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: 10.17223/9785946218412/255

**ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА TiNi В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА
ИМПУЛЬСОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

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

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

²*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

³*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

Эффективным способом модификации механических и физико-химических свойств поверхностных слоёв металлических материалов является обработка их поверхности импульсным низкоэнергетическим (10–30 кэВ) сильноточным (10–25 кА) электронным пучком (НСЭП). Большой интерес представляют исследования влияния НСЭП-обработок на изменения поверхностных свойств сплава на основе никелида титана (TiNi сплав), обладающего функциональными свойствами на основе эффектов памяти формы и сверхэластичности (ЭПФ-СЭ). Однако НСЭП-обработка не всегда положительно влияет на интегральные механические и функциональные свойства TiNi сплава. В частности, это связано с тем, что в модифицированных микронных поверхностных слоях возникает столбчатая структура, ориентированная перпендикулярно поверхности обработки. В исследованиях физико-химических свойств поверхностных слоёв TiNi сплава было обнаружено, что в результате НСЭП-обработок происходит селективное испарение никеля с поверхности. Этот факт необходимо учитывать на основании того, что изменение химического состава в никелиде титана может приводить к смещению температурных интервалов мартенситных превращений, обуславливающих наличие неупругих эффектов (ЭПФ-СЭ). Для контроля химического состава, в данном исследовании проводится модернизация способа анализа физико-химических свойств методом электронной Оже-спектроскопии (ЭОС).

На основании вышесказанного целью данной работы являлось – исследование изменения механических и физико-химических свойств поверхностных слоёв сплава TiNi в зависимости от числа импульсов воздействия электронным пучком.

Для исследований использовали образцы размерами 10×10×1 мм, которые были вырезаны методом лазерной резки из горячекатаного листового проката, изготовленного из промышленного сплава на основе TiNi марки ТН1 (ООО «Промышленный центр МАТЕК-СПФ», Россия). 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: 1) пошаговая механическая шлифовка/полировка до «зеркального блеска» на шлифовально-полировальном станке *Saphir 550* (ATM GMBH, Германия) с постепенным уменьшением зернистости абразива (P120, P320, P600, P1200); 2) электролитическая полировка в растворе кислот (3 ч. CH₃COOH + 1 ч. HClO₄); 3) 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) в режиме поверхностного плавления. 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 механических свойств поверхностных слоёв образцов TiNi сплава после НСЭП-обработок проводили методом инструментального наноиндентирования на установке *Nano Hardness Tester* (CSM, Швейцария) ЦКП НИИ ЯФ ТПУ (Россия, Томск). По полученным *P-h* диаграммам с использованием методики Оливера-Фарра были определены значения динамической («невосстановленной») твёрдости H_{IT} и модуля Юнга E_{IT} . Склонность материала необратимо деформироваться под действием нагрузки оценивали, используя параметр пластичности δ_n . Функциональные свойства на эффект сверхэластичности, оценивали, используя параметр η , характеризующий степень неупругого восстановления отпечатка индентора.

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

Анализ физико-химических свойств поверхностных слоёв образцов TiNi сплава после НСЭП-обработок проводили с помощью модернизированного Оже-электронного спектрометра «09ИОС-10-005» (ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, Россия Томск), позволяющего сразу получать Оже-спектры в виде интегральных зависимостей числа регистрируемых электронов N от их энергии E . Спектрометр обеспечивал регистрацию Оже-электронов с разрешением по энергии $\Delta E = 0,75\%$. Величина предельного остаточного давления $P \approx 1,33 \cdot 10^{-7}$ Па. Энергия первичного электронного пучка составляла 3 кэВ, диаметр пучка - ~ 10 мкм. В ходе регистрации Оже-электронов получали зависимости дифференциального вида $dN(E)/dE$. В результате аналитического восстановления из спектров $dN(E)/dE$ получали интегральные зависимости $N(E)$ -1. Независимо от этого, регистрировали Оже-спектры – $N(E)$ -2.

Исследования механических свойств методом инструментального наноиндентирования показали, что модификация поверхности приводит к изменению механических свойств по глубине от поверхности облучения. Установлено, что после НСЭП-обработки с числом импульсов воздействия $n = 5$ в поверхностном слое толщиной до ~ 500 нм произошло изменение свойств: $E_{IT} \approx 60$ ГПа, $H_{IT} \approx 5,5$ ГПа, $\delta_H \approx 40\%$ (относительно параметров образца TiNi до НСЭП-обработок $E_{IT} = 60$ ГПа, $H_{IT} = 4$ ГПа, $\delta_H \approx 48\%$). При $n = 15$ изменение свойств достигают глубины до ~ 1000 нм, где значение параметров, описывающих механические свойства, изменяются следующим образом: E_{IT} от ~ 100 до ~ 55 ГПа, H_{IT} от $\sim 5,2$ до $\sim 2,5$ ГПа, $\delta_H \approx 65\%$. В обоих случаях НСЭП-обработок степень неупругого восстановления формы отпечатка в поверхностном слое на глубине более ~ 1000 нм понизилась не более чем на $\sim 10\%$.

Установлено, что в результате аналитического восстановления спектров $dN(E)/dE$ к интегральному виду $N(E)$ -1 происходит искажение получаемого результата. Так, сравнение интегральных зависимостей, полученных экспериментально $N(E)$ -2 и в ходе аналитического восстановления $dN(E)/dE \rightarrow N(E)$ -1, показало несоответствие формы основных спектральных линий. Более того, Оже-линии слабой интенсивности, которые отчётливо наблюдаются на зависимостях $dN(E)/dE$, полностью исчезают на аналитически восстановленных спектрах $N(E)$ -1.

Сравнение экспериментально полученных Оже-спектров $N(E)$ -2 с дифференциальными показало, что на спектрах $N(E)$ -2 величина Оже-линий по интенсивности и их форма с некоторой долей ошибки совпадают с поведением Оже-линий в дифференциальном виде $dN(E)/dE$. Однако, на экспериментально полученных Оже-спектрах $N(E)$ -2, наблюдается совокупность беспорядочно распределённых пиков (шум), физическую природу которых планируется установить и устранить в запланированных исследованиях.

Результаты, обсуждаемые в данной работе, показали, что возможно экспериментальное получение интегральных зависимостей Оже-спектров $N(E)$ -2.

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