

СТРУКТУРА ТИТАНОВОГО СПЛАВА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ И РАЗРУШЕННОГО ПРИ УСТАЛОСТИ

Комиссарова И.А.¹, Коновалов С.В.², Гостевская А.Н.¹, Громов В.Е.¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,
lokon1296@mail.ru

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П.
Королева, Самара, Россия
ksv@ssau.ru

Сплавы на основе титана одни из самых используемых материалов в промышленности. В силу сочетания различных характеристик (удельная прочность, пластичность и высокая коррозионная стойкость) является одним из основных конструкционных материалов [1]. Но в силу того, что титановые сплавы имеют слабое сопротивление эрозионному изнашиванию, малую твердость и низкую износостойкость область их применения ограничена [2]. Так же такие сплавы чувствительны к состоянию поверхности. Это связывается с тем, что после механической обработки в поверхностном слое формируются риски, оказывающие влияние на их долговечность [3].

Значимым методом для улучшения поверхностного слоя считается интенсивная импульсная обработка электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, что позволяет модифицировать структуру поверхностного слоя [4].

Цель данной работы – это изучение влияния облучения интенсивным импульсным электронным пучком титанового сплава ВТ1–0 на его долговечность.

В исследовании были использованы образцы титанового сплава ВТ1-0 (аналог — сплав Grade2) с химическим составом: до 0,18 Fe, до 0,07 С; до 0,04 N; до 0,1 Si; до 0,12 O; до 0,004 H; 0,3 – другие примеси. Образцы толщиной 4 мм и шириной 12 мм были изготовлены по ГОСТ 25.502 – 79 и имели симметричный концентратор напряжений с минимальным сужением в центральной части 5 мм.

Облучение поверхности образцов, приготовленных для усталостных испытаний, осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах: энергия электронов 16 кэВ; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; длительность импульса пучка электронов 150 мкс; плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см²; количество импульсов воздействия 3.

Усталостные испытания проводили на установке для испытаний на усталость по схеме асимметричного 268 консольного изгиба. Температура испытаний — 300 К, частота нагружения образцов изгибом составляла 10 Гц. Исследования поверхности разрушения осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (Tesla BS-301).

Для объяснения влияния импульсного воздействия электронным пучком проведены теоретические исследования по решению задачи о нахождении температурного поля при заданном значении плотности энергии пучка электронов, основанной на решении уравнения теплопроводности. Рассмотрен одномерный случай нагрева и охлаждения пластины толщиной d . Система координат выбрана так, что ось x направлена вглубь образца. При $x = 0$ задан тепловой поток, а на тыльной стороне пластины теплообмен отсутствует.

Для решения уравнения теплопроводности использовали метод конечных разностей. Толщина поверхностного слоя для тепловых расчетов $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, время наблюдения 600 мкс. Расчеты выполнялись для интенсивного электронного пучка с режимами, приведенными ранее.

При проведении испытаний на усталость, было установлено, что разрушение исходного образца наступает при значении $(267 \pm 34) \times 10^3$ циклов, а после воздействия электронным пучком разрушение образца наступает при $(319 \pm 33) \times 10^3$ циклов, это указывает на то, что электронно-пучковая обработка увеличивает усталостную долговечность на 20%. Для проведения дальнейших исследований были выбраны образцы в двух состояниях — без воздействия электронным пучком и после электронно-пучковой обработки. Данные образцы показали следующее число циклов

до разрушения: 233×10^3 и 323×10^3 , следовательно, облучение интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия привело к увеличению усталостной долговечности исследуемого материала на 39% относительно необлученных образцов.

При проведении исследований было получено изображение усталостного излома, показанного на рис. 1. Анализируя полученные результаты, представленные на рис. 1, необходимо отметить, что усталостный излом имеет многослойное строение и характеризуется наличием поверхностного слоя (слой 1 на рис. 1с) толщиной (20 – 25) мкм, промежуточного слоя толщиной (50 – 55) мкм (слой 2 на рис. 1с) и основного объема материала (слой 3 на рис. 1с). В поверхностном слое идентифицируется подслой, примыкающий к поверхности облучения, характеризующийся наличием микропор (слой 1.1 на рис. 1с).

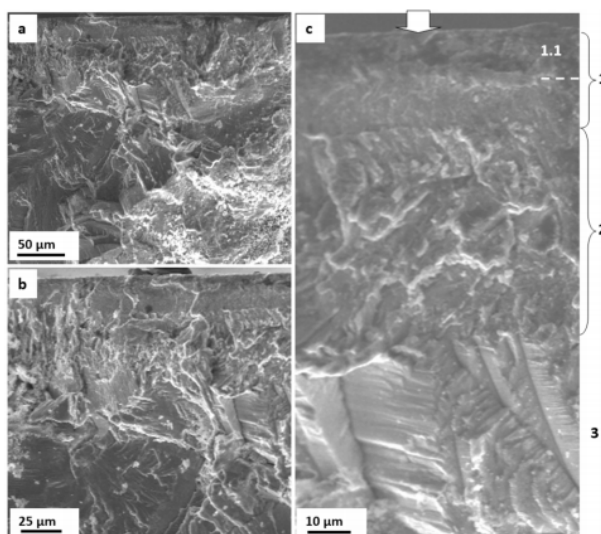


Рисунок 1 - Структура поверхности разрушения образца, подвергнутого облучению интенсивным электронным пучком и разрушенного при усталостном нагружении. На (с) стрелкой указана поверхность облучения.

Сканирующая электронная микроскопия

Численное решение задачи о нахождении температурного поля, формирующегося в поверхностном слое титана, облученного интенсивным электронным пучком, позволило высказать предположение о причинах образования слоистой структуры, выявленной при исследовании изломов, представленных на рис. 1. Установлено, что облучение титана пучком электронов при указанных параметрах приводит к плавлению поверхностного слоя.

Анализ результатов тепловых расчетов показал, что облучение титана интенсивным электронным пучком с параметрами 30 Дж/см^2 , 150 мкс в одноимпульсном режиме сопровождается образованием сравнительно тонкого поверхностного слоя.

Структура поверхностного слоя титана, облученного интенсивным импульсным электронным пучком и разрушенного в результате усталостных испытаний, существенным образом отличается от структуры, выявленной в титане, не подвергнутом предварительному облучению. А именно, по морфологическому признаку можно выделить тонкий поверхностный слой толщиной $\approx 5 \text{ мкм}$, в объеме зерен которого наблюдается субзеренная структура.

Поверхностный слой с пластинчатой субструктурой контактирует с промежуточным слоем, в объеме зерен которого выявляется дислокационная субструктура, представленная хаотически распределенными дислокациями, дислокационными клубками и дислокационными сетками; скалярная плотность дислокаций составляет $1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что подобная субструктура выявляется и в зернах разрушенных образцов, не подвергавшихся предварительному облучению интенсивным электронным пучком.

При сравнении результатов тепловых расчетов и результатов, полученных методами дифракционной электронной микроскопии, можно заключить, что поверхностный слой с пластинчатой структурой сформировался в результате высокоскоростной кристаллизации титана, имеющей место при электронно-пучковой обработке.

При анализе было установлено, что воздействие интенсивным импульсным электронным пучком на образцы титанового сплава ВТ1-0 приводит к увеличению усталостной долговечности в среднем на 20%.

При помощи методов просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выявлено, что разрушенные образцы, предварительно подвергнутые обработке электронными пучками, имеют многослойное строение и характеризуются наличием поверхностного слоя толщиной (20 – 25) мкм, промежуточного слоя толщиной (50 – 55) мкм и основного объема материала.

Теоретическими расчетами установлено, что облучение титана пучком электронов приводит к образованию тонкого поверхностного слоя толщиной 25,2 мкм, образующегося в результате высокоскоростной кристаллизации расплава.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показано, что структура поверхностного слоя титана, облученного импульсным электронным пучком и разрушенного в результате усталостных испытаний, существенным образом отличается от структуры, выявленной в титане, не подвергнутом предварительному облучению.

Субзерна имеют глобулярную форму, размеры их изменяются в пределах (500 – 700) нм. На большем удалении от поверхности облучения в слое толщиной (20 – 25) мкм в объеме зерен выявляется субструктура пластинчатого типа.

Список литературы.

1. Мухаметрахимов, М.Х. Твердофазная свариваемость листов титанового сплава ВТ6 при пониженной температуре / М.Х. Мухаметрахимов. // Письма о материалах. – 2015. – № 5(2). – С. 194-197.
2. Рамазанов, К. Н. Ионное азотирование титанового сплава ВТ6 в тлеющем разряде с эффектом полого катода / К.Н. Рамазанов, И.С. Рамазанов. // Вестник УГАТУ. – 2014. – № 2(63). – С. 41-46.
3. Betekhtin, V.I. Experimental and theoretical study of multiscale damage-failure transition in very high cycle fatigue / V.I. Betekhtin. и др. // Physical Mesomechanics. – 2017. – № 20(1). – С. 78-89.
4. Ерубаев, Е.А. Влияние микродугового оксидирования на усталость титанового сплава ВТ6 / Е.А. Ерубаев и др. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 2575-2579.