

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОВЕРХНОСТНЫХ Ti-Ta-СПЛАВОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА TiNi-ПОДЛОЖКЕ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО СИНТЕЗА**

¹Дьяченко Ф.А., ¹Мейснер С.Н., ²Яковлев Е.В., ¹Мейснер Л.Л.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

²Институт сильноточной электроники СО РАН,

г. Томск, Россия, E-mail: frozenonetroll@mail.ru

Введение. Сплавы на основе TiNi относятся к классу функциональных материалов, которые обладают способностью восстанавливать первоначально заданные форму и размеры благодаря эффектам памяти формы и сверхэластичности (ЭПФ-СЭ). Применение миниатюрных изделий (*микроактуаторов*) с неупругими эффектами в микроэлектромеханических системах позволяет решать множество нетривиальных задач, возникающих перед инженерами в сфере МЭМС-технологий [1].

Однако вопрос о состоянии функциональных и механических свойств и способах их улучшения не перестаёт представлять актуальность в физике упрочнения поверхности миниатюрных металлических материалов. В данной работе представлены результаты оценки функциональных и механических свойств многослойных нанокompозитных поверхностных структур, сформированных на подложке сплава TiNi посредством осаждения легирующих компонентов и последующим их импульсным плавлением низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП). Благодаря комбинированной обработке на поверхности миниатюрного изделия можно сформировать тонкий слой, часто называемый в литературе поверхностным сплавом (ПС) [2]. Тем не менее, модификация поверхности миниатюрных изделий из TiNi сплавов не всегда положительно влияет на интегральные свойства исходного материала. В связи с этим необходимо при улучшении прочностных характеристик поверхности учитывать влияние обработок на такие важные функциональные свойства, как ЭПФ-СЭ.

Цель данной работы – оценить функциональные и механические свойства поверхностных Ti-Ta-сплавов, сформированных на TiNi-подложке методом электронно-пучкового синтеза.

Материал, методы обработки и исследования. В данной работе использовались образцы размерами 10×10×1 мм, которые были приготовлены методом электроэрозионной резки из пластины, изготовленной из промышленного сплава на основе TiNi марки TN1 (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. %). Методика приготовления поверхности образцов TiNi-подложки подробно представлена в работе [3].

Формирование поверхностных Ti-Ta сплавов на TiNi-подложке осуществляли в едином вакуумном цикле на модифицированной автоматизированной установке «РИТМ-СП» (ООО «Микросплав», Россия) [2]. Подробное описание режимов осаждения Ti-Ta плёнок и последующее их НСЭП-плавление детально описаны в работе [4]. Для формирования поверхностных сплавов использовали плёнки двух составов: Ti₇₀Ta₃₀ и Ti₆₀Ta₄₀ (ат. %), толщина которых составляла ~50 нм. Число циклов «осаждения + импульсное плавление» составляло $N = 20$ и $N = 30$ соответственно, так, чтобы расчётная толщина поверхностного сплава не превышала ~1 и ~1,5 мкм. Далее поверхностные слои, синтезированные в описанных режимах, обозначены как Ti₇₀Ta₃₀/TiNi и Ti₆₀Ta₄₀/TiNi соответственно.

Исследование функциональных и механических свойств поверхностных Ti-Ta-сплавов на TiNi-подложке методом динамического наноиндентирования было проведено на установке Nano Hardness Tester (CSM, Швейцария) ЦКП НИИ ЯФ ТПУ (Россия, Томск). По полученным $P-h$ диаграммам с использованием методики Оливера-Фарра [5] были определены значения динамической («невосстановленной») твёрдости H_{OR} и модуля Юнга E .

Параметр пластичности δ_H поверхностного слоя, который характеризует склонность материала необратимо деформироваться под действием нагрузки, оценивали, используя методологию [6]. Функциональные свойства поверхностного слоя оценивали, используя параметр η , характеризующий степень неупругого восстановления отпечатка индентора [7].

Результаты и их обсуждение. Функциональные и механические свойства поверхностных слоёв материала подложки и образцов с поверхностным Ti-Ta-сплавом разного состава проиллюстрированы на рисунке 1 в виде зависимостей динамической твёрдости H_{OP} (а), модуля Юнга E (б), параметра пластичности δ_H (в) и степени неупругого восстановления отпечатка η (г) от максимальной глубины проникновения нагруженного индентора h_{max} при изменении значения нагрузки P от 5 до 300 мН.

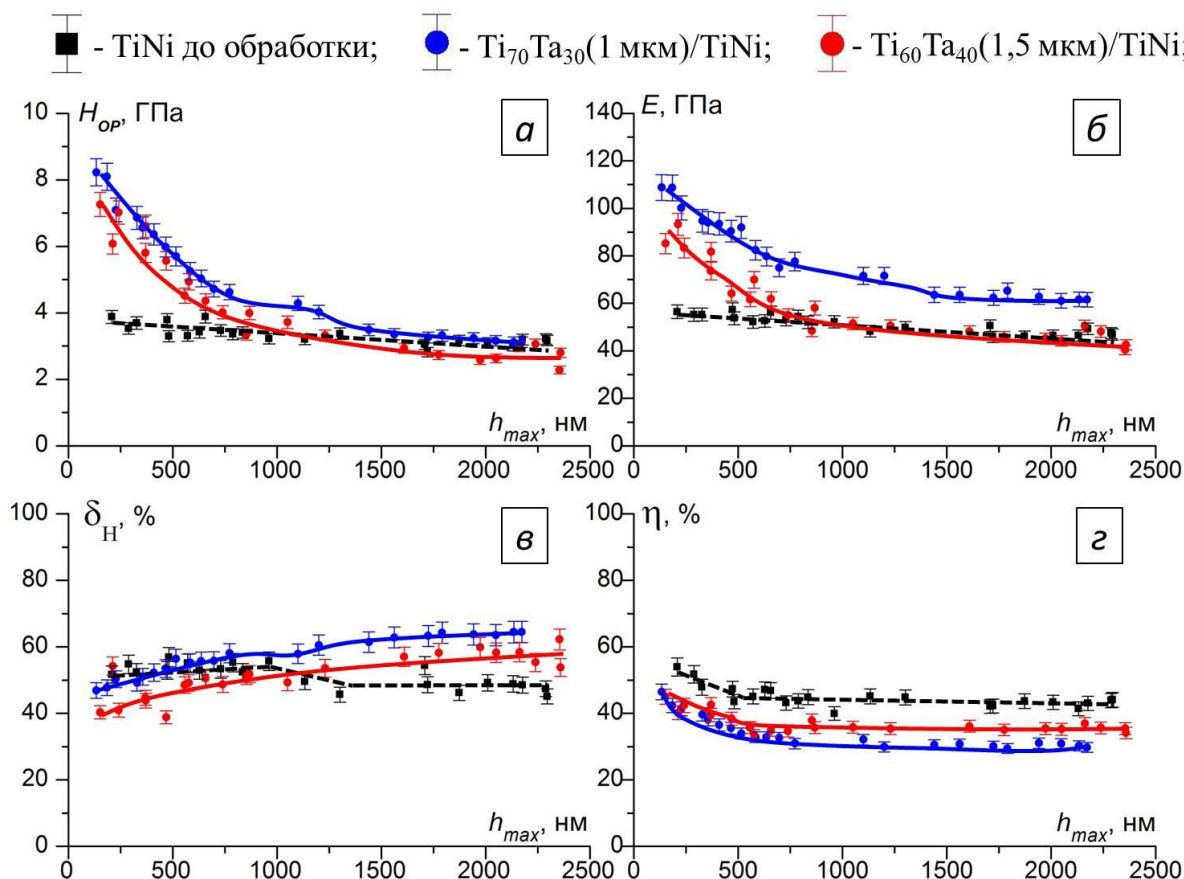


Рисунок 1 – Зависимости динамической твёрдости H_{OP} (а), модуля упругости E (б), характеристики пластичности δ_H (в) и степени восстановления отпечатка η (г) от максимальной глубины проникновения индентора h_{max} в образцах TiNi до и после формирования поверхностных Ti-Ta сплавов разного состава

Модификация поверхности сплава TiNi привела к градиентному изменению функциональных и механических характеристик. В поверхностном слое толщиной не более ~700 нм градиент их изменения больше, чем в подслое, расположенном на глубине большей расчётной толщины поверхностных сплавов, то есть на глубине более ~1 и ~1,5 мкм соответственно. Видно, что градиент изменения свойств поверхностного сплава Ti₆₀Ta₄₀/TiNi плавный и продолжительный (более ~1 мкм) в отличие от Ti₇₀Ta₃₀/TiNi.

Сравнение механических свойств поверхностных сплавов разного состава показало, что вблизи поверхности (на глубине до ~500 нм) параметры отличаются:

$$\begin{aligned} \text{Ti}_{70}\text{Ta}_{30}/\text{TiNi}: & \quad H_{OP} \approx (7 \pm 1) \text{ ГПа}, & E \approx (95 \pm 5) \text{ ГПа} & \quad \delta_H \approx 50\%. \\ \text{Ti}_{60}\text{Ta}_{40}/\text{TiNi}: & \quad H_{OP} \approx (6 \pm 1) \text{ ГПа}, & E \approx (75 \pm 15) \text{ ГПа} & \quad \delta_H \approx 45\%. \end{aligned}$$

Данные параметры становятся близки между собой по величине на глубине ~1,5 мкм, стабилизируются и не изменяют своих значений.

На рисунке 1а приведены результаты зависимости степени восстановления формы отпечатка индентора от его максимальной глубины проникновения $\eta(h_{max})$. Как видно, величина формовосстановления η плавно изменяется внутри слоя толщиной более ~2 мкм в обоих случаях обработки. Наличие поверхностных сплавов привело к понижению параметра η в модифицированных слоях (на глубине до ~1 мкм) не более чем на 10%. В нижележащих подслоях (на глубине более ~1 мкм) параметр η остаётся постоянным и меньшим, чем в поверхностном слое, не более чем на ~5%.

Заключение. Электронно-пучковый синтез поверхностных Ti-Ta сплавов, различных по толщине и составу на TiNi-подложке, приводит к градиентному изменению механических параметров, которые отличны друг от друга, однако становятся близки между собой по величине на глубине более ~1,5 мкм. Представленная модификация поверхности приводит к изменению функциональных свойств TiNi сплава не более чем на 10%.

Формирование поверхностных Ti-Ta сплавов проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №18-19-00198 от 26.04.2018); исследование функциональных и механических свойств систем «поверхностный Ti-Ta сплав/TiNi подложка» выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.

Список литературы

1. Mohd J.J., Leary M., Subic A., Gibson A.M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Mater. Des. – 2014. – Vol. 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. Мейснер С.Н., Дьяченко Ф.А. Исследование физико-механических свойств и структуры поверхностных слоёв сплавов на основе никелида титана, сформированных облучением низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком // Избранные доклады IV Международной конференции студентов и молодых учёных. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та. – 2017. – С. 42–47.
4. Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Meisner L.L., Rotshtein V.P., Neiman A.A., D'yachenko F. Mechanical behavior of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by pulsed electron-beam melting of film/substrate system // Appl. Surf. Sci. – 2018. – Vol. 437. – P. 217–226.
5. Pharr G.M., Oliver W.C. Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation // MRS Bulletin. – 1992. – Vol. 17. – P. 28–33.
6. Milman Yu.P., Galanov B.A., Chugunova S.I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement // Acta Met. Mater. – 1993. – Vol. 41. – № 9. – P. 2523–2531.
7. Crone W.C., Shaw G.A., Stone D.S., Johnson A.D., Ellis A.B. Shape recovery after nanoindentation of NiTi thin films // Charlotte. NC. – 2003. – P. 1–6.