

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XV РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

18–20 мая 2016 г., г. Томск, Россия

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2016

Изменение структуры и кратерообразование в сплаве TiNi, вызванные воздействием импульсного электронного пучка

*В.О. Сёмин, С.Н. Мейснер, С.Л. Гирсова,
Е.Ю. Гудимова, Е.В. Яковлев*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, г. Томск
Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, г. Томск
E-mail: werder1@sibmail.com

Structure and crater formation in the TiNi alloy induced by pulsed electron beam treatment

V.O. Semin, S. N. Meisner, S.L. Girsova, E.Y. Gudimova, E.V. Yakovlev

National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 634055, Tomsk

Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Tomsk

E-mail: werder1@sibmail.com

Сплавы на основе никелида титана (TiNi), обладающие эффектом памяти формы широко применяются для изготовления медицинских имплантатов. Одним из эффективных способов улучшения поверхностных свойств имплантатов является обработка поверхности низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП). Основным недостатком обработки НСЭП является кратерообразование на поверхности образца, повышающее ее шероховатость, создающее зоны с неоднородным распределением упругих напряжений. Это повышает риск коррозионных повреждений и образования микротрещин при знакопеременных нагрузках. Поэтому целью работы является изучение процессов кратерообразования на поверхности и микроструктуры поверхностного слоя TiNi при различных параметрах обработки НСЭП.

Материалом исследования является сплав TiNi марки ТН1 (ЗАО «МАТЭКС»). Образцы TiNi в виде пластинок 10×15×1 мм вырезаны электроэрозионным методом. Химический состав сплава: Ti–55,08Ni–0,051C–0,03O–0,002N (вес. %), температура начала обратного мартенситного превращения $A_s = 303$ К. Проводили последовательно химическую очистку, электролитическую полировку поверхности образцов. Обработка НСЭП образцов TiNi проводилась на электронно-пучковой установке «РИТМ-СП» (ООО «Микросплав») при режимах: давление в камере $P_{Ar} \sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па, ускоряющее напряжение $U = 12\text{--}25$ кВ, плотность энергии $E_S = 1,3\text{--}3,4$ Дж/см²,

количество импульсов $n = 1, 2, 32$. Исследования структуры поверхностного слоя проводили на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

Сплав TiNi в исходном состоянии характеризовался зеренной структурой матричной B2-фазы с включениями частиц (окси)карбидов TiC и TiC(O) размером 1–10 мкм. После обработки НСЭП при $n = 1$ и $E_S = 1,3$ Дж/см², близкой к порогу плавления TiNi ($E_S = 1,5$ Дж/см²), обнаруживались микрократеры, что свидетельствует о локальном плавлении на поверхности. Топографические исследования показали, что микрократеры имеют диаметр ~ 20–30 мкм при глубине ~ 0,5–1 мкм, их форма близка к равноосной. Часть из них содержала в центре остатки включений, другая имела округлое дно без признаков включений. Было сделано заключение, что причина появления кратеров обусловлена локальным плавлением материала в местах расположения включений / частиц TiC и TiC(O). Увеличение плотности энергии НСЭП до $E_S = 2,5$ Дж/см² при $n = 2$ приводит к росту температуры, увеличению толщины и времени жизни расплава на поверхности образца. Наблюдаются следы интенсивного оплавления поверхности с многочисленными микрократерами, размеры которых достигали ~ 60–90 мкм в диаметре и ~ 3,5–5 мкм в глубину. Эти эффекты можно связать с объединением мелких микрократеров, формирующихся на мелких включениях, в более крупные микрократеры с созданием общей поверхности с минимумом свободной энергии. Все кратеры имеют одинаковую форму, близкую к округлой, с более пологим дном и ровными краями. Следов включений на поверхности облучения обнаружено не было. Увеличение шероховатости поверхности более чем в два раза по сравнению с исходным материалом и заметное увеличение плотности (размеров) кратеров свидетельствуют об интенсивном жидкофазном растворении частиц TiC(O), ответственных за кратерообразование. Рост числа импульсов приводит к снижению плотности микрократеров. В сплаве, подвергнутом импульсному плавлению при плотности энергии $E_S = 3,4$ Дж/см² при $n = 32$, реализуется безкратерный режим обработки НСЭП. Микрорельеф поверхности имеет квазипериодическую структуру с меньшей шероховатостью, чем при двух импульсах воздействия.

Результаты исследования микроструктуры модифицированных облучением слоев показали, что уже при однократном облучении формируется многослойная система, включающая слой со столбчатой структурой, ориентированной перпендикулярно поверхности, зону термического влияния (ЗТВ) и слой, подвергнутый воздействию термических напряжений. Фазовый состав представлен в основном фазой B2 с небольшим содержанием (окси)карбидных частиц и мартенсита.

Толщина переплавленного слоя менее 1 мкм, что соответствует толщине слоя со столбчатой структурой. В ЗТВ на глубине 1–2 мкм имеет место дефектная структура с признаками двойникования и следами мартенситных превращений, в более глубоких слоях присутствуют отдельные ламели мартенсита. Выявлены границы залегания двух встречных фронтов кристаллизации: верхний расположен на глубине 100–200 нм, а нижний – на глубине ~ 6 мкм от поверхности (рис. 1, а, б).

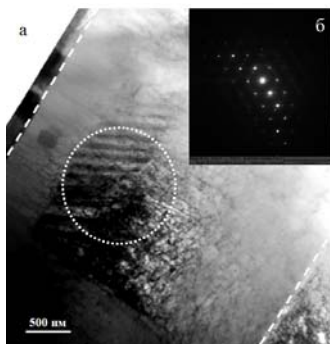


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя TiNi (обработка НСЭП: $E_s = 3,4 \text{ Дж/см}^2$, $n = 32$): а – пунктирные линии – границы фронтов кристаллизации, область с кристаллами R-мартенсита выделена кругом; б – микродифракция от R-фазы

Под облученной поверхностью на глубине ~0,3 мкм располагается слой с кристаллами R-мартенсита (рис. 1). На глубине 2–6 мкм располагается слой со столбчатой структурой, в котором наблюдается развитая дислокационная структура. Имеет место ориентированный рост столбчатых кристаллов фазы В2 с текстурой роста $\langle 110 \rangle$, перпендикулярной поверхности. Между отдельными столбцами обнаружена большеугловая ($>15^\circ$) разориентация.

Таким образом, в результате импульсных воздействий НСЭП на поверхность образца TiNi в его приповерхностных слоях формируется градиентная микроструктура. Экспериментально установлено, что неметаллические включения (частицы оксикарибидов TiC(O)) являются центрами зарождения кратеров на поверхности. Удаление этих включений приводит к выглаживанию поверхности и изменению химического состава в приповерхностной области.

Авторы выражают благодарность за активное участие и помощь в работе профессорам Л.Л. Мейснер, В.П. Ротштейну, Г.Е. Озуру, Т.М. Полетике и А.Б. Маркову.

Работа выполнена по проекту РНФ № 15-13-00023 (от 18.05.2015).