

Повышение физико-механических характеристик поверхностного слоя титанового сплава ВТ16 методом ультразвуковой ударной обработки

М.О. Кувшинов¹, А.А. Хлыбов²

¹ *Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г.Саров, Россия*

² *Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород, Россия*

Аннотация

Методами оптической и просвечивающей микроскопии исследован титановый сплав ВТ16 и обнаружено, что в процессе пластического деформирования с наложением колебаний ультразвуковой частоты в поверхностных слоях формируется нанокристаллическая структура. В результате структурно-фазовых превращений и формирования сжимающих напряжений увеличивается микротвердость в поверхностных слоях сплава.

Ключевые слова

Поверхностное пластическое деформирование, титановый сплав, микроструктура, нанокристаллическая структура, фазовый состав, микротвердость, шероховатость, сжимающие остаточные напряжения.

Введение

Титан и его сплавы нашли широкое применение в авиационной, ракетной и морской судостроительной технике ввиду своих высоких механических свойств. Высокая стоимость титана и его сплавов во многих случаях компенсируется их большей работоспособностью, а в некоторых случаях они являются единственным материалом, из которого можно изготовить оборудование или конструкции, способные работать в конкретных условиях. Для придания ряда функциональных свойств таким сплавам необходимы модификация существующих или разработка новых технологий обработки их поверхности.

Работоспособность и надежность деталей, узлов, изделий во многом определяются свойствами и состоянием их поверхностного слоя. Схематично поверхностный слой можно представить в виде рис. 1 [1, 2, 3].

Одним из перспективных научных направлений в области создания новых материалов с уникальными свойствами, является разработка специальных технологий получения материалов, имеющих субмикроструктурную и нанокристаллическую структуру.

Для формирования в поверхностных и приповерхностных слоях субмикроструктурной и нанокристаллической структуры, а также требуемых физико-механических характеристик, применяют различные методы модифицирования поверхностного слоя, одним из которых является технология

УУО. Данный метод поверхностного упрочнения обеспечивает существенное изменение дислокационной структуры в поверхностном слое обрабатываемого материала, измельчение зерен до наноразмера, увеличение углов разориентировки дислокационных фрагментов и др.

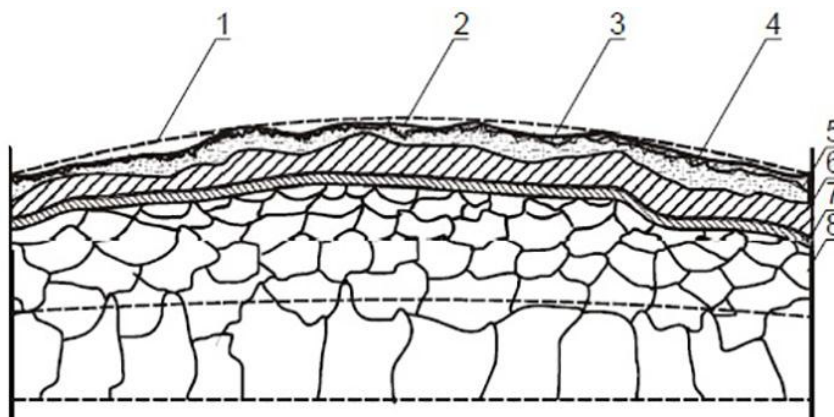


Рисунок 1 - Схематичное изображение поверхностного слоя детали: 1- макроотклонение; 2 – волнистость; 3 – шероховатость; 4 – субшероховатость; 5 – адсорбированная зона; 6 – зона оксидов; 7 – границная зона; 8 – зона с измененными физико-механическими свойствами.

В рамках данной работы модификацию поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ16 осуществляли с помощью комплекса для УУО, который включает в себя: генератор типа ИЛ, предназначенный для выработки тока частотой ~25 кГц, мощностью 630 Ватт и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические и осуществляющий с помощью деформирующего элемента обработку поверхности.

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлся титановый сплав ВТ16 системы Ti–Al–Mo–V по фазовому составу относящийся к мартенситной $\alpha + \beta$ – группе в термообработанном состоянии. Технологические параметры УУО:

- постоянные: частота - 22 кГц, амплитуда - 10 мкм;
- варьируемые: статическая нагрузка ~ 50 Н, 100 Н, 150 Н.

Таким образом, УУО проводилась по 3 режимам: 1 режим при статической нагрузке 50 Н, 2 режим при статической нагрузке 100 Н, 3 режим при статической нагрузке 150 Н и при неизменных частоте и амплитуде.

Для контроля шероховатости поверхности после УУО использовался цифровой контактный профилометр TR220.

Измерение микротвёрдости выполняли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 гр. по ГОСТ 9450. Для оценки изменения микротвёрдости на различном удалении от обрабатываемой поверхности образцов после обработки изготавливались поперечные шлифы. Шлифы для исследования подготавливались по традиционной методике.

Микроструктура поверхностного слоя и основного металла изучалась на оптическом инвертированном микроскопе Olympus GX53 с системой анализа

изображений Siams 800. Химическое травление проводилось реактивом состава: 10 мл плавиковой кислоты (HF), 20 мл азотной кислоты (HNO₃), 70 мл глицерина (C₃H₅(OH)₃).

Для исследования тонкой структуры использовался электронный микроскоп типа JEOL при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Остаточные макронапряжения поверхностного слоя измерялись при помощи многофункционального рентгеновского дифрактометра общего назначения типа ДРОН.

Результаты исследований

При базовой длине 0,8 мм, исходные значения параметров шероховатости поверхности всех исследуемых образцов составляли: R_a = 0,680 мкм; R_z = 3,795 мкм; R_{max} = 4,550 мкм;

После УУО образцов значения параметров шероховатости поверхности снизились (табл.1).

Таблица 1

Значения параметров шероховатости поверхности после УУО.

Режим обработки	1 режим УУО	2 режим УУО	3 режим УУО
Величина шероховатости	R _a = 0,069 мкм R _z = 0,558 мкм R _{max} = 0,768 мкм	R _a = 0,082 мкм R _z = 0,847 мкм R _{max} = 1,152 мкм	R _a = 0,136 мкм R _z = 1,028 мкм R _{max} = 1,582 мкм

На рис. 2 представлена микроструктура титанового сплава ВТ16 в исходном состоянии.

На рис. 3 представлена микроструктура поверхностного слоя титанового сплава ВТ16 после УУО. Следует отметить, что микроструктура поверхностного слоя после обработки имеет одинаковый характер и поэтому представлена в виде 1 фотографии.

Микроструктуру можно отнести к структуре преимущественно «корзиночного плетения», которая отличается от пластинчатой менее грубым строением колоний α-фазы, которые растут не только от границ исходных зерен, но и внутри зерен β-фазы. Крупные зерна исходной β-фазы видны по оторочкам новой α-фазы, расположенной по границам β-кристаллов, α-пластины разделены промежутками β-фазы. Средняя длина α-пластин порядка 70 мкм.

УУО привела к деформированию элементов структуры, их уплотнению и образованию текстуры деформации в поверхностном слое на глубину порядка 80 мкм, что, в свою очередь хорошо согласуется со многими литературными данными по данному вопросу.

Выявить особенности структуры поверхностных слоев только металлографическим методом достаточно сложно, поэтому для более детального рассмотрения следует использовать электронную микроскопию.

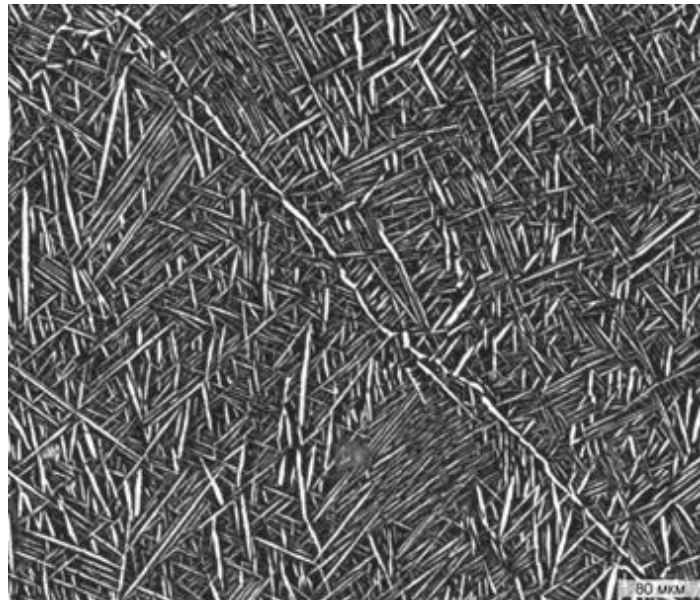


Рисунок 2 - Микроструктура титанового сплава ВТ16 в исходном состоянии, x500.

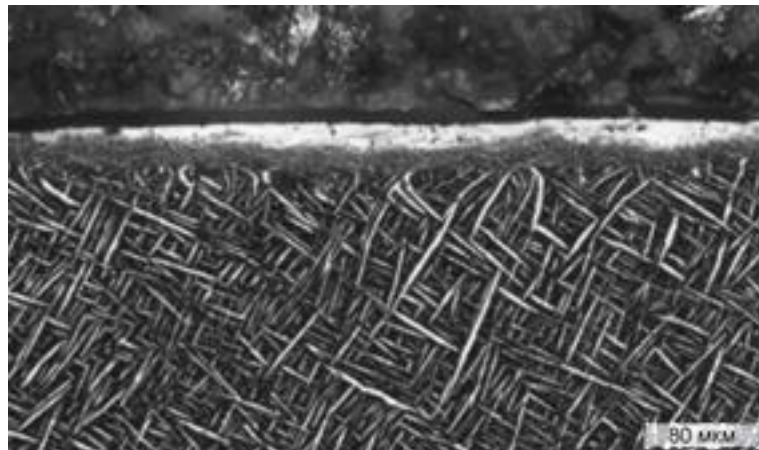


Рисунок 3 - Микроструктура поверхностного слоя после УУО, x500.

Исходная микротвердость титанового сплава ВТ16 имела следующее значение – $HV_{0,1} = 376$.

После УУО образцов по технологическим режимам, представленным выше, микротвердость поверхностного слоя повысилась и достигла своего максимума на поверхности. В табл. 2 представлены результаты измерения микротвердости.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости.

Режим обработки	1 режим УУО	2 режим УУО	3 режим УУО
$HV_{0,1}$	437	478	525

Анализ изменения микротвердости по глубине поверхностно слоя показывает, что при удалении от поверхности значения микротвердости уменьшаются и достигают исходного значения на глубине ~150 мкм.

Увеличение значений микротвердости свидетельствует как об измельчении элементов микроструктуры, повышении дефектности структуры, так и формировании напряжений сжатия в поверхностных слоях. Об увеличении степени дисперсности структуры с повышением микротвердости, также свидетельствуют результаты изучения тонкой структуры, представленные на рис. 4а, 4б, 4в, 4г.

Средний размер элементов субзеренной структуры образца составляет ~ 200 нм, после УУО средний размер элементов структуры уменьшился, достигнув следующих значений: 1 режим УУО ~ 130 нм, 2 режим УУО ~ 110 нм, 3 режим УУО ~ 50 нм.

В результате УУО также увеличилась плотность дислокаций. В исходном образце плотность дислокаций составляла $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а в результате обработки плотность дислокаций увеличилась до значений: 1 режим УУО $\sim 4,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, 2 режим УУО $\sim 7,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, 3 режим УУО $\sim 9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

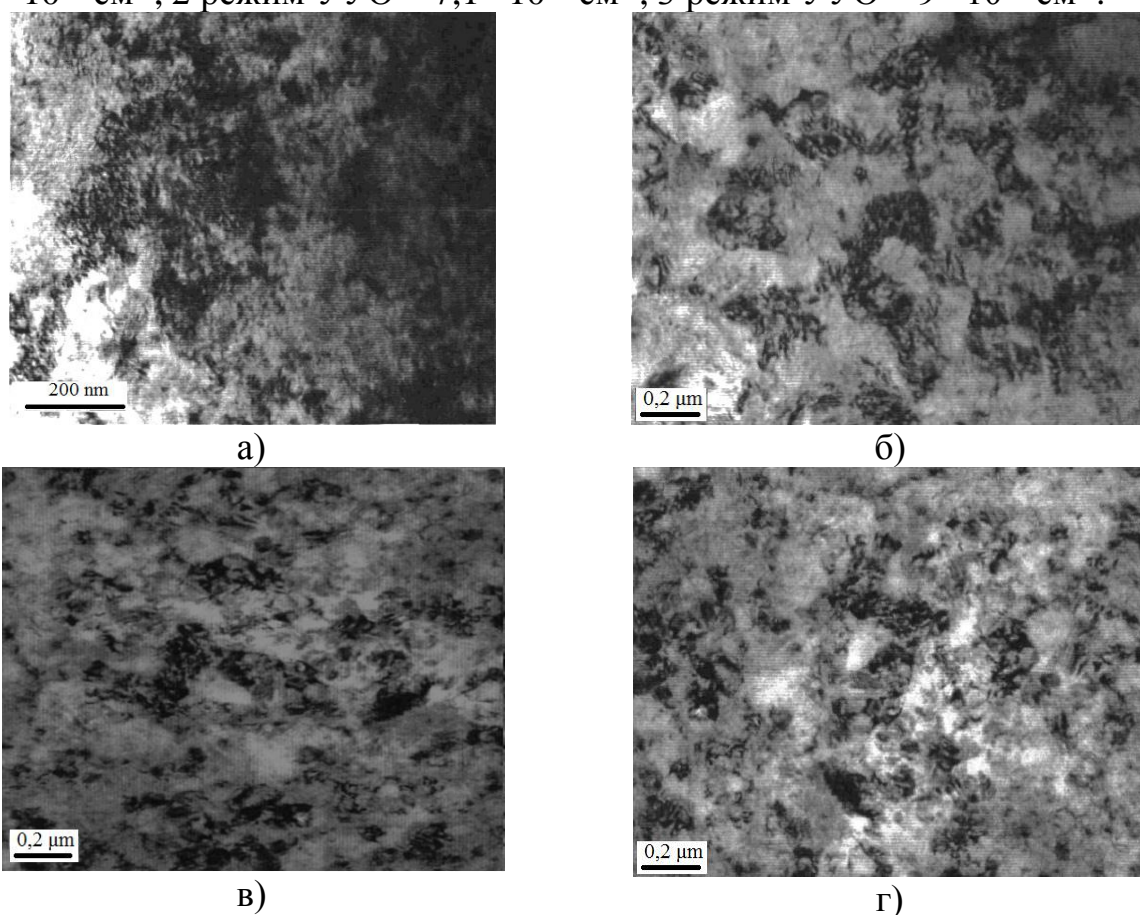


Рисунок 4 - Нанокристаллическая структура поверхностного слоя титанового сплава VT16, x230000:

а – исходная, без УУО; б – 1 режим; в – 2 режим; г – 3 режим.

В исходном состоянии остаточные напряжения поверхностного слоя имели следующие значения: -90...50 МПа. После УУО в поверхностном слое сформировались сжимающие остаточные напряжения имеющие максимум на поверхности. В табл. 3 представлены результаты измерения остаточных напряжений.

Результаты измерения остаточных напряжений.

Режим обработки	1 режим УУО	2 режим УУО	3 режим УУО
Величина и знак остаточных напряжений, МПа	-360	-410	-480

Заключение

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что при УУО:

- микрогеометрия обрабатываемой поверхности улучшается при уменьшении силы статического прижима. Это объясняется тем, что при увеличении силы статического прижима перед деформирующим элементом начинает формироваться передняя внеконтактная зона и увеличивается контактная зона под деформирующим элементом;

- микротвердость имеет максимальное значение на поверхности образца, уменьшается по удалению вглубь материала и в итоге возвращается к исходным значениям;

- происходит деформирование элементов структуры, их уплотнение и образованию текстуры деформации;

- плотность дислокаций увеличивается, а размер элементов субзеренной структуры уменьшается с увеличением силы статического прижима деформирующего элемента к образцу;

- происходит формирование остаточных сжимающих напряжений имеющих максимум на поверхности. Значение остаточных сжимающих напряжений возрастает при увеличении силы статического прижима деформирующего элемента к образцу.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют наглядно показать преимущества УУО и возможность применения для повышения физико-механических характеристик поверхностных слоев титанового сплава VT16 и модифицирования поверхностного слоя с формированием наноструктуры.

Научный руководитель – А.А. Хлыбов.

Библиографический список

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.
2. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт. под ред. Суслова А.Г. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
3. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 2002. - 300 с.