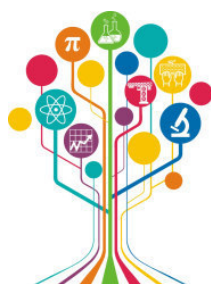


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Том 1. Физика

Сборник научных трудов
XVIII Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых
27–30 апреля 2021 г.

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Volume 1. Physics

Abstracts

XVIII International Conference of students, graduate students
and young scientists
April 27–30, 2021



Национальный
исследовательский
Томский
государственный
университет



Томск 2021

УДК 538.911; 538.951; 538.975

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ
TiNi СПЛАВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ НАКОНЕЧНИКА ИНДЕНТОРА**

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: frozenonetroll@mail.ru

**THE INVESTIGATION OF THE DEFORMATION BEHAVIOR OF THE SURFACE LAYERS OF
TiNi ALLOY DEPENDING ON THE SHAPE OF THE INDENTER'S TIP**

F.A. D'yachenko¹, A.A. Atovullaeva²

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

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,
Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

²Tomsk State University, Russia, Tomsk, 36, Lenin Ave, 634050

E-mail: frozenonetroll@mail.ru

Abstract. *This work shows a study on the investigation of the deformation behavior of the surface layers of TiNi alloy by the method of the local static loading – instrumented indentation. Our data suggest, that under loadings from 1 up to 300 mN, the deformation behavior of the surface layers of TiNi alloy, depending on the shape of the indenter's tip (Vickers and Berkovich), are corresponding to each other.*

Введение. При сопоставлении данных, полученных для одного и того же материала с использованием разных пирамидальных наконечников, в частности пирамид Виккерса (4-гранная алмазная пирамида, половинный угол при вершине $\theta_B = 68^\circ$) и Берковича (3-гранная алмазная пирамида, $\theta_B = 65,3$), возникает вопрос о сопоставимости экспериментальных результатов. Так для TiNi сплава в [1] установлено, что, независимо от формы наконечника индентора (Виккерса или Берковича), деформационные отклики в поверхностных слоях на глубине до ~ 1 мкм и характер изменения механических свойств подобны. На экспериментальных зависимостях твёрдости H и модуля упругости E от максимальной глубины индентирования h_{max} отмечено, что в зависимости от наконечника разность между значениями H и E на глубине до ~ 1 мкм не превышает ~ 1 ГПа и ~ 10 ГПа, соответственно. Однако на зависимостях $\delta_H(h_{max})$ и $\eta(h_{max})$ (δ_H – параметр пластичности, соответствующий доле пластической деформации в общей упругопластической [2], η – степень неупругого восстановления отпечатка за счёт эффекта сверхэластичности (СЭ) [3]), на глубине более ~ 1 мкм определено несоответствие значений до $\sim 10\%$ при испытании разными по форме наконечниками. Очевидно, что такое несоответствие может быть связано с различием напряжённо-деформированных состояний (НДС) на глубине более ~ 1 мкм.

Цель работы – с помощью детального анализа диаграмм $P-h$ «нагружения-разгрузки» определить и выявить причины несоответствия НДС в области индентирования TiNi сплава на глубине более ~ 1 мкм при использовании наконечников Виккерса и Берковича.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили на образцах TiNi сплава. Подробное описание материала и этапы предварительных поверхностных обработок TiNi-образцов представлено в работе [4]. Влияние упругих, неупругих и пластических механизмов возврата и накопления локальной деформации под индентором рассчитывали по глубинам проникновения индентора h в поверхностные слои материала в виде параметров $\epsilon_{упр}$, $\epsilon_{неупр}$, $\epsilon_{пласт}$, которые характеризуют доли возврата упругой и неупругой деформации, и накопление пластической деформации отпечатка индентора. Предел текучести σ_T рассчитан по методике [5].

Результаты. На рисунке 1(а-в) показаны зависимости деформационных вкладов на доли упругой – $\epsilon_{упр}$, неупругой – $\epsilon_{неупр}$ и пластической – $\epsilon_{пласт}$ составляющих при индентировании наконечниками Виккерса – 1 и Берковича – 2 от максимальной глубины индентирования h_{max} . Установлено, что на глубине до ~ 1 мкм доля возврата $\epsilon_{упр}$ составляет ~ 9 и $\sim 12\%$, на глубине более ~ 2 мкм – ~ 7 и $\sim 9\%$, для наконечников Виккерса и Берковича, соответственно (рисунок 1а). На данных глубинах доля возврата $\epsilon_{неупр}$ для наконечника Виккерса составляет от ~ 50 до $\sim 33\%$, для Берковича – от ~ 45 до $\sim 40\%$ (рисунок 1б). Доля накопления $\epsilon_{пласт}$ демонстрирует тот же характер изменения, как у параметра пластичности δ_H в этом материале [1]. На данных глубинах доля накопления $\epsilon_{пласт}$ для наконечника Виккерса составляет от ~ 45 до $\sim 60\%$, для Берковича – от ~ 43 до $\sim 52\%$ (рисунок 1в).

Из анализа данных, приведённых на рисунке 1(а-в), следует, что для наконечника Виккерса при малых нагрузках P_{max} (от ~ 1 до ~ 40 мН) возврат деформации осуществляется в основном за счёт неупругого механизма (рисунок 1б), в отличие от наконечника Берковича, где при малых нагрузках основным механизмом восстановления отпечатка является возврат $\epsilon_{упр}$ (рисунок 1а). В обоих случаях при увеличении нагрузки P_{max} (от ~ 40 до ~ 300 мН) происходит уменьшение доли возврата $\epsilon_{неупр}$ составляющей и увеличение доли накопления $\epsilon_{пласт}$ (рисунок 1б, в), при этом доля возврата $\epsilon_{упр}$ на глубине более ~ 1 мкм остаётся постоянной ($\epsilon_{упр} \approx 8\%$). Полученный результат показывает, что в зависимости от прикладываемого усилия P_{max} , перераспределение механизмов возврата $\epsilon_{неупр}$ и накопления $\epsilon_{пласт}$ деформаций не зависит от формы пирамидального наконечника индентора.

Расчитанные значения предела текучести σ_T по методике [5] коррелируют с результатами [1]. Действительно, на глубине до ~ 1 мкм на зависимостях $\sigma_T(h_{max})$ значения σ_T для наконечников Виккерса и Берковича близки друг к другу и составляют $\sim 1,75$ ГПа. На глубине более ~ 2 мкм σ_T принимает значения ~ 1 и $\sim 1,4$ ГПа, для наконечников Виккерса и Берковича, соответственно. Полученный результат согласуется с данными [1], где на глубине более ~ 2 мкм параметр пластичности δ_H равен ~ 60 и $\sim 52\%$, соответственно.

Рисунок 1г иллюстрирует взаимосвязь прочностных и пластических свойств, с помощью изменения константы пропорциональности H/σ_T . Так, среднее отношение H/σ_T для пирамиды Виккерса составляет $\sim 2,33$, для Берковича – $H/\sigma_T \approx 2,43$. Как видно, при глубине индентирования h до ~ 2 мкм видна близость значений соотношения H/σ_T , что свидетельствует о подобии НДС при испытаниях наконечниками разных типов. Однако, в случае повышения максимальной нагрузки на индентор P_{max} , экстраполяция данных зависимостей на большие глубины (обозначены пунктирными линиями на рисунке 1г) позволяет предположить, что на глубинах, превышающих $\sim 3-5$ мкм, будет проявляться

существенное несоответствие в величине прочностных и упруго-пластических параметров, характеризующих механические свойства, вследствие увеличения разности НДС в зоне индентирования и прилегающих областях к ней.

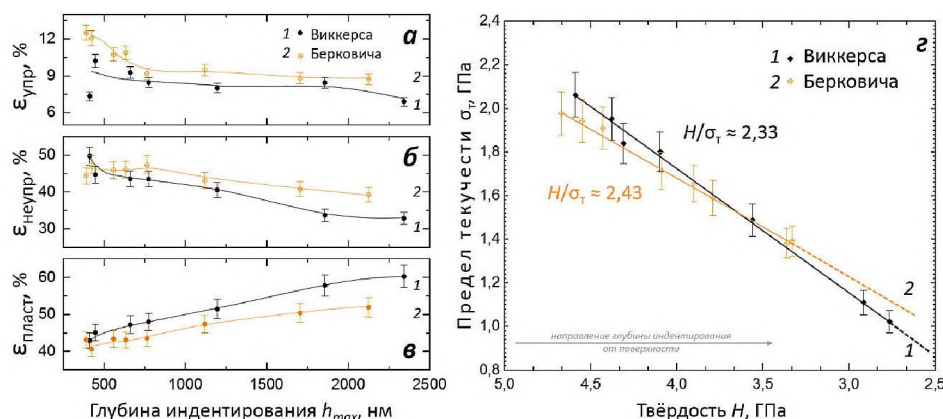


Рис. 1. Зависимости деформационных вкладов при индентировании пирамидой Виккерса – 1, Берковича – 2 от максимальной глубины индентирования h_{max} (а-в) (доли упругой $\epsilon_{упр}$ (а), неупругой $\epsilon_{неупр}$ (б) и пластической $\epsilon_{пласт}$ (в) деформаций); зависимость предела текучести σ_t от твёрдости H (г)

Заключение. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что при нагрузках P_{max} от ~ 1 до ~ 300 мН деформационное поведение поверхностных слоёв TiNi-образцов при локальных нагружениях разными наконечниками (Виккерса и Берковича) подобно. Это означает возможность проводить исследования и сравнения прочностных и упруго-пластических параметров для материалов, полученных на экспериментальных установках, с различными по форме и геометрии пирамидальными наконечниками индентора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-33-90034.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко Ф.А., Атовуллаева А.А., Мейснер Л.Л. Влияние формы наконечника индентора на локальное деформационное поведение TiNi-сплава // Физика твёрдого тела: сборник материалов XVII Российской научной студенческой конференции. – Томск: Изд-во НТЛ, 2020. – С. 22–24.
2. Milman Yu.V., Galanov B.A., Chugunova S.I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement // Acta metall. Mater. – 1993. – Vol. 41. – P. 2523–2532.
3. Ni. W., Cheng Y.-T., Grummon D.S., Microscopic superelastic behavior of a nickel-titanium alloy under complex loading conditions // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 82. – P. 2811–2813.
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. Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K.J., Venkatesh T.A., Suresh S. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation // Acta Mater. – 2001. – Vol. 49. – P. 3899–3918.