

4. Галимов Э.Р. Основные тенденции в развитии и применении композиционных материалов в современной технике / Э.Р. Галимов. - Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева - 2000. - № 4. - с.20-25.
5. Колосов А.Е. Пропитка волокнистых наполнителей полимерным связующим. Ультразвуковая интенсификация пропитки / А.Е. Колосов, А.А. Каримов, В.Г. Хозин, В.В. Клявин // Механика композитных материалов. - 1988. - № 4. - С. 651
6. Хмелёв В.Н. Повышение эффективности ультразвукового воздействия при производстве высоконаполненных композиционных материалов / В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, С.Н. Цыганок, Г.А. Титов // Южно-сибирский научный вестник – 2012. - №2. - с. 192-196.
7. Коган Д.И. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом / Д.И. Коган, М.И. Душин, А.В. Борщёв, Е.А. Вешкин, П.А. Абрамов, К.В. Макрушин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14. -2012. - №4(2).
8. Магсумова А.Ф. Влияние ультразвуковой обработки на технологические свойства эпоксидного олигомера / А.Ф. Магсумова, Л.М. Амирова, М.М. Ганиев // Вестник КГТУ им. Туполева. – 2005. – №2.
9. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов / Мийченко И.П. – М.: Научные основы и технологии, 2012. – 374 с.

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА VT1-0 НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Хайруллин Р.Р.

Научный руководитель: Панин А.В., доцент, д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: hairullin@list.ru

EFFECT OF COMMERCIAL PURITY TITANIUM INITIAL STRUCTURAL STATE ON ITS SURFACE LAYER MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS CHANGE DURING ULTRASONIC TREATMENT

Hairullin R.R.

Scientific Supervisor: Associate Professor, Dr. Panin A.V.

Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: hairullin@list.ru

В настоящее время ультразвуковая обработка успешно применяется для поверхностного упрочнения металлов и сплавов. Однако в литературе нет ясного понимания влияния исходного структурного состояния технического титана VT1-0 на изменение его микроструктуры и механических свойств в процессе последующей ультразвуковой обработки. В данной работе исследовано влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость поверхностного слоя образцов технического титана VT1-0, взятых в состоянии поставки и подвергнутых предварительному рекристаллизационному отжигу. Установлено, что в зависимости от исходного структурного состояния образцов VT1-0 наблюдается различный эффект по увеличению плотности дислокаций и двойников с границами специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$ в поверхностных зернах в процессе ультразвуковой обработки. Показана связь между изменением структурных параметров и величиной микротвердости поверхностного слоя образцов VT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке.

Currently ultrasonic treatment is widely used for the surface hardening of metals and alloys. However there is not clear understanding in the literature about the effect of commercial purity titanium structural state on its microstructure and mechanical properties change during ultrasonic treatment. The work presents a study of the ultrasonic treatment effect on the surface layer microstructure and microhardness of as-received and recrystallized commercial purity titanium specimens. Different effect of the dislocations density growth and the twins with special

boundaries $\Sigma 7$ and $\Sigma 11$ increase within the surface grains during ultrasonic treatment depending on initial structural state of commercial purity titanium specimens was found. The relationship between the surface layer structural parameters change and the microhardness value of commercial purity titanium specimens subjected to ultrasonic treatment was shown.

Титан и его сплавы благодаря наличию высоких удельной прочности, коррозионной стойкости, биоинертности и хладостойкости являются одним из наиболее перспективных конструкционных материалов для создания деталей и узлов самолетов и ракет в авиационно-космической промышленности, имплантов в медицине, а также агрегатов в химической промышленности [1]. С целью улучшения механических и физико-химических свойств материалов, в т. ч. и титановых сплавов, активно используются различные методы поверхностного упрочнения (химико-термическая обработка, поверхностная закалка, обработка электронным пучком, ионная имплантация и др.), среди которых своей относительной простотой технической реализации и низкой себестоимостью выделяется ультразвуковая обработка [2]. Хорошо известно, что воздействие индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, позволяет в широких пределах изменять дислокационную субструктуру материала, измельчать зерна и субзерна до размеров нано- и субмикронного диапазона, формировать сжимающие напряжения в поверхностном слое материала и, тем самым, существенно улучшать физические и механические свойства конструкционных материалов, такие как твердость, предел текучести, износостойкость, усталостная прочность и коррозионная стойкость [3]. Однако влияние исходного структурного состояния материала на закономерности изменения его микроструктуры в процессе ультразвуковой обработки и связанного с этим повышения механической прочности к настоящему времени не выявлено. Целью данной работы являлось исследование влияния исходного структурного состояния технического титана ВТ1-0 на изменение микроструктуры и микротвердости его поверхностного слоя в процессе ультразвуковой обработки.

В качестве материала для исследований были выбраны образцы технического чистого титана марки ВТ1-0 (0.2 % Al, 0.4 % Zr, 0.3 % Mn, 0.01 % Cr, 0.06 % Si, 0.2 % Fe, 0.02 % Cu и 98.8 % Ti), взятые в состоянии поставки и после отжига в вакууме при температуре 750 °С в течение 1 часа. Средний размер зерна образцов, находящихся в состоянии поставки, составлял 40 мкм, а рекристаллизованных образцов – 100 мкм. Ультразвуковую обработку проводили инструментом, представляющим собой колебательную систему, состоящую из ультразвукового магнитострикционного преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединен сферический индентор из твердого сплава марки ВК8. В процессе ультразвуковой обработки инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности титановых образцов с силой 200 Н, совершая колебания с частотой ~22 кГц и амплитудой ~40 мкм. Диаметр индентора и скорость его движения вдоль образцов составляли 10 мм и 0,015 м/с, соответственно. Микроструктуру образцов титана ВТ1-0 исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 с системой регистрации дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) Oxford Instruments CHANNEL5. Дефектную субструктуру исследуемых образцов определяли методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100. Рентгеноструктурные исследования образцов выполняли на дифрактометре ДРОН-7 с использованием CoK_α -излучения. Измерения микротвердости H_{μ} исследуемых образцов выполняли на микротвердомере “ПМТ-3” с нагрузкой 50 г.

По результатам EBSD-исследований установлено, что в исходном состоянии как в образцах, находящихся в состоянии поставки, так и в рекристаллизованных образцах, зерна имеют различную ориентацию. Ультразвуковая обработка титановых образцов приводит к уменьшению среднего размера

поверхностных зерен в два раза, увеличению доли малоугловых границ (МУГ) и к формированию деформационных двойников с когерентными границами специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$. Сравнительный анализ доли формирующихся МУГ и двойникованных границ продемонстрировал, что относительная доля МУГ в образцах, находящихся в состоянии поставки, в три раза меньше, а доля двойникованных границ специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$ в четыре раза больше, чем в рекристаллизованных образцах.

Исследования, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, показали, что плотность дислокаций в образцах ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки, и в рекристаллизованных образцах составляет 10^9 и 10^8 см⁻², соответственно. Последующая ультразвуковая обработка приводит к росту плотности дислокаций в поверхностном слое исследуемых образцов до 10^{10} см⁻².

Рентгеноструктурными исследованиями выявлено, что после ультразвуковой обработки в образцах ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки, величина микроискажений кристаллической решетки и средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) составляют 0,3 % и 80 нм, соответственно. В свою очередь в рекристаллизованных образцах, подвергнутых ультразвуковой обработке, величина микроискажений и средний размер ОКР в два раза меньше. Кроме того, установлено, что величина остаточных макронапряжений после ультразвуковой обработки не зависит от исходного состояния материала и составляет -210 МПа.

Согласно данным измерений микротвердости образцов ВТ1-0, установлено, что в предварительно рекристаллизованных образцах микротвердость на поверхности увеличивается на 900 МПа после ультразвуковой обработки. В свою очередь, в образцах, находящихся в состоянии поставки, после ультразвуковой обработки микротвердость на поверхности увеличилась только на 650 МПа. Глубина упрочненного слоя также определяется исходным структурным состоянием и составляет 70 и 120 мкм для образцов, находящихся в состоянии поставки, и для рекристаллизованных образцов, соответственно.

На повышение микротвердости поверхностных зерен образцов ВТ1-0 после ультразвуковой обработки в общем случае влияют размер зерна, плотность дислокаций и двойников. Согласно известному закону Холла-Петча предел текучести поликристаллического материала возрастает с уменьшением среднего размера зерна. Средний размер зерна на поверхности образцов ВТ1-0 уменьшается после ультразвуковой обработки примерно в два раза независимо от исходного структурного состояния. В связи с этим объяснить больший прирост по микротвердости рекристаллизованных образцов большим уменьшением размера зерна не представляется возможным. Главной причиной более высокого прироста микротвердости в образцах, подвергнутых предварительному отжигу, является больший на порядок прирост по плотности дислокаций в поверхностных зернах после ультразвуковой обработки. В то же самое время, в образцах, находящихся в состоянии поставки, также наблюдается существенное увеличение микротвердости поверхности после ультразвуковой обработки относительно исходного состояния. Данный эффект связан с более выраженным образованием двойников с границами типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$ в поверхностных зернах данных образцов. Несмотря на то, что указанные двойники не являются эффективными барьерами для движения дислокаций [4], они вносят вклад в повышение микротвердости поверхности образцов ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки, за счет увеличения микроискажений кристаллической решетки.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Ультразвуковая обработка образцов ВТ1-0 приводит к фрагментации структуры их поверхностного слоя, интенсивному двойникованию, увеличению плотности дислокаций и внутренних напряжений, что способствует росту микротвердости поверхности. Двойникование, приводящее к

формированию границ специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$, оказывается более выраженным в образцах ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки.

2. Глубина поверхностного упрочнения титановых образцов в результате ультразвуковой обработки определяется средним размером зерна и исходной плотностью дислокаций. С уменьшением среднего размера зерна и с увеличением плотности дислокаций уменьшается глубина упрочненного поверхностного слоя после ультразвуковой обработки.

3. Большое увеличение твердости поверхностного слоя рекристаллизованных образцов ВТ1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке, связано с более существенным увеличением плотности дислокаций в поверхностных зернах. Несмотря на то, что двойники с когерентными границами специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$, формирующиеся в поверхностном слое титановых образцов в процессе ультразвуковой обработки, не являются барьерами для внутризеренного скольжения, они дополнительно способствуют упрочнению поверхностного слоя образцов ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки, за счет роста микроискажений кристаллической решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00766). Экспериментальные исследования проводились на приборах ЦКП «НАНОТЕХ» Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.O. Ezugwu, Z.M. Wang. Titanium alloys and their machinability – a review // *Journal of Materials Processing Technology*. –1997. – V. 68 (3). – P. 262–274.
2. M.A. Vasylyev, S.P. Chenakin, L.F. Yatsenko. Ultrasonic impact treatment induced oxidation of Ti6Al4V alloy // *Acta Materialia*. – 2016. – V. 103. – P. 761-774.
3. Chang Ye, Abhishek Telang, Amrinder S. Gill et al. Gradient nanostructure and residual stresses induced by Ultrasonic Nano-crystal Surface Modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – V.613. – P. 274–288.
4. Panin A.V., Kazachenok M.S., Kozelskaya A.I., Hairullin R.R., Sinyakova E. A. Mechanisms of surface roughening of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment // *Materials Science and Engineering A*. – 2015. – V. 647. – P. 43-50.