

УДК 669.295

*Н.А. Ночовная¹, А.А. Ширяев¹***ОПЫТ ФГУП «ВИАМ» ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОЛОС ИЗ НОВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT47**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-2-2

Разработана технологическая схема и режимы, в соответствии с которыми изготовлены экспериментальные образцы полос из высокопрочного псевдо- β -титанового сплава, легированного РЗМ, марки VT47. Проведены исследования влияния температурно-скоростных параметров межоперационной термической обработки (закалки) на механические свойства изготовленных полос.

Комплексная оценка качества экспериментальных образцов полос, включающая исследование структуры и механических свойств, показала целесообразность дальнейшего проведения работ по отработке технологий изготовления полос и фольги из сплава VT47.

Ключевые слова: *псевдо- β -титановые сплавы, сплав VT47, полосы, микроструктура, механические свойства.*

Both technological process protocol and parameters have been developed for a high-strength metastable β -titanium REE-containing VT47 alloy, and pilot samples of strips have been produced thereof. The effect of temperature and rate parameters upon interoperation heat treatment (quenching) on mechanical properties of the strips has been studied.

A complex quality evaluation of the pilot strips samples, including research on structure and mechanical properties, has showed a reasonability of further work on optimization of strips and foils production technologies for VT47 alloy.

Keywords: *metastable β -titanium alloys, VT47 alloy, microstructure, mechanical properties.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В современных летательных аппаратах широко применяются детали и узлы из листового материала, в конструкции которых с целью повышения жесткости для получения неразъемных соединений с профилями разной формы применяются различные методы сварки или клепка. В последнее время подобные элементы машин все в большей степени заменяются слоистыми конструкциями, представляющими собой две листовые обшивки с внутренним наполнителем, придающим конструкции устойчивость при нагружении. Однако широкое применение подобных конструкций, изготовленных из высокопрочных титановых сплавов, сдерживается их низкой пластичностью, высоким сопротивлением деформации и ограниченными технологическими возможностями их эффективного производства [1].

Кроме того, обеспечение высоких эксплуатационных характеристик самолетов нового поколения (с высокой скоростью и дальностью полета) требует применения новых материалов, поиска новых технологических и конструктивных решений, направленных на снижение массы конструкции и стоимости ее изготовления [2–6].

В области титановых сплавов наибольший практический интерес для использования в качестве листовых материалов для авиации и космической отрасли представляют умеренно легированные титановые псевдо- β -сплавы с термически нестабильной β -фазой, которые могут быть существенно упрочнены путем проведения термической обработки [7, 8].

Характерный для псевдо- β -титановых сплавов комплекс технико-эксплуатационных свойств: высокая технологическая пластичность, «самозакаливаемость» и высокий уровень прочностных характеристик – позволяет рекомендовать их для изготовления ряда деталей в изделиях авиационно-космической отрасли [9, 10]. Особый интерес в самолетостроении могут представлять слоистые конструкции с сотовым наполнителем, которые отличаются от клепаных более высокой удельной прочностью и меньшим количеством неразъемных соединений, обладают улучшенными аэродинамическими качествами и менее трудоемки в изготовлении.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.2. «Материалы на основе титана с регламентированной β -структурой» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

Материалы и методы

Исследования проведены на холоднокатаных полосах толщиной 0,3–0,4 мм из нового высокопрочного высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава марки VT47 системы легирования Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe с микродобавками РЗМ (иттрия) [12–16]. Полосы изготовлены из материала опытной партии горячекатаных листов толщиной 2 мм производства ФГУП «ВИАМ». Выплавку слитков и изготовление листов осуществляли в соответствии с нормативной документацией на сплав.

Термическую обработку проводили в вакуумной печи сопротивления Вега-2М в соответствии с общими требованиями ПИ 1.2.A.550–2000. Вакуум в печи сохранялся при охлаждении вплоть до комнатной температуры. При необходимости реализации более высоких скоростей охлаждения в камеру печи напускался аргон до атмосферного давления.

Механические свойства определены в соответствии с ГОСТ 1497 на универсальных испытательных машинах MTS-5т и Zwick/Roell Z100. Скорость нагружения 0,5 мм/мин при температуре испытания 20°C.

Образцы для металлографического анализа готовили по стандартной методике в соответствии с ПИ 1.2.785–2009. Технологический процесс состоял в предварительном удалении газонасыщенного слоя на шлифовальных кругах с грубым абразивом, далее образцы подвергали шлифованию последовательно на абразивах средней и тонкой зернистости.

После полировки поверхность микрошлифов подвергали травлению реактивами следующего состава:

– стандартный раствор для выявления микроструктуры титановых сплавов: 15% (объемн.) плавиковой кислоты (HF)+20% (объемн.) азотной кислоты (HNO₃)+65% (объемн.) воды (H₂O);

– мягкий раствор для выявления микроструктуры высоколегированных титановых сплавов: 5% (объемн.) плавиковой кислоты (HF)+15% (объемн.) азотной кислоты (HNO₃)+80% (объемн.) воды (H₂O).

Металлографический анализ в соответствии с ПИ 1.2.785–2009 «Металлографический анализ титановых сплавов» проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 при увеличениях от $\times 200$ до $\times 1000$ по методу светлого поля с использованием цифрового приемника изображения.

Результаты и обсуждение

Сотовые конструкции, как отмечено в ряде исследований, имеют преимущества перед конструкциями, состоящими из обшивок, стрингеров и нервюр. Для сотовых конструкций характерны бóльшая удельная прочность, более высокая жесткость и устойчивость при продольном сжатии, а также улучшенные характеристики по длительной прочности и гладкая поверхность. Конструктивно для панелей с сотовым наполнителем возможно применение несущих обшивок малой толщины (порядка 0,3–0,6 мм), что существенно снижает массу конструкции. Сотовые наполнители большой плотности, тонкую фольгу (~0,08 мм) из титановых сплавов и нержавеющей сталей обычно соединяют пайкой или сваркой. Поскольку эффективное изготовление листов, лент и фольги, а также их профилирование требуют высокой технологической пластичности – применение псевдо- β -титановых сплавов представляет значительный интерес.

В конце XX века во ФГУП «ВИАМ» проведен ряд научно-исследовательских работ по разработке технологий изготовления тонких листов, лент и фольги из отечественного псевдо- β -титанового сплава ВТ32 – для применения в сотовых конструкциях, а также технологий их сварки и пайки. Результаты работ показали перспективность применения сплава ВТ32 и необходимость проведения дополнительных исследований в части отработки режимов пайки. Разработанный во ФГУП «ВИАМ» новый псевдо- β -титановый сплав ВТ47 обладает высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками, в связи с чем исследование возможности изготовления тонких листов и полос из него также представляет значительный интерес.

В настоящее время наиболее перспективным для промышленности является процесс холодной прокатки полос, лент и фольги из высокопрочных титановых сплавов. При этом в значительной степени возможность практической реализации данного процесса обусловлена необходимостью применения в качестве исходного материала специальных высокотехнологичных сплавов.

Целесообразность замены теплой прокатки обусловлена рядом особенностей. К ним относится в первую очередь окисление при нагреве под теплую прокатку, что требует проведения обязательной операции травления. В процессе теплой прокатки происходит неравномерное (зачастую плохо контролируемое) охлаждение проката, что в результате приводит к снижению частных и общих степеней деформации, а также разноструктурности и неоднородности механических свойств. Эти трудности отчасти могут быть устранены при применении непрерывной рулонной прокатки с осуществлением дополнительного подогрева проката в термостатах непосредственно перед валками [17] или нагрева самих валков. Однако вышеуказанные меры довольно существенно повышают комплекс требований к оборудованию и производственному процессу.

При достижении некоторой критической толщины полосы скорость охлаждения на воздухе или в валках столь велика, что ее нагрев перед теплой прокаткой становится бесполезен и даже вреден вследствие окисления металла. Обычно критическая толщина в зависимости от условий прокатки (скорость прокатки, величина обжатия, температура валков, время передачи проката от печи к стану) составляет 1,5–2,5 мм. Таким образом, начиная с этих толщин целесообразен переход к холодной прокатке. Холодная прокатка позволяет получать полуфабрикаты с лучшим качеством поверхности и минимальными допусками по толщине.

В связи с низкой технологичностью при комнатной температуре многих высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов изготовление высокопрочных лент и фольги из сплавов данного класса затруднительно. Применение высокотехнологичных псевдо- β -титановых сплавов, способных полностью сохранять β -структуру после отжига в β -области, несмотря на достаточно высокие требования к жесткости прокатного оборудования, позволяет успешно решить данную проблему.

На основе опыта ФГУП «ВИАМ» и результатов исследований технологической пластичности листов из нового высокопрочного сплава ВТ47 разработана технологическая схема изготовления экспериментальных образцов полос:

- выплавка слитка и изготовление холоднокатаных листов толщиной 2 мм;
- закалка заготовок на β -фазу в вакуумной печи;
- предварительные холодные прокатки с большими степенями деформации ($\epsilon=40\text{--}60\%$) с осуществлением промежуточных отжигов в вакууме;
- закалка заготовок на β -фазу в вакуумной печи;
- окончательная холодная прокатка до полосы толщиной 0,35–0,4 мм со степенью деформации $\epsilon=25\text{--}35\%$;
- финальная термическая обработка заготовок в вакууме.

Изготовление листов, включая выплавку слитков, осуществляли согласно разработанной для сплава ВТ47 во ФГУП «ВИАМ» нормативной документации. Межоперационные отжиги для высоколегированных псевдо- β -титановых сплавов с целью достижения структуры с максимальной технологической пластичностью осуществляют путем закалки на β -фазу. При этом для фиксации полностью метастабильной β -структуры достаточно скоростей охлаждения от 2 до 10°C/мин в зависимости от сплава, которые могут быть обеспечены современными вакуумными или аргоно-вакуумными печами.

Для установления допустимых скоростных параметров охлаждения, обеспечивающих наиболее полную фиксацию высокотемпературной метастабильной β -фазы, авторами на образцах из нового псевдо- β -сплава ВТ47 проведен комплекс структурных исследований. Термическую обработку образцов проводили в воздушной камерной печи Nabertherm LN60/14. Печь оборудована системой ускоренного охлаждения, что позволяет обеспечивать регулирование скорости охлаждения садки с температуры выдержки в широких пределах – для имитации процесса охлаждения в вакуумных печах различной конструкции и размеров. Результаты исследования структурно-фазового состава образцов из сплава ВТ47 приведены на рис. 1.

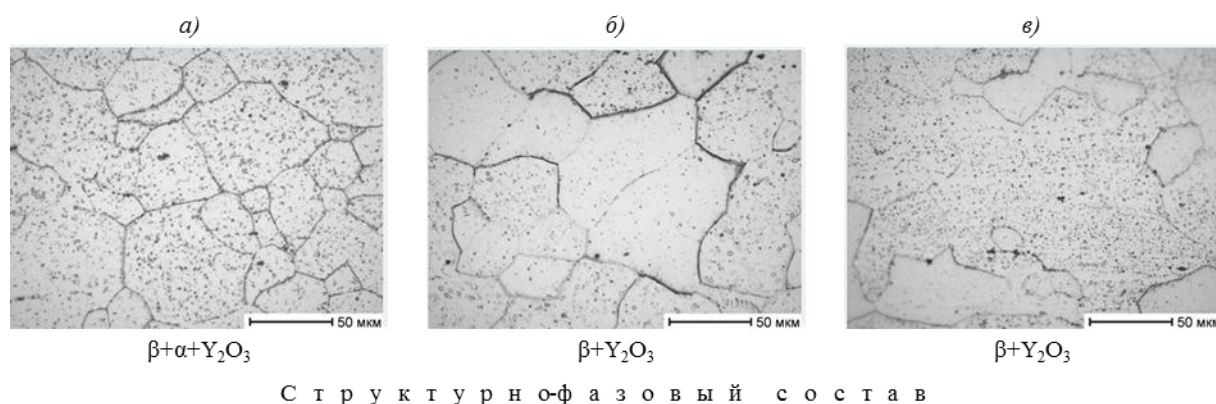


Рис. 1. Микроструктура и фазовый состав образцов листов из сплава ВТ47 после охлаждения из β -области со скоростью охлаждения 1,7 (а); 8,2 (б) и 10,8°C/мин (в)

Согласно результатам проведенных исследований, при охлаждении образцов из сплава ВТ47 со скоростями не менее 8–10°С/мин выделения частиц вторичной α -фазы не происходит и структура представлена первичными зернами β -твердого раствора и частицами оксида иттрия. Уменьшение скорости охлаждения постепенно приводит к формированию зародышей α -фазы, увеличению количества и росту их размеров. Так, охлаждение со скоростью 1,7°С/мин позволяет отчетливо наблюдать в структуре достаточно равномерно распределенные в объеме первичного β -зерна зарождающиеся выделения вторичной α -фазы игольчатой морфологии.

В ряде случаев возможно снижение температуры межоперационных отжигов ниже $T_{п.п}$ с целью уменьшения тенденции к росту зерна. Однако снижение температуры отжига сопровождается потерей технологической пластичности при прокатке (особенно в тонких сечениях) и росту усилий деформирования.

Структура, полностью состоящая из закаленной β -фазы, по крайней мере при толщинах 0,5–2 мм обеспечивает достижение высоких степеней деформации – вплоть до 50%. При прокатке более тонких полос на оборудовании опытного участка, суммарные степени деформации снижаются, а дробность прокатки и количество проходов существенно возрастают.

При больших степенях суммарных обжатий при прокатке, следы процесса деформации наблюдаются практически по всей толщине заготовки. После деформации структура состоит полностью из β -фазы и представлена деформированными β -зернами. Уменьшение толщины проката и сопутствующее снижение разовых и суммарных степеней деформации приводит к некоторой локализации деформации в приповерхностных областях.

В связи с тем, что на данном этапе исследований для повышения пластичности деформированного металла применялась закалка из β -области, все образцы как в исходном деформированном, так и в термически обработанном состояниях характеризуются достаточно крупным размером зерна – от 30 до 80 мкм (рис. 2).

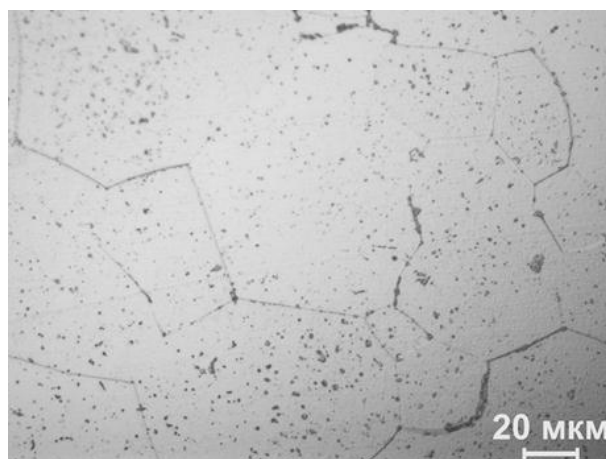


Рис. 2. Микроструктура холоднокатаной заготовки толщиной 0,4 мм в закаленном состоянии (режим термообработки ТО1ВВ – см. таблицу)

Исследование механических свойств полос, полученных в результате работы, осуществляли на образцах после термической обработки по экспериментальным режимам, представленным в таблице.

Механические свойства полос толщиной 0,4 мм из сплава ВТ47 после термической обработки по различным режимам

Режим термической обработки (ТО)	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5 , %
		МПа		
В исходном состоянии	87	910	980	6,8
ТО1В: нагрев до $T_{п.п}+30^\circ\text{C}$ (750°C), выдержка 40 мин, охлаждение с печью в вакууме при скорости охлаждения $V_{охл}^{750 \rightarrow 400^\circ\text{C}} = 16,8^\circ\text{C}/\text{мин}$	85	810	820	11,0
ТО1ВА: нагрев до $T_{п.п}+30^\circ\text{C}$ (750°C), выдержка 40 мин, охлаждение до $\sim 400^\circ\text{C}$ в потоке аргона при скорости охлаждения $V_{охл}^{750 \rightarrow 400^\circ\text{C}} = 33,5^\circ\text{C}/\text{мин}$, далее – без смены охлаждающей среды	84	810	820	11,3
ТО1ВВ: нагрев до $T_{п.п}+90^\circ\text{C}$ (810°C), выдержка 40 мин, охлаждение с печью в вакууме при скорости охлаждения $V_{охл}^{750 \rightarrow 400^\circ\text{C}} = 17,8^\circ\text{C}/\text{мин}$ и $V_{охл}^{810 \rightarrow 400^\circ\text{C}} = 19,0^\circ\text{C}/\text{мин}$	85	800	800	10,4
ТО2 (УТО): нагрев до 750°C , выдержка 40 мин, охлаждение с печью в вакууме до комнатной температуры; далее – нагрев до 510°C и выдержка 16 ч, затем охлаждение с печью в вакууме	111	1170	1260	6,0

При выборе режимов термической обработки в первую очередь была поставлена цель – уточнить допустимый диапазон технологических параметров межоперационной термической обработки, обеспечивающих низкие прочностные характеристики, снижение усилий деформирования и высокие значения пластичности. Для исследования свойств полуфабрикатов в термически упрочненном состоянии применен традиционный режим термической обработки.

В исходном деформированном состоянии сплав характеризуется умеренными значениями прочности, заметной разницей между пределами прочности и текучести. Удовлетворительные значения относительного удлинения испытанных образцов позволяют судить о том, что материал должен обладать хорошим остаточным уровнем технологической пластичности.

Исходя из анализа результатов исследования механических свойств образцов, закаленных в вакуумной печи, показано, что применение ускоренного охлаждения садки в среде аргона и повышение температуры нагрева под закалку не оказали существенного влияния на показатели модуля упругости, пределов прочности и текучести. Повышение температуры нагрева привело к снижению относительного удлинения на $\sim 1\%$, что также может негативно сказаться на показателях технологической пластичности.

Сравнение полученного уровня механических свойств полос толщиной 0,4 мм из сплава ВТ47 со свойствами ленты из сплава ВТ32 толщиной 0,5 мм показало, что сплав ВТ47 в закаленном состоянии характеризуется более низким значением предела прочности при сопоставимых значениях относительного удлинения.

Полученные в данной работе результаты позволяют сделать выводы о необходимости дальнейшей отработки технологии изготовления из сплава ВТ47 тонких лент, полос и фольги, предназначенных для применения в слоистых конструкциях с сотовым наполнителем.

Заключения

Разработана технологическая схема и режимы изготовления экспериментальных образцов тонких полос из высокопрочного псевдо- β -титанового сплава, легированного РЗМ, марки ВТ47.

Исследования влияния температурно-скоростных параметров межоперационной термической обработки (закалки) на механические свойства полос позволили установить, что для достижения высокого уровня пластичности сплава ВТ47 допустимо проведение закалки с температуры $T_{пл}+30^{\circ}\text{C}$ как в вакууме, так и в среде аргона.

Исследования показали, что изготовленные полосы характеризуются хорошим уровнем механических свойств, а для их дальнейшего повышения необходимо проведение работ по отработке технологий изготовления полос и фольги из сплава ВТ47.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сковцова С.В., Филатов А.А., Дзунович Д.А., Панин П.В. Влияние содержания алюминия на деформируемость титановых сплавов при нормальной температуре // Технология легких сплавов. 2008. №3. С. 40–45.
2. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
3. Ночовная Н.А., Ваганов В.Е., Панин П.В., Ширяев А.А. и др. Исследование структуры титановой проволоки, полученной методом высокотемпературной газовой экструзии // Титан. 2015. №4 (50). С. 22–28.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.
5. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Алексеев Е.Б., Анташев В.Г. Оптимизация режимов термической обработки для лопаточных заготовок из опытного жаропрочного сплава // МиТОМ. 2014. №12. С. 22–26.
6. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9 (45). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-5-5.
7. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry // Journal of Materials Engineering and Performance. 2005. 14 (6). P. 681–685.
8. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // МиТОМ. 1998. №12. С. 11–14.
9. Ширяев А.А., Ночовная Н.А., Бурханова А.А., Анташев В.Г. Перспективы и возможности создания экономнолегированных бета-титановых сплавов // Сб. тр. междунар. конф. «Ti-2013 в СНГ». 2013. С. 14–18.
10. Тетюхин В.В., Грибков Ю.А., Модер Н.И., Водолазский В.Ф. Исследование структурных и фазовых превращений в сплаве ВТ35 при изготовлении тонких листов // Титан. 1996. №1 (9). С. 25–29.
11. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
12. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Грибков Ю.А., Ширяев А.А. Разработка высокопрочного титанового псевдо- β -сплава и технологий получения полуфабрикатов из него // Вопросы материаловедения. 2016. №3 (87). С. 23–31.
13. Высокопрочный сплав на основе титана и изделие, выполненное из высокопрочного сплава на основе титана: пат. 2569285 Рос. Федерация; заявл. 29.12.14; опубл. 20.11.15, Бюл. №32.
14. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаливающегося высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30.
15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
16. Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Исследование структуры и химического состава слитков опытного высоколегированного титанового сплава // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-6-6.
17. Александров В.К., Аношкин Н.Ф. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: ВИЛС, 1996. 581 с.