ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

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

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/181

**ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И ТВЁРДОСТИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА TiNi В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА
ИМПУЛЬСОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

¹Дьяченко Ф.А., ²Атовуллаева А.А., ³Яковлев Е.В., ^{1,2}Мейснер Л.Л.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

³*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

Неоднородность поверхности металлических материалов, связанная с наличием частиц вторых и примесных фаз, может приводить к ухудшению физико-механических свойств. Это важно учитывать, если речь идёт об использовании сплава на основе никелида титана (TiNi сплав), обладающего функциональными свойствами на основе эффектов памяти формы и сверхэластичности (ЭПФ-СЭ). На сегодняшний день изделия из данного сплава активно применяются в сфере микроэлектромеханических систем – МЭМС-технологий [1].

Одним из способов очищения поверхности от частиц вторых и примесных фаз является облучение импульсным низкоэнергетическим (10–30 кэВ) сильноточным (10–25 кА) электронным пучком (НСЭП). Однако данный вид обработки поверхности не всегда положительно влияет на интегральные механические свойства TiNi сплава. Это связано, в частности с тем, что модифицированные микронные поверхностные слои могут являться концентраторами остаточных упругих напряжений, наличие которых может негативно сказываться на функциональные свойства сплава – ЭПФ-СЭ.

Целью данной работы является исследование изменения морфологии поверхности и твёрдости поверхностного слоя сплава TiNi в зависимости от числа импульсов воздействия электронным пучком.

В данной работе использовали образцы размерами 10×10×1 мм, вырезанные методом лазерной резки из горячекатаного листового проката, изготовленного из промышленного сплава на основе TiNi марки ТН1 (ООО «Промышленный центр МАТЕК-СПФ», Россия). Сплав выплавлен методом вакуумной индукционной плавки в печи с графитовым тиглем. Химический состав сплава: Ti-55,08 Ni-0,051 C-0,03 O-0,002 N (вес. %). Исходные поверхности всех образцов перед облучением подготовлены следующим образом: пошаговая механическая шлифовка/полировка до «зеркального блеска» на шлифовально-полировальном станке *Saphir 550 (ATM GMBH, Германия)*; электролитическая полировка в растворе кислот (3 ч. CH₃COOH + 1 ч. HClO₄); промывка в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой ($t = 15$ мин). Модификацию поверхности образцов TiNi сплава проводили на автоматизированной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП» (ООО «Микросплав, Россия, Томск) [2]. Плотность энергии электронного пучка $E_s = 1,7$ Дж/см²; длительность импульса $\tau = 2–2,5$ мкс; число импульсов воздействия $n = 5$ и $n = 15$.

Исследование морфологии поверхности образцов до и после обработки пучком заряженных частиц проводили на оптическом микроскопе *Axiovert 200MAT (Zeiss, Германия)* (ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, Россия, Томск) с использованием методов оптического светлого поля (ОСП) и дифференциального интерференционного контраста (ДИК). Исследование топографии поверхности проводили на оптическом интерференционном профилометре *New View 6200 (Zygo, Германия)* (ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, Россия, Томск). В качестве основного измеряемого параметра, используемого для установления корреляционных зависимостей, был выбран параметр средней шероховатости поверхности R_a , рассчитанный в соответствии с нормами и рекомендациями ГОСТа 2789-73 [3]. Для измерения динамической микротвёрдости H_{OP} использовали нанотвердомер *Nano Hardness Tester (CSM NHT, Швейцария)* (ЦКП НИИ ЯФ ТПУ, Россия, Томск). Расчет параметра микротвёрдости H_{OP} проводился по методике Оливера-Фарра [4].

Методами оптической микроскопии и интерференционной профилометрии установлено, что морфология поверхности образцов TiNi сплава в результате НСЭП-обработок приобретает

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

кратерообразный рельеф. Установлено, что при числе импульсов $n = 5$, коэффициент шероховатости R_a равен $(0,07 \pm 0,01)$ мкм, и близок к величине параметра для исходного образца $R_a = (0,06 \pm 0,01)$ мкм. При значении числа импульсов $n = 15$ параметр шероховатости R_a значительно уменьшается, и равен $(0,03 \pm 0,01)$ мкм. Методом наноиндентирования установлено, что в образцах после НСЭП-обработок наблюдается увеличение параметра микротвердости H_{OP} . При числе импульсов воздействия $n = 5$, значительное упрочнение материала происходит на глубине до ~ 500 нм, а при $n = 15$ – до ~ 1000 нм. На глубине более $\sim 1,5$ мкм параметр микротвердости H_{OP} после НСЭП-обработок принимает значения, соответствующие величине параметра микротвёрдости материала TiNi-подложки до обработок.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В результате электронно-пучковой обработки на поверхности TiNi сплава формируется кратерообразный рельеф.
2. При числе импульсов $n = 15$ параметр шероховатости R_a уменьшился в 2 раза, при $n = 5$ параметр шероховатости R_a близок к значениям для исходного образца.
3. Установлено, что в образцах после НСЭП-обработок в зависимости от числа импульсов воздействия электронным пучком n , толщина модифицированного слоя, в котором наблюдается упрочнение, возрастает при увеличении числа импульсов воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ №18-19-00198 от 26.04.2018).

1. Mohd J.J., Leary M., Subic. A., Gibson A.M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials and Design. 2014. № 56. P. 1078–1113.
2. Марков А.Б., Миков А.В., Озур Г.Е., Падей А.Г. Установка РИТМ-СП для формирования поверхностных сплавов // ПТЭ. 2011. №6. С. 122–126.
3. ГОСТ 2789–73, Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики // М. : Стандартиформ. 2005. 7 с.
4. Pharr G.M., Oliver W.C. Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation // MRS Bulletin. 1992. Vol. 17. P. 28–33.