

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23 С МОДИФИЦИРОВАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОВКОЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

*А.С. Смирнова<sup>1,2</sup>, Ю.И. Почивалов<sup>1</sup>, В.Е. Панин<sup>1,2</sup>, А.В. Горбунов<sup>2</sup>*

Научный руководитель: академик РАН, профессор, д. ф.-м. н. В.Е. Панин

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: nasO@mail2000.ru

Разработка методов контролируемого управления прочностью и пластичностью материалов, за счет применения комплексных методов воздействий, является важным направлением развития современного материаловедения. Они включают традиционные методы упрочнения в сочетании с разными вибрационными и высокоэнергетическими способами обработки. Их применение позволяет достигать в структуре обрабатываемого материала состояний не достижимых при других видах обработки. Особенно эффективными эти методы оказываются применительно к сварным соединениям [1] и позволяют существенно повысить служебные характеристики сварных конструкций. Это достигается за счет формирования в поверхностных слоях сварных соединений высоконераспределенных, наноструктурных состояний и снижением остаточных, сварочных напряжений. В ИФПМ СО РАН разработаны методы наноструктурирования поверхностных слоёв, включающие ультразвуковую механическую ковку в сочетании с термомеханической обработкой, и которые показали высокую эффективность в повышении прочностных свойств, износостойкости и усталостной долговечности конструкционных материалов и их сварных соединений. Если рассматривать деформируемое твердое тело как многоуровневую, иерархически самоорганизующуюся систему, то в ней поверхностные слои и внутренние границы раздела являются важнейшими мезоструктурными уровнями деформации. Наноструктурирование поверхностного слоя и отсутствие резкого градиента напряжений на границе раздела «поверхностный слой – кристаллическая подложка» повышают его релаксационные способности, что способствует самосогласованию поворотных мод деформации в многоуровневой системе и задерживает развитие трещины при циклическом нагружении [2–3].

Целью настоящей работы является исследование структуры и механических свойств сварных соединений титанового сплава ВТ23 после модифицирования его поверхностных слоев с помощью ультразвуковой механической ковки, кратное повышение усталостные характеристики сварного соединения.

В качестве объектов исследования использованы листовые заготовки толщиной 2 мм из титанового сплава ВТ23. Сварные соединения получали лазерной сваркой с использованием CO<sub>2</sub> лазера, разработанного лабораторией лазерных технологий ИТПМ СО РАН, мощность лазерного излучения составляла до 8 кВт. После лазерной сварки сварные соединения подвергли ультразвуковой механической ковке (УЗМК) в двух режимах (Обработка 1 и Обработка 2). Оборудование для УЗМК включает: генератор ИЛ4, предназначенный для выработки тока частотой 25 кГц мощностью 630 Вт и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические.

Структура основного металла сплава ВТ23 типична для прокатанных  $\alpha+\beta$  титановых сплавов и характеризуется ярко выраженной анизотропией структуры, зерна в сварном шве ~600 на 280 мкм. При лазерной сварке ширина шва составляет ~1,5 мм. Сварной шов плохо поддается травлению, наблюдается большое количество крупных пор. А после Обработки 2 формоизменение кристалла реализуется посредством деформационного двойникования. У  $\alpha$ -Ti двойники наблюдаются на самых ранних этапах пластической деформации и, вследствие модифицирования поверхностных слоев с помощью ультразвуковой механической ковки, в сварном шве возникают двойники деформации.

В процессе сварки с высокоэнергетическим воздействием при расплавлении титанового сплава ВТ23, с последующей быстрой кристаллизацией, наблюдается существенное перераспределение легирующих примесей, выход Mo, Cr и V в зону сварного шва и обеднение этими компонентами зоны сплавления. В центре сварного шва возникает высокопрочная ОЦК  $\beta$ -фаза, которая обеспечивает высокую микротвердость сварного шва, а в обедненной зоне сплавления разрушение идет при более низком внешнем напряжении и наблюдается снижение микротвердости. После Обработки 1 микротвердость в зоне сварного шва резко возрастает с ~3300 МПа до ~3800 МПа. Возникновение неоднородного распределения ванадия, хрома и молибдена в сварном соединении резко увеличивает прочность, но в то же время хрупкость  $\beta$ -фазы. После Обработки 2 микротвердость выравнивается до уровня основного металла 3400 МПа, материал пластифицируется.

Проведенные малоцикловые усталостные испытания показывают эффективность использования УЗМК поверхностных слоев для повышения усталостных характеристик сварных соединений. Применение Обработки 2 сварных соединений, полученных лазерной сваркой, позволило повысить усталостную долговечность образцов в 3 раза.

В результате проведенного предварительного рентгеноструктурного анализа сварного соединения сплава ВТ23 с Обработкой 2 наблюдается изменение интенсивности и сдвиг пиков, что говорит об изменении текстуры и размера элементарной ячейки. В нашем случае наблюдается увеличение размера элементарной ячейки. Уменьшение областей когерентного рассеяния говорит об очень дефектной структуре после

Обработки 2. Сварное соединение приобретает большую релаксационную способность при пластическом деформировании.

С применением методов просвечивающей микроскопии изучена тонкая структура сварных соединений после лазерной сварки и последующей Обработки 2. В ( $\alpha+\beta$ ) титановом сплаве ВТ23 характерно наличие пластинчатой структуры с размером зерен  $\sim 1,5-4$  мкм, после сварки структура в сварном шве разнотельная, вблизи зоны сплавления мелкозернистая глобулярная структура размером  $\sim 1-3$  мкм. В центре сварного шва после Обработки 2 внутри крупных зерен идет измельчение структуры с формированием большого количества дислокаций и  $\alpha+\beta$  пластин.

Разработан способ обработки, обеспечивающий увеличение усталостной долговечности сварных соединений в три раза. Реализован механизм деформации, при котором удается пластифицировать сварное соединение ВТ23 с лазерной сваркой. Анализ полученных результатов позволяет сделать рекомендации для выбора режимов обработок, обеспечивающих наиболее оптимальные свойства сварных конструкций титанового сплава ВТ23.

*Авторы выражают благодарность сотрудникам ИТПМ СО РАН профессору Оришчу А.М. и научному сотруднику Маликову А.Г. за лазерную сварку сплава ВТ23.*

#### Список литературы

1. Панин В.Е., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. и др. Мезомасштабные закономерности усталостного разрушения сварных соединений высокопрочной стали // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. Спец. выпуск, ч. 1. – С. 385–388.
2. Панин В.Е., Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 3. – С. 5–22.
3. Dekhtyar A.I., Mordyuk B.N., Savvakin D.G. et al. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment // Materials science and engineering: A. Lett. – 2015. – Vol. 641. – P. 348–359.