



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Сборник научных трудов
XVII Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

РОССИЯ, ТОМСК, 21 – 24 апреля 2020 г.

Том 1. Физика

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Abstracts
XVII International Conference of Students
and Young Scientists

RUSSIA, TOMSK, April 21 – 24, 2020

Volume 1. Physics

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО Ti-Ni-Ta-Si СПЛАВА,
ПОДВЕРГНУТОГО МЕТОДАМИ ЛОКАЛЬНОГО СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Ф.А. Дьяченко¹, А.А. Атовуллаева²

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Л.Л. Мейснер^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: froennonetroll@mail.ru

**INVESTIGATION OF THE DEFORMATION OF Ti-Ni-Ta-Si-BASED SURFACE ALLOY
SUBJECTED BY METHODS OF THE LOCAL STATIC LOADING**

F.A. D`vachenko¹, A.A. Atovullaeva²

Scientific Supervisor: Prof., Dr. L.L. Meisner^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

²Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: froennonetroll@mail.ru

Abstract. *This work shows a study on investigation of the deformation of Ti-Ni-Ta-Si-based surface alloy subjected by methods of the local static loading: micro-indentation and instrumented indentation. Our data suggest that the highly ductile Ti-Ni-Ta-Si-based surface alloy (characteristic of plasticity $\delta_H \approx 61\%$), possessing damping properties, can provide efficient dispersion of mechanical stress concentrations of various natures.*

Введение. В основе решения актуальной проблемы по созданию прочного слоя на поверхности функциональных сплавов лежит способ аддитивного тонко-плёночного электронно-пучкового синтеза поверхностных сплавов с аморфной и/или нанокompозитной структурой. Синтез поверхностных сплавов можно осуществить посредством импульсного плавления многокомпонентных аморфообразующих систем пленка/подложка с помощью широкоапертурного ($\sim 30 \text{ см}^2$) низкоэнергетического ($\leq 30 \text{ кэВ}$) сильнооточного электронного пучка (НСЭП) микросекундной длительности. Электронно-пучковая обработка позволяет осуществлять жидкофазное перемешивание компонентов систем пленка/подложка на глубине нескольких микрометров и последующую закалку из расплава со скоростью $\sim 10^9 \text{ К/с}$, что на ~ 3 порядка выше максимальных критических скоростей закалки при синтезе металлических стекол традиционными методами [1]. На сегодняшний день представленный способ теоретически обоснован и экспериментально реализован на следующих системах пленка/подложка: Cr/Cu [2], (Ti-Ta)/TiNi [3] и др. В данной работе для расширения возможностей применения способа аддитивного тонко-плёночного электронно-пучкового синтеза поверхностных сплавов выбрана система «Ti-Ta-Si-пленка /TiNi-подложка». Между тем, возникает задача определения влияния модификации поверхности TiNi-подложки на механические и функциональные свойства (ЭПФ-СЭ). Применение методов локального статического нагружения позволит оценить деформационное поведение модифицированных поверхностных слоёв и охарактеризовать влияние Si на механические свойства поверхностного сплава.

Цель данной работы – исследовать особенности деформационного поведения поверхностного Ti-Ni-Ta-Si сплава, подвергнутого методами локального статического нагружения.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили на образцах из сплава на основе никелида титана (TiNi). Подробное описание материала и этапы предварительных поверхностных обработок TiNi образцов представлено в работе [4]. Осаждение и плавление $Ti_{60}Ta_{30}Si_{10}$ (ат. %) пленок осуществляли на автоматизированной установке «РИТМ-СП» в едином вакуумном цикле. Толщина осаждаемой Ti-Ta-Si плёнки составляла 100 нм. Параметры импульсного НСЭП-плавления системы «Ti-Ta-Si-пленка / TiNi-подложка»: плотность энергии электронного пучка $E_s = 1.7 \pm 0.3$ Дж/см², продолжительность импульса $\tau = 2,1-2,6$ мкс, число импульсов в каждом цикле синтеза $n = 10$, число циклов $N = 10$. В результате синтеза на поверхности TiNi сплава сформирован поверхностный сплав (ПС TiNi-Ta₃₀Si₁₀), расчётная толщина которого не превышает ~1 мкм.

Исследования морфологии поверхности образцов до и после электронно-пучкового синтеза проводили на оптическом металлографическом микроскопе *Axiocvert 200MAT* (Zeiss, Германия) с использованием методов оптического светлого и тёмного полей (ОСП, ОТП), а также дифференциально-интерференционного контраста (ДИК). Исследование топографии поверхности проводили на оптическом интерференционном профилометре (ОИП) *NewView 6200* (Zygo, Германия). В качестве основного измеряемого параметра, используемого для установления корреляционных зависимостей, был выбран параметр средней шероховатости поверхности R_a , рассчитанный по ГОСТу 2789-73 [5]. Для исследований деформационного поведения, образовавшихся модифицированных поверхностных слоёв, на микротвердомере DM-8 (*Affi*, Италия) проведено локальное статическое нагружение при усилии на индентор равно $P = 1$ и 2 кгс. Морфологию поверхности с деформированной области исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO EVO 50 (Zeiss Германия) при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ, углы наклонов образца, относительно источника первичных электронов, составляли 30 и 45°. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (Россия, Томск). Оценка механических свойств поверхностных слоёв проведена методом инструментального индентирования на установке *NanoTest 600* (MicroMaterials Ltd, Великобритания) ЛМПКМ ИФПМ СО РАН (Россия, Томск). Описание применённых методов для анализа прочностных и упруго-пластических параметров представлено в работе [6].

Результаты. На рисунке 1а представлено РЭМ-изображение отпечатка на поверхности образца ПС TiNi-Ta₃₀Si₁₀, полученного в результате проведённого испытания на микротвердость. Методами ОИП и РЭМ, в образовавшихся отпечатках, при условиях нагружения $P_{max} = 1$ и 2 кгс, обнаружены трещины. На изображении, при угле наклона образца равно 45°, видно нетипичное образование трещин при индентировании пирамидой Виккерса. Так, при индентировании металлических материалов, наиболее вероятно зарождение трещины происходит в углах основания пирамиды в силу локализации высоких напряжений в результате сведения двух граней в одну точку. Методом ОИП установлено, что глубина трещин составляет от ~0,5 до ~1 мкм (рисунок 1б). Полученный результат даёт основание предполагать, что в ходе индентирования при максимальных условиях нагружения, близких к нагрузкам при испытаниях на макротвёрдость, происходит разрушение поверхностного сплава, структура которого расположена в области близлежащей к TiNi-подложке.

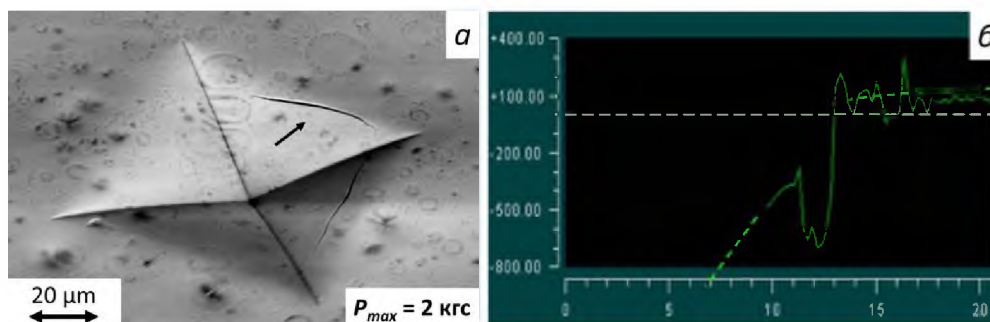


Рис. 1. РЭМ-изображение отпечатка на поверхности образца ПС TiNi-Ta₃₀Si₁₀ (а); профиль рельефа поперечного сечения трещины в обозначенной области (пунктиром представлено стандартное изменение профиля отпечатка) (б)

Закключение. Наличие высокой пластичности поверхностного сплава (характеристика пластичности $\delta_H \approx 61\%$), а также сопротивление росту трещин в ходе испытания локальным нагружением в широком диапазоне условий нагружения, может говорить о демпфирующих свойствах модифицированных поверхностных слоёв, рассеивающих механические напряжения различной природы, и таким образом, повышая время жизни материала до его разрушения.

Авторы благодарят м.н.с. ЛВЭ ИСЭ СО РАН Яковлева Е.В. – за проведение электронно-пучкового синтеза; д.ф.-м.н., с.н.с. ЛФПЯ ИФПМ СО РАН Шугурова А.Р – за проведение испытаний по оценке механических свойств поверхностного Ti-Ni-Ta-Si сплава; к.т.н., н.с. ЛМПИН ИФПМ СО РАН Неймана А.А. – за проведение электронно-микроскопических исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РФФ №18-19-00198 от 26.04.2018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глезер А.М., Шурыгина Н.А. Аморфно-нанокристаллические сплавы. – М.: Физматлит, 2014. – 450 с.
2. Markov A., Yakovlev E., Shepel' D., Bestetti M. Synthesis of a Cr-Su surface alloy using a low-energy high-current electron beam // Results Phys. – 2019. – Vol. 12. – P. 1915-1924.
3. Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Meisner L.L., Rotshtein V.P., Neiman A.A., D'yachenko F.A. 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.
4. Дьяченко Ф.А., Мейснер С.Н., Яковлев Е.В. Влияние плотности энергии электронного пучка на изменение физико-механических свойств поверхностного слоя никелида титана // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 136–138.
5. ГОСТ 2789–73, Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с.
6. D'yachenko F.A., Meisner S.N., Yakovlev E.A. Physicomechanical properties of Ti-Ta-based surface alloys synthesized on the NiTi shape memory alloy // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 511. – P. 012025(1-6).