ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/221

**НЕУСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ α -Ti
В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
ОБРАБОТАННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СИЛЬНОТОЧНЫМ
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

Перевалова О.Б., Панин А.В., Синякова Е.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Обработка поверхности титановых сплавов с помощью электронно-пучковых технологий применяется для уменьшения шероховатости поверхности и улучшения их коррозионных свойств [1]. В настоящей работе методами энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа, рентгеноструктурного анализа (РСА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы закономерности изменения микроструктуры и фазового состава титановых сплавов BT1-0 и BT6 в процессе обработки низкоэнергетическим сильноточным импульсным электронным пучком.

Облучение образцов электронным пучком проводили на электронно-пучковой установке SOLO (ИСЭ СО РАН) тремя импульсами с длительностью 50 мкс. Плотность энергии пучка варьировалась в пределах $W = 12 - 24$ Дж/см² при начальной энергии частиц 18 кэВ, частота следования импульсов составляла 0.3 с⁻¹.

Установлено, что в процессе электронно-пучковой обработки титановых сплавов BT1-0 и BT6 происходит плавление их поверхностных слоев с последующей закалкой. Методом ПЭМ показано, что в сплаве BT1-0 формируется пластинчатая структура α -Ti, унаследованная от α' -мартенсита, а также образуются двойники в изотропных зернах α -Ti, не претерпевших мартенситное $\beta \rightarrow \alpha'$ превращение. В пластинах фазы α -Ti этого сплава наблюдается дислокационная структура. При последующем одноосном растяжении в поверхностном слое некоторых образцов, обработанных пучком, при степени деформации, равной 3% и более, образуются фазы α'' -Ti и ω -Ti, которые при дальнейшем деформировании до степени деформации 10% и более исчезают.

В сплаве BT6 после обработки электронным пучком возможно два типа структуры. Первый тип аналогичен структуре, наблюдаемой после обработки пучком сплава BT1-0. Для второго типа также характерно образование пластинчатой структуры α -Ti, однако в внутри пластин α -Ti, помимо дислокаций, наблюдаются выделения нанокристаллических фаз α'' -Ti и ω -Ti. Если фаза ω -Ti наблюдается в виде отдельных частиц, то фаза α'' -Ti – в виде нескольких частиц вытянутой формы, приблизительно параллельных друг другу и расположенных под некоторым углом к границе пластины. Кроме этого, выделения фаз α'' -Ti и ω -Ti наблюдаются по границам пластин фазы α -Ti.

Методами РСА установлено, что после обработки электронным пучком в поверхностных слоях титановых сплавов возникают растягивающие макронапряжения. Последнее наглядно проявляется в макроскопическом изгибе образцов, при котором пластина приобретает отрицательную кривизну. При этом изменяется такой параметр кристаллической решетки α -Ti, как среднеквадратичное смещение атомов, за счет изменения статической составляющей. Если в предварительно отожженных образцах BT1-0 значения $\sqrt{\langle u^2 \rangle_{002}}$ варьируются в пределах 0.005 – 0.014 нм, то после обработки пучком разброс значений $\sqrt{\langle u^2 \rangle_{002}}$ возрастает от 0.008 до 0.028 нм. В сплаве BT6 со вторым типом структуры в поверхностном слое значения $\sqrt{\langle u^2 \rangle_{002}}$ достигают 0.03 нм, что более чем вдвое больше, чем в отожженном состоянии образца. Экспериментально установлена прямо-пропорциональная зависимость между квадратным корнем из среднеквадратичного смещения атомов и макронапряжениями растяжения как для сплава BT1-0 (рис. 1а) так и для сплава BT6 (рис. 1б).

Проведенный анализ показал, что фазы α'' -Ti и ω -Ti образуются в деформированных образцах BT1-0, подвергнутых предварительной обработке электронным пучком, в случае, если величина $\sqrt{\langle u^2 \rangle_{002}}$ составляет более 0.02 нм. В сплаве BT6 при значении $\sqrt{\langle u^2 \rangle_{002}}$, равном

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

0.03 нм, в поверхностном слое до 1 мкм возникает мартенситная фаза α'' -Ti, объемная доля которой сопоставима с объемной долей основной фазы α -Ti.

Рис. 1. Зависимость между корнем квадратным из полного среднеквадратичного смещения атомов и макронапряжениями в поверхностном слое толщиной 1 мкм образцов титановых сплавов VT1-0 (а) и VT6 (б), обработанных низкоэнергетическим сильноточным импульсным электронным пучком с плотностью энергии в интервале 12-24 Дж/см².

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при обработке поверхности титановых сплавов VT1-0 и VT6 электронными пучками в кристаллической решетке α -Ti увеличиваются среднеквадратичные смещения атомов, что является предпосылкой для фазовых переходов α -Ti $\rightarrow$ α'' -Ti и α -Ti $\rightarrow$ ω -Ti. Увеличение среднеквадратичного смещения атомов в фазе α -Ti может происходить из-за повышенной концентрации атомов кислорода, проникающих в образец в процессе электронно-пучковой обработки. Методом энергодисперсионного анализа показано, что концентрация кислорода в проплавляемом слое локально достигает 20 ат.%. Присутствие атомов кислорода в октаэдрических междоузлиях может приводить к смещениям атомов титана в направлении 002.

В сплаве VT6 наряду с увеличением концентрации кислорода в проплавляемом поверхностном слое отмечается тенденция к увеличению концентрации алюминия. Причем в случае образования фазы α'' -Ti с объемной долей, близкой к 0.5, увеличение концентрации алюминия составляет около 4 ат.% по сравнению с исходным состоянием до обработки. В образце, в котором фаза α'' -Ti не образуется, увеличение концентрации алюминия в поверхностном слое вдвое меньше. Таким образом, увеличение концентрации алюминия, наряду с кислородом, в поверхностном слое титанового сплава VT6 может являться причиной увеличения полного среднеквадратичного смещения атомов в фазе α -Ti. Известно [2], что в твердых растворах замещения с ГЦК структурой увеличение концентрации элементов замещения сопровождается увеличением полного среднеквадратичного смещения атомов.

Полученные результаты позволяют утверждать, что состояние кристаллической решетки фазы α -Ti после обработки электронным пучком можно характеризовать как неустойчивое или слабоустойчивое, предшествующее фазовым переходам α -Ti $\rightarrow$ α'' -Ti и α -Ti $\rightarrow$ ω -Ti. Неустойчивое состояние кристаллической решетки предшествует фазовым переходам порядок-беспорядок [3] и мартенситным переходам в никелиде титана [4].

Литература

1. Шулов В.А., Ягоднин Д.Д., Сулима А.М., Тетюхин В.В. Ионно-лучевая модификация поверхностных слоев титановых сплавов. МиТОМ. 1990. №8. С.24-29.
2. Перевалова О.Б., Коновалова Е.В., Конева Н.А., Козлов Э.В. Влияние атомного упорядочения на зернограничные ансамбли ГЦК-твердых растворов. Томск: НТЛ, 2014. 247с.
3. Козлов Э.В., Мейснер Л.Л., Клопотов А.А., Тайлашев А.С. Неустойчивость кристаллической решетки накануне структурных фазовых переходов. Известия Вузов. Физика. 1985. №5. С. 118-126.
4. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Козлов Э.В., Кулагина В.В. Слабоустойчивые предпереходные структуры в никелиде титана. - Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 296 с.