

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ С ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ ВБЛИЗИ ПОРОГА ПЛАВЛЕНИЯ TiNi**

**Нейман А.А.<sup>1</sup>, Семин В.О.<sup>1</sup>, Мейснер Л.Л.<sup>1,2</sup>, Миронов Ю.П.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, Томск, Россия  
nasa@ispms.ru*

Повышение коррозионной стойкости медицинских материалов, к которым относятся сплавы на основе никелида титана, является актуальной задачей инженерии поверхности. Как показали многочисленные исследования, воздействие низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП) вызывает сверхбыстрые термические процессы, улучшающие физико-химические и прочностные свойства обрабатываемого материала. Использование такого метода обработки материала приводит к изменению химического состава, структурного и напряженно-деформированного состояний поверхностной области, что может снизить величину проявления эффектов сверхэластичности и памяти формы конечного изделия из TiNi. Использование НСЭП обработки с плотностью энергии, соответствующей порогу плавления обрабатываемого материала, позволит минимизировать влияние поверхностного модифицированного слоя на функциональные свойства.

Ранее проведенные численные расчеты [1] позволили определить значение плотности энергии НСЭП, при которой начинается плавление TiNi сплава, равное  $E_s = 2$  Дж/см<sup>2</sup>. В работе [2] при исследованиях сплава TiNi после НСЭП обработки с плотностями энергии ЭП в диапазоне  $E_s = 1-2$  Дж/см<sup>2</sup> действительно наблюдалось плавление тонкого поверхностного слоя материала, структура которого детально не была изучена. Цель данной работы – исследовать структуру поверхностного слоя, которая формируется в результате импульсного воздействия электронным пучком с плотностью энергии вблизи теоретически рассчитанного порога плавления TiNi.

Образцы для исследования вырезали из прокатного листа сплава TiNi (ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», Россия), готовили химическим травлением, механической шлифовкой и электролитической полировкой. НСЭП обработку провели на автоматизированной установке РИТМ-СП (Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия) при параметрах электронного пучка:  $E_s = 1,1$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса – 2-3 мкс, энергия электронов – 19 кэВ, количество импульсов 5 и 15, выдержка между импульсами составила 10 с.

Исследования структуры поверхностного слоя до и после электронно-пучковых воздействий проведены на оборудовании центра коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН. Рентгеноструктурный анализ (РСА) выполнен на дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) в Co-K $\alpha$  излучении. Электронно-микроскопические исследования выполнены на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM 2100 (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Подготовка тонких фольг в геометрии “cross-section” с доведением на установке ионного травления EM 09100IS (JEOL, Япония) позволяет исследовать эволюцию микроструктуры по глубине от поверхности. Определение элементного состава выполнено с помощью энерго- и волнодисперсионных спектрометров INCA Energy (Oxford Instruments, Великобритания), которыми оснащены ПЭМ и сканирующий электронный микроскоп EVO 50 (Цейс, Германия).

Проведены структурные исследования материала в состоянии поставки (после подготовки исходного состояния поверхности), а также после электронно-пучковых воздействий при разном количестве импульсов. Установлено изменение зеренной структуры в поверхностном слое облученных образцов – крупнокристаллическая структура исходного материала (рисунок 1 а) меняется на наноразмерную столбчатую структуру (рисунок 1 б-д). Установлена корреляция между режимами облучения и

геометрическими и структурными параметрами сформировавшейся структуры. В докладе обсуждаются изменения элементного и фазового состава, особенности тонкой структуры и толщина модифицированного электронным пучком слоя.

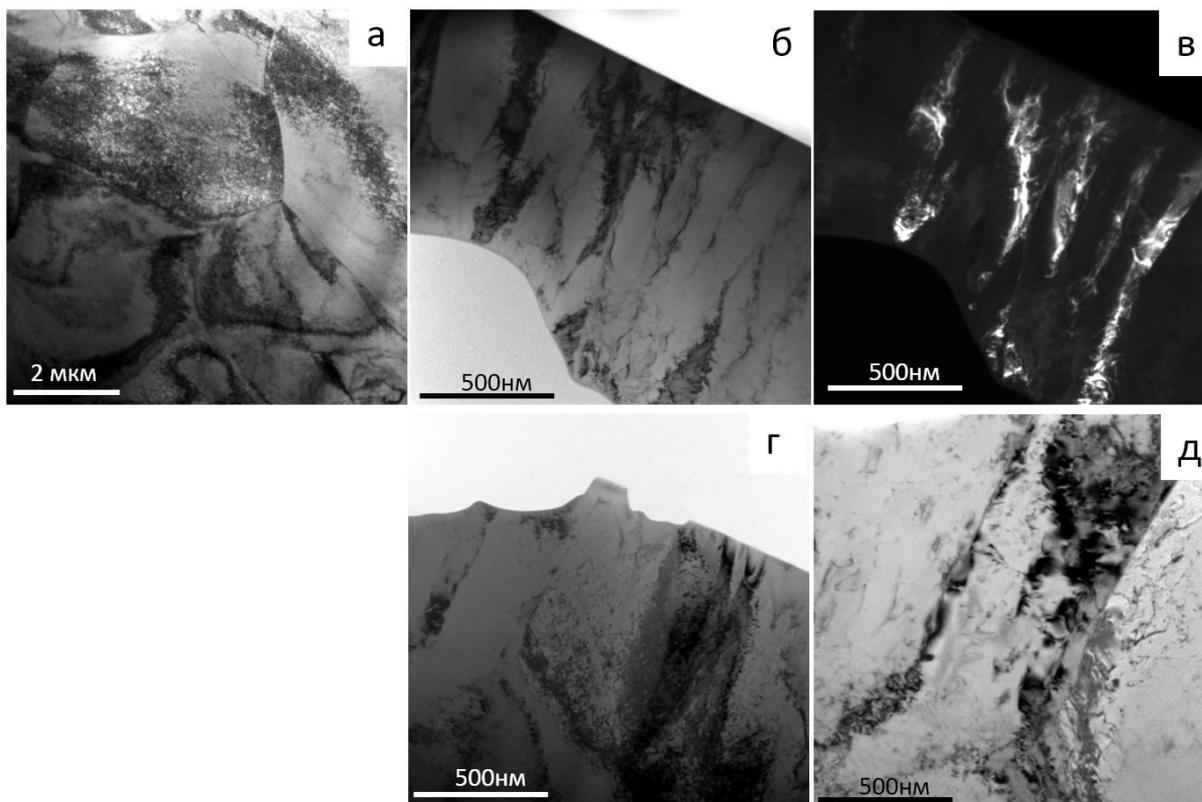


Рисунок 1 - Светлопольные (а, б, г, д) и темнопольное (в) электронно-микроскопические изображения приповерхностных областей никелида титана в состоянии поставки (а) и после 5 (б, в) и 15 (г, д) импульсов электронно-пучкового воздействия

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект III.23.2.1). Электронно-пучковая обработка поверхности образцов выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 18-19-00198 (от 26.04.2018 г.).*

#### Литература

1. Распределение температуры в образце с микроскопическим включением второй фазы при облучении низкоэнергетическим импульсным сильноточным электронным пучком Д.А. Шепель, А.Б. Марков // Письма в ЖТФ, 2017, том 43, вып. 3. DOI: 10.21883/PJTF.2017.03.44221.16301.
2. Effect of nonmetallic and intermetallic inclusions on crater formation on the surface of TiNi alloys under the electron-beam impact L.L. Meisner, V.P.Rotshtein, A.B.Markov, et. // Procedia Structural Integrity Volume 2, 2016, Pages 1465-1472 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.186>.