

Список литературы

1. Hellier, Chuck, Handbook of Nondestructive Evaluation, (2001) McGraw-Hill Professional, New York, USA.
2. Паже К. Применение датчиков на основе тонких металлических пленок для контроля целостности конструкций воздушных судов // Физическая мезомеханика. — 2007. — Т. 10, № 6. — С. 43-48.
3. Панин С.В., Любутин П.С., Бурков М.В., Алтухов Ю.А., Хижняк С.А., Кузнецов В.П. Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – №3. – С. 103-118.
4. Mikhail Burkov, Sergey Panin, Pavel Lyubutin, Alexander Eremin, Pavlo Maruschak, Abdellah Menou, Aluminum Foil Based Fatigue Sensor for Structural Health Monitoring of Carbon Fiber Composites // Procedia Technology (8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014, 9-10 October 2014, Tirgu Mures, Romania) – V. 19 – 2015 – P. 307–312.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23

А.С.СМИРНОВА^{1,2}, А.В.ГОРБУНОВ², А.Г.МАЛИКОВ³, В.Е.ПАНИН^{1,2}, Ю.И.ПОЧИВАЛОВ¹,
А.М.ОРИШИЧ³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

E-mail: nasO@mail2000.ru

THE INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY WELDED JOINTS

A. S. SMIRNOVA^{1,2}, A. V. GORBUNOV², V. E. PANIN^{1,2}, Y. I. POCHIVALOV², A. G. MALIKOV³, A. M. ORISHICH³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

³Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: nasO@mail2000.ru

Abstract. The structure and mechanical properties of welded joints of VT23 titanium alloy received by method of laser welding with the subsequent thermomechanical treatment (TMP1 and TMP2) including ultrasonic mechanical forging were investigated. The results showed that the fatigue life of welded joints in TMP2 multiply increases compared with fatigue life of the welded connection samples in the delivery. The structure of the welded joint formed by laser welding has a gradient highly non-equilibrium coarse-grained structure based on α -phase. The structure with a defect density monotonically decreases with increasing distance from the surface into the material. As follows from a presented data, the fatigue life of the VT23 titanium alloy has increased more than threefold.

Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к конструкционным материалам, авиационной техники является обеспечение высоких значений их усталостной прочности и долговечности. Особую значимость это требование имеет применительно к сварным соединениям. На сегодняшний день одним из наиболее перспек-

тивных видов соединения высокопрочных материалов является лазерная сварка, которая характеризуется рядом преимуществ: формированием узкого сварного шва и сравнительно меньшей зоны термического влияния. Однако существует и проблема получения прочных сварных соединений титановых сплавов: образование большого количества пор в сварном шве и выделение нежелательных фаз при сварке титановых сплавов [3]. Сформировался значительный интерес к разработке деформационных способов модификации поверхностных слоев металлов и сплавов, поскольку их состоянием обусловлен целый ряд физико-механических свойств. Наиболее технологическими являются методы высокочастотного нагружения, которые базируются на многократном ударном воздействии на поверхность материалов (обработка дробью или песком) [1,2]. В работах ИФПМ СО РАН в настоящее время широко используется метод поверхностной обработки сварных соединений, с использованием ультразвукового оборудования, которое позволяет существенно поднять усталостные характеристики сварного соединения [4,5].

В настоящей работе исследовалась металлографическая структура и механические свойства сварных соединений титанового сплава ВТ23, полученных методом лазерной сварки с последующей термомеханической обработкой (ТМО1 и ТМО2), включающей в себя ультразвуковую механическую ковку.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использованы листовые заготовки толщиной 2 мм из титанового сплава ВТ23. Содержание основных легирующих элементов сплава ВТ23 приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав титанового сплава ВТ8-1

Содержание, мас. %											
H	N	Al	Zr	Mo	Fe	C	Ti	Cr	Si	V	O
До 0,015	До 0,05	4-6,3	До 0,3	1,5-2,5	До 0,4	0.1	84,1-89,3	0,8-1,4	0,15	4-5	До 0,15

Сварные соединения получали лазерной сваркой с использованием CO₂ лазера, разработанного лаборатории лазерных технологий ИТПМ СО РАН (скорость сварки $V_{св} \sim 54$ м/ч), мощность лазерного излучения составляла до 8кВт. Для обработки поверхности сварных соединений применяется комплекс оборудования для ультразвуковой механическойковки (УЗМК), который включает: генератор ИЛ4, предназначенный для выработки тока частотой 25 кГц мощностью 630Вт и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические.

Для обработки поверхности сварных соединений применяется комплекс оборудования для ультразвуковой ударной обработки, который включает: генератор ИЛ4, предназначенный для выработки тока частотой 25 кГц мощностью 630 вт. и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические и осуществляющий с помощью бойков обработку поверхности сварного соединения и околошовной зоны. Генератор ИЛ4 имеет ступенчатую регулировку мощности и позволяет получать 50, 75 и 100 % мощности от максимальной.

Металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе Axiovert 25 CA ". Исследование на микротвердость проведено на микротвердомере "ПМТ-3" с нагрузкой 20 грамм. Механические испытания выполнены путем растя-

жения на универсальной испытательной машине " Instron-5582 ". Усталостные испытания плоских образцов проведены на универсальной гидравлической испытательной машине Schenck Sinus.100.40. Фрактография разрушенных образцов исследована методом растровой электронной микроскопии на " Tesla BS-300 ". Рентгеноструктурный анализ проведен на автоматическом дифрактометре ДРОН 3М в CuKa-излучении.

Структура основного металла сплава BT23 типична для прокатанных $\alpha+\beta$ титановых сплавов и характеризуется ярко выраженной анизотропией структуры, рисунок 1. Зерна имеют форму сплюснутых пластин сильно вытянутых в направлении проката. Размер текстуры в этом направлении достигает $\sim 170 \times 15$ мкм, а его микротвердость - 2900 МПа. При лазерной сварке в сварном шве формируется очень неравновесная крупнозернистая структура на основе α – фазы с размером зерна до $\sim 600 \times 280$ мкм и микротвердостью 3500МПа, в сварном шве наблюдается большое количество крупных пор.

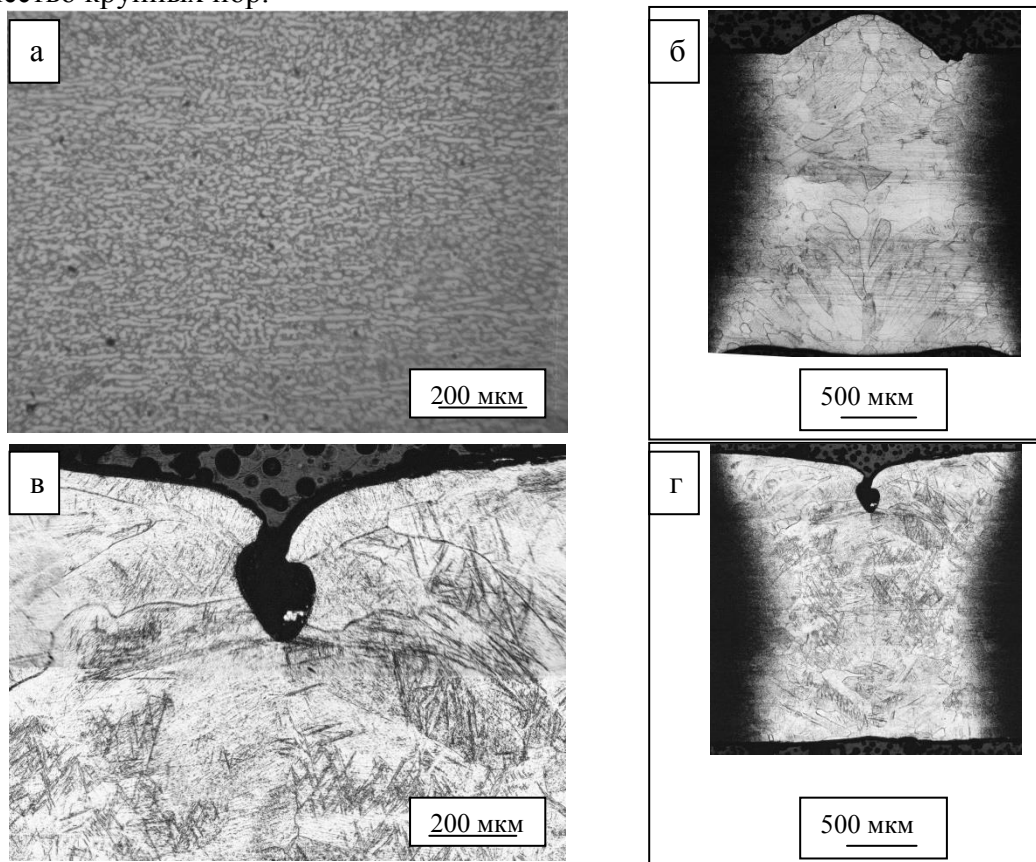


Рисунок 1 - Структура сварных соединений титанового сплава BT23: а - зона основной металл без применения обработок; б - панорама сварного шва без применения обработок; в - зона сварного шва BT23 после ТМО2; г) - панорама сварного шва после ТМО2

После ТМО1 микротвердость в зоне сварного шва увеличилась до 3800МПа, а в ЗТВ уменьшилась до 3300 МПа (рисунок 2). После ТМО2 в два этапа размер зерна в сварном шве уменьшился до $\sim 300 \times 80$ мкм, а микротвердость остается на уровне сварного шва без ТМО.

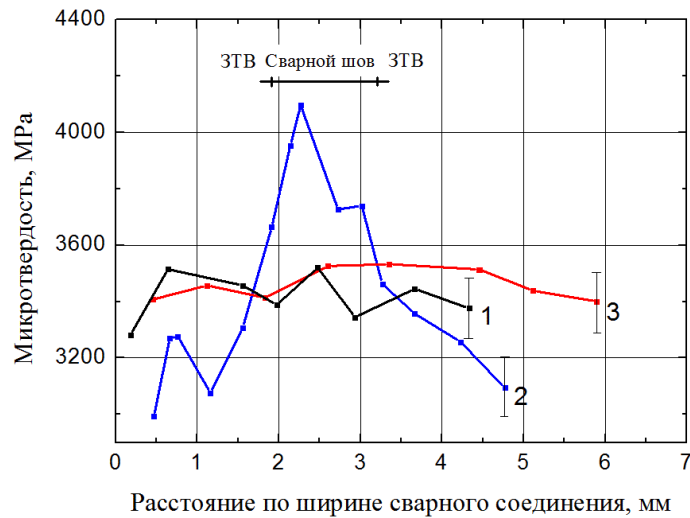


Рисунок 2 - Распределение микротвердости по ширине сварного соединения титанового сплава BT23:1 – образец в исходном состоянии после лазерной сварки; 2 – после TMO1; 3 – после TMO2

Механические испытания

Для исследования механических характеристик сварных соединений сплава BT23 были проведены испытания на растяжение. Диаграммы растяжения образцов представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

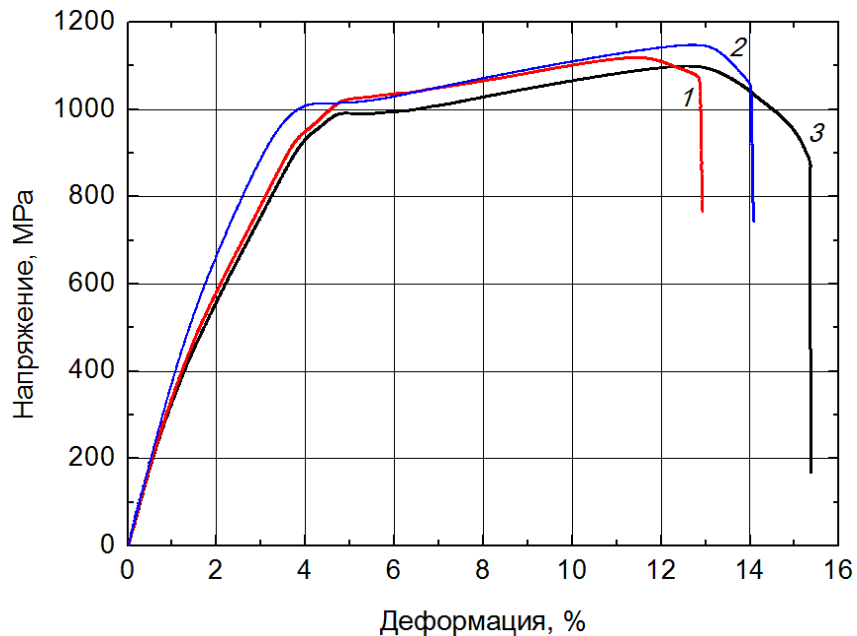


Рисунок 3 - Диаграммы растяжения сварных соединений сплава BT23: 1 - исходное состояние поставки; 2 - TMO1; 3 - TMO2

Предел прочности образцов с TMO1 и TMO2 остается на уровне прочности исходного сварного соединения. Пластичность при этом возрастает с 9,9 до 13% после TMO2 в режиме максимальной мощности.

Таблица 2 – Свойства сварных соединений сплава ВТ23 после ТМО

Режим обработки	Предел упругости σ_0 , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение, %
Состояние поставки	250,75	470,9	1119,8	9,97
ТМО1	241,49	583,87	1149,1	11,21
ТМО2	197,14	422,54	1100,45	13,01

Проведенные малоцикловые усталостные испытания показывают эффективность использования термической обработки в сочетании с УЗМК поверхностных слоев (таблица 3).

Таблица 3 – Число циклов до разрушения образцов сварных соединений до и после ТМО

Материал, Напряжение, МПа	Число циклов до разрушения			Коэффициент увеличения ресурса
	В состоянии поставки	после ТМО1	после ТМО2	
Сварное соединение ВТ23, 600 МПа	6003-6734	6512 – 6628	18236 - 20902	> 3

Усталостная долговечность сварных соединений титанового сплава ВТ23 обработанных по режиму ТМО2 составляет 20902 циклов, что более чем в 3 раз превышает усталостную долговечность сварных соединений без термомеханических обработок поверхностного слоя, при сохранении высокой термической стабильности структуры.

Обработка конструкционных материалов с высокими прочностными характеристиками по режиму ТМО2 резко повышает напряжение зарождения трещин. Исследование изломов образцов сварных соединений на малоцикловую усталость показали, что после ТМО2 наблюдается более развитый рельеф, трещина распространяется в ЗТВ, а в образцах в исходном состоянии и при ТМО1, распространение трещины проходит по зоне сплавления металла.

Заключение

Высокие диссипативные свойства материала с обработанным поверхностным слоем обеспечивают эффективную релаксацию напряжений, последовательно вовлекая в пластическую деформацию соседние объёмы, распределяя пластические сдвиги на большие объёмы материала, понижая гидростатические растягивающие напряжения и снижая скорость распространения трещины.

Как следует из представленных данных, термомеханическая обработка поверхностного слоя свариваемых пластин по второму режиму, путем термической обработки с последующей ультразвуковой механической ковкой, приводит к повышению пластичности. Проведенные испытания показали, что усталостная долговечность образцов сварных соединений ВТ23 обработанных по режиму ТМО2 увеличивается кратно, по сравнению с необработанными сварными соединениями.

Список литературы

1. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С., Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Почивалов Ю.И., Кибиткин В.В., Напряшкин А.А., Нехорошков О.Н., Лукин В.И., Сапожников С.В. // Влияние ультразвуковой ударной обработки на

- структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 / Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 85–96.
2. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Колобнев В.В. // Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий – литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик / Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 6. – С. 107– 111.
 3. Пугачева Н. Б., Антенорова Н. П., Сенаева Е. И. // Исследование свойств и структур лазерных сварных соединений сплава Al–Mg–Li / Физика металлов и металловедение. – 2015. - Т. 116. – № 12. – С. 1319–1329.
 4. Лясоцкая В.С. // Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / под ред. Б.А. Колачева – М.: Экомет, 2003. – 352 с.
 5. Алехин В.П., Алехин О.В. // Физические закономерности деформации поверхностных слоев материалов. - М.: МГИУ. 2011. - 455 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕКСАБОРИДА ЛАНТАНА ДЛЯ КАТОДОВ- КОМПЕНСАТОРОВ СПД

Я.А. БОНДАРЕНКО

Опытное конструкторское бюро «Факел», г.Калининград

E-mail: bondarenkoyana@yandex.ru

TECHNOLOGY OF PRODUCTION THE SINGLE-CRYSTAL LANTHANUM GEKSABORID FOR CATHODES-COMPENSATORS OF SPT

Y.A.BONDARENKO

Experimental design bureau «Fakel»

E-mail: bondarenkoyana@yandex.ru

Annotation. The article describes the technology of production the single-crystal lanthanum geksaborid for cathodes-compensators of SPT, floating zone melting method. Illustrated the main steps of development of the manufacturing single crystal, the basic characteristics of the material before and after the zone melting. Further we are comparison samples and analysis them.

Введение. Современные тенденции в развитии термокатодов в основном направлены на обеспечение эмиссионных характеристик во все более жестких условиях эксплуатации (высокие и низкие температуры, низкий и сверхвысокий вакуум, агрессивные и инертные среды, интенсивные ионные и электронные бомбардировки, различного вида облучения и др.); а также на выбор материала катода с оптимальными свойствами, обеспечивающими заданную плотность тока эмиссии и ее однородность на поверхности. В большинстве случаев стабильность работы термокатада определяется выбором материала.[1]

Гексаборид лантана – наиболее эффективный материал, обладающий уникальным комплексом свойств, таких как: высокая плотность эмиссионного тока в значительном диапазоне давлений, высокая эрозионная стойкость к ионной бомбардировке, восстанавливаемость эмиссии после отравления. По этой причине гексабо-