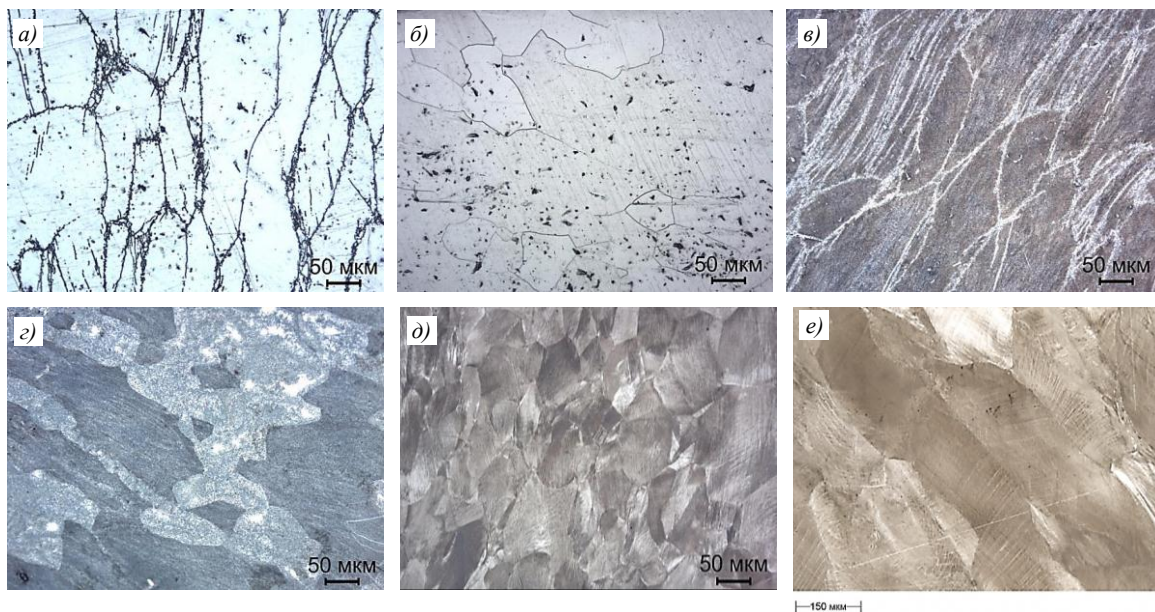


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) прутковых заготовок из сплава ВТ47, полученных по режимам 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и после низко- (д) и высокотемпературных (е) термомеханических обработок

Микроструктура образцов в закаленном состоянии (режимы 1 и 2) представлена первичными β -зернами. После термической обработки по режиму 1 также наблюдаются частицы α -фазы в виде так называемой «оторочки» по границам β -зерен, а также скопления частиц α -фазы на тройных стыках первичных β -зерен и в местах исходного скопления дефектов кристаллического строения, образовавшихся в результате деформации.

Микроструктура образцов в термоупрочненном состоянии (режимы 3 и 4) представлена исходными β -зернами с мелкодисперсными выделениями частиц α -фазы высокой однородности внутри β -зерна, что обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик. Для термической обработки по режиму 3 характерно существенное снижение плотности выделений вторичной α -фазы непосредственно вблизи границ β -зерна и «оторочек» α -фазы, образовавшейся после закалки из $(\alpha + \beta)$ -области. Необходимо также отметить, что после термической обработки по режиму, предусматривающему закалку из β -области и старение (режим 4), внутри некоторых β -зерен наблюдаются зоны, свободные от выделений частиц α -фазы, и зерна с пониженной плотностью выделений α -фазы, что может стать причиной большего разброса значений пластических характеристик при кратковременном растяжении, нестабильности результатов усталостных испытаний, а также испытаний на определение характеристик трещиностойкости.

Микроструктура образцов в результате применения режимов 5 (НТМО) и 6 (ВТМО) представлена β -зернами с мелкопластинчатыми выделениями α -фазы, имеющими преимущественно однонаправленное строение внутри β -зерен. Местами наблюдается незначительная неоднородность плотности и объема выделений частиц вторичной α -фазы в различных β -зернах. Тонкая структура сплава после примененных режимов термомеханической обработки и особенности морфологии частиц вторичной α -фазы ввиду их очень малого размера с трудом определяются методами оптической микроскопии.

После термической обработки, обеспечивающей повышение технологической пластичности материала, проведены испытания на осадку при температуре 20 °С (в соответствии с ГОСТ 8817–82) образцов, вырезанных от прутковых заготовок из сплава ВТ47 (табл. 1).

Таблица 1

Осадка прутковых заготовок из сплава ВТ47 при температуре 20 °С

Условный номер режима	Среднее значение деформации, %	Состояние поверхности образца
1 (закалка из $(\alpha + \beta)$ -области)	74,03	На боковой поверхности образца отсутствуют трещины, закаты и надрывы
2 (закалка из β -области)	75,25	

Результаты испытаний на осадку показывают, что подобранные режимы обеспечивают достижение деформации при комнатной температуре >73 % при отсутствии поверхностных дефектов (трещин, закатов, надрывов), что свидетельствует о высокой технологической пластичности сплава, достигнутой в результате примененных режимов термической обработки.

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении катаных прутковых заготовок из сплава ВТ47 после термической обработки, НТМО и ВТМО по представленным режимам приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Механические свойства при растяжении прутковых заготовок из сплава ВТ47
при температуре 20 °С после термической обработки,
обеспечивающей технологическую пластичность (средние значения)**

Условный номер режима	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1 (закалка из $(\alpha + \beta)$ -области)	85,8	788	794	21,3	49,2
2 (закалка из β -области)	85,4	798	804	21,3	49,6

Таблица 3

**Механические свойства при растяжении прутковых заготовок из сплава ВТ47
при температуре 20 °С после упрочняющей термической
и термомеханической обработок (средние значения)**

Условный номер режима	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
3 (закалка из $(\alpha + \beta)$ -области + старение)	109,4	1266	1326	11,0	12,1
4 (закалка из β -области + старение)	110,4	1172	1240	11,6	31,4
5 (НТМО)	113,5	1352	1417	4,3	9,6
6 (ВТМО)	108,0	1262	1330	8,6	13,0

Полученные результаты механических свойств показывают, что после термической обработки, обеспечивающей повышение деформационной способности материала, достигаются высокие значения характеристик пластичности; после упрочняющей термической обработки также получены высокие значения характеристик прочности в совокупности с характеристиками пластичности. После термомеханической обработки значения пластичности уступают значениям, полученным после упрочняющей термообработки.

Сопротивление срезу (τ_{cp}) является одной из основных характеристик готовой детали, поэтому после проведения режима 2 и ВТМО проведены испытания на двойной срез при температуре 20 °С катаных прутков из сплава ВТ47 (табл. 4).

Таблица 4

**Сопротивление срезу (τ_{cp}) прутковых заготовок
из сплава ВТ47 при температуре 20 °С (средние значения)**

Условный номер режима	τ_{cp} , МПа
3 (закалка из $(\alpha + \beta)$ -области + старение)	812
4 (закалка из β -области + старение)	777
6 (ВТМО)	805

Результаты испытаний на растяжение и сопротивление срезу показывают, что высокими показателями механических свойств обладают прутки из сплава ВТ47 после термической обработки по режимам 3 и 4. Свойства прутков после режима 6 (ВТМО) находятся на одном уровне со свойствами после режимов 3 и 4. Необходимо отметить положительное действие НТМО на механические свойства сплава. Наилучший комплекс свойств сплав приобретает после режима 3 – закалка из $(\alpha + \beta)$ -области + старение.

Обсуждение и заключения

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что проведение закалки с температур $(\alpha + \beta)$ - и β -областей обеспечивает достижение высоких степеней деформации при испытаниях образцов на осадку, превышающих 70 %, без образования трещин. Полученные результаты показывают равные возможности применения

материала в данных состояниях для изготовления крепежных изделий холодной высадкой. Значения относительного удлинения и сужения, определенные при испытании на растяжение образцов в закаленном состоянии, также являются близкими.

Для выбора температуры закалки прутковых заготовок из сплава ВТ47 определяющим является комплекс механических свойств, полученный на образцах после старения. В процессе старения образцов из сплава ВТ47 происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением частиц α -фазы. Уровень прочности материала при растяжении в первую очередь определяется полнотой протекания процесса распада и его равномерностью, что будет влиять на реализацию доминирующего дисперсионного механизма упрочнения образцов из сплава ВТ47.

Результаты испытаний показывают, что прочность образцов, обработанных по режиму: закалка из $(\alpha + \beta)$ -области + старение, в среднем больше на 80 МПа по сравнению с образцами, подвергнутыми закалке из β -области + старение. В процессе старения помимо положительного влияния первичной α -фазы на распад метастабильной β -фазы можно предположить, что благотворное влияние на свойства также оказывают дефекты кристаллического строения и размер зерен β -фазы, наследуемые после деформации при изготовлении прутков. В случае нагрева в β -области их положительное влияние ликвидируется вследствие активного протекания рекристаллизационных процессов.

По результатам испытаний видно, что значения механических свойств образцов после ВТМО и закалки из $(\alpha + \beta)$ -области + старение находятся на одном уровне. При этом положительной особенностью ВТМО является отсутствие в технологическом процессе операции закалки. Однако стабильность механических свойств образцов после ВТМО требует дополнительной оценки, поскольку условия охлаждения отдельных прутковых заготовок после их прокатки могут существенно отличаться.

Значения сопротивления срезу (табл. 4) коррелируют со значениями предела прочности при растяжении, полученными на прутковых заготовках из сплава ВТ47. Значения этой характеристики, определяющей для материала крепежных изделий, являются наилучшими и близкими в случае обработки по режимам ВТМО и $(\alpha + \beta)$ -закалка + старение.

Учитывая влияние дефектов строения материала на процессы распада и значения механических свойств, очевидным является повышение прочности материала из сплава ВТ47 за счет проведения НТМО, которая ограничено применяется для высокопрочных $(\alpha + \beta)$ -сплавов вследствие их невысокой пластичности при комнатной температуре. Однако повышенная технологическая пластичность закаленных псевдо- β -сплавов открывает широкие возможности для реализации данного метода, что подтверждается достижением предела прочности >1400 МПа после НТМО (табл. 3).

Необходимо также обратить внимание на схожесть морфологии структуры образцов после ВТМО и НТМО и более мелкозернистую структуру после НТМО.

По результатам проведенных исследований следует отметить, что применение прутковых заготовок из сплава ВТ47 для изготовления крепежных изделий позволит повысить их предел прочности более чем на 200 МПа в сравнении с применяемым в настоящее время сплавом ВТ16 с уровнем предела прочности 1100 МПа в термически упрочненном состоянии.

Однако окончательный выбор реализуемой схемы термической обработки возможен только по результатам отработки технологии изготовления крепежных изделий в рамках запланированных работ. Возможность достижения высоких значений прочностных характеристик в совокупности с высокой технологической пластичностью делает актуальным применение псевдо- β -сплава ВТ47 в качестве материала крепежных деталей.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
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. Володин В.А. Крепежные системы для высоконагруженных авиационных конструкций. Опыт и перспективы применения в гражданских самолетах // Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2015. С. 125–128.
5. 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.
6. Власов А.П. Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
7. Колганов И.М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. Ч. 1. 148 с.
8. Whittaker J.T. Ductility and Use of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners: Master's thesis. University of South Florida, 2015. P. 91.
9. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. P. 513.
10. 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.
11. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
12. Nyakana S.L., Fanning J.C., Boyer R.R. Quick Reference Guide for Titanium Alloys in the 00s // Journal of Materials Engineering and Performance. 2005. Vol. 14. No. 6. P. 13 URL: <http://www.springer.com> (дата обращения: 15.04.2021). DOI: 10.1361/105994905X75656.
13. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо-β-титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-22-29.
14. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
15. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 12. С. 11–14.
16. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИАМ–МАТИ, 2009. 520 с.
17. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners // Ti-92 Science and Technology: Proceedings of the 7th World Conference on Titanium The Minerals, Metals & Materials Society, 1993. P. 2899–2906.
18. Santhosh R., Geetha M., Nageswara Rao M. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017. Vol. 70. No. 7. P. 1681–1688.
19. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Опыт ФГУП «ВИАМ» по изготовлению полос из нового высокопрочного псевдо-β-титанового сплава BT47 // Труды ВИАМ. 2017. № 9 (57). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-2-2.
20. 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 BT23 // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
21. Высокопрочный сплав на основе титана и изделие, выполненное из высокопрочного сплава на основе титана: пат. 2569285 Рос. Федерация. № 2014153690/02; заявл. 29.12.14; опубл. 20.11.15.
22. Севастьянов Д.В., Дориомедов М.С., Сутубалов И.В., Кулагина Г.С. Направления развития производственных технологий в области редкоземельных металлов // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-4-4.