

звездочки обозначают предел прочности на изгиб образца базальтопластика с УНТ, а черные звездочки обозначают максимальное напряжение исходного образца базальтопластика. Из рисунка 2(б) видно, что предел прочности при добавлении УНТ повышался с 315,9 МПа до 325,9 МПа, изгибный модуль понизился с 32,8 ГПа до 32,6 ГПа.

Сводная таблица 1 механических характеристик представлена ниже.

Таблица 1 – Механические свойства базальтопластика

Тип базальтопластиков	σ_{\max} , МПа	E, ГПа	τ_{\max} , МПа	G, ГПа	$\tau_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	E _{изг} , ГПа
Без УНТ	675,1 ±13,9	29,2 ±1,3	55,6 ±1,1	3,4 ±0,3	31,4 ±1,7	315,9 ±29,6	32,8 ±0,9
С УНТ	703,9 ±18,1	30,6 ±0,8	63,6 ±1,5	3,9 ±0,2	33,6 ±0,6	325,9 ±14,9	32,6 ±0,4

По результатам сравнения видно, что при испытании на растяжение по стандарту D3039 значение предела прочности и значение модуля Юнга образцов композита с углеродными нанотрубками выше, чем у образцов композитного материала без углеродных нанотрубок на 4%. Значения прочности образцов композита с углеродными нанотрубками при испытании на растяжение по стандарту D3518 на 7% выше, чем у образцов композита без углеродных нанотрубок. Модуль сдвига при этом повышается на 13%. В испытании на изгиб по стандарту D7264 значение предела прочности образцов композита с углеродных нанотрубок на 3% выше, чем у образцов композита без углеродных нанотрубок. При этом значение изгибного модуля снижается 0,6%. Сравнение исходных базальтопластиков и с УНТ позволяет сделать вывод об эффективности такого метода наномодификации.

Список литературы

1. D3039/D3039M – 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
2. D3518/D3518M – 13 Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45° Laminate.
3. D7264/D7264M – 15 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ И МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0

С. ЧЖАН¹, Ц. ХАНЬ¹, Е.А.ДАРЕНСКАЯ¹, Ц.ЧЖАО²

Томский политехнический университет

Шеньянский политехнический университет

E-mail: 905343847@qq.com

Титан и его сплавы считаются привлекательными металлическими материалами в связи с их высокой прочностью, коррозионной стойкостью, пластичностью и вязкостью, хорошей биосовместимостью, легкостью, технологичностью и криогенной устойчивостью. Этим обусловлено широкое использование титановых сплавов в разных областях промышленности [1-3]. Область применения титановых сплавов в различных отраслях техники требует определения таких механических свойств, как твердость и модуль упругости. В связи с этим является интересным применение наноиндентирования для

оценивания твёрдости и упругого модуля титанового сплава [5-8]. Целью работы является определение твёрдости и упругого модуля Юнга титанового сплава ВТ1-0.

В работе исследованы образцы титанового сплава ВТ1-0 после проката и после термической обработки. Термическую обработку (отжиг) проводили при температуре 800 °С с выдержкой 30 минут и дальнейшим охлаждением с печью. Измерение нанотвердости проводили при комнатной температуре на нанотвердомере Nanoindenter G200, оснащённом индентором Берковича, при максимальной нагрузке 500 мН. Значения модуля Юнга (E) и нанотвердости (H) образцов рассчитывали по методике Оливера-Фарра [8] по диаграммам $P-h$ (рисунок 1), где P – величина нагрузки, h – глубина отпечатка. Значения H и E получали путем усреднения результатов 10 уколов. Перепады на нагрузочных кривых (рисунок 1) свидетельствует о неоднородности структуры.

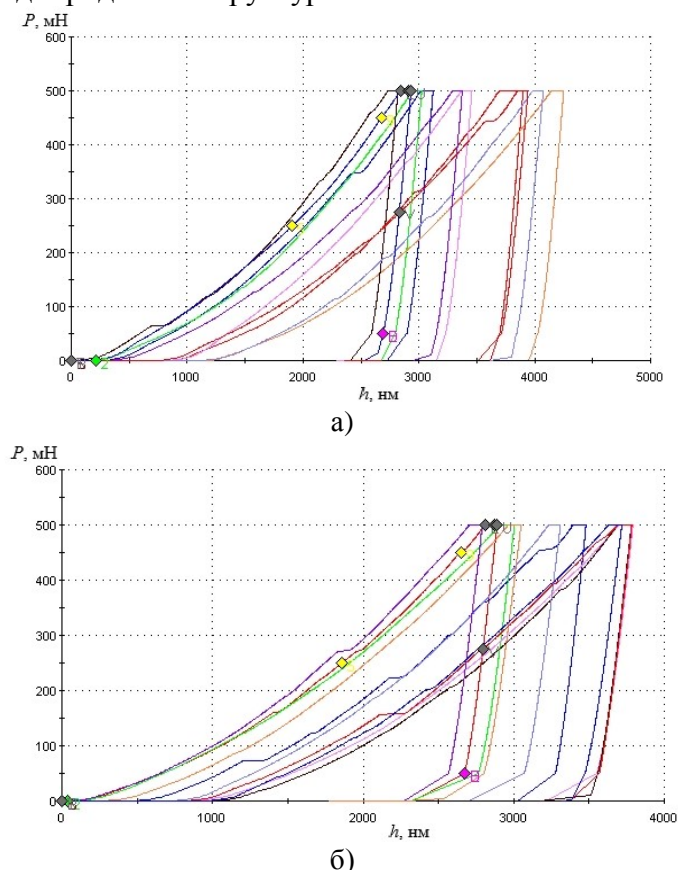


Рисунок 1 - Диаграммы $P-h$ (P – величина нагрузки, h – глубина отпечатка) для образца: а) после проката; б) после проката и отжига

Наклон разгрузочных кривых характерен для материалов, у которых твердость относительно мала по сравнению с модулем упругости [9]. У таких материалов смещение индентора компенсируется пластически, и лишь небольшая часть восстанавливается при разгрузке. Наличие видимого на кривых разгрузки изгиба («колена»), видимо, связано с фазовыми переходами в титановом сплаве ВТ1-0 в области контакта с индентором [4].

Полученные средние значения модуля упругости и твердости индентирования титанового сплава ВТ1-0 после проката и после отжига имеют близкие значения, рисунок 2. Скачки значений измеряемых величин, по-видимому, обусловлены неоднородностью структуры образцов и связаны с попаданием индентора на границу зёрен, либо в другую фазу. После проката у сплава ВТ1-0 среднее значение модуля упругости равно 139 ГПа и среднее значение твёрдости – 1,95 ГПа. У отожженного образца среднее значение модуля упругости 144 ГПа, а среднее значение твёрдости – 2,07 ГПа.

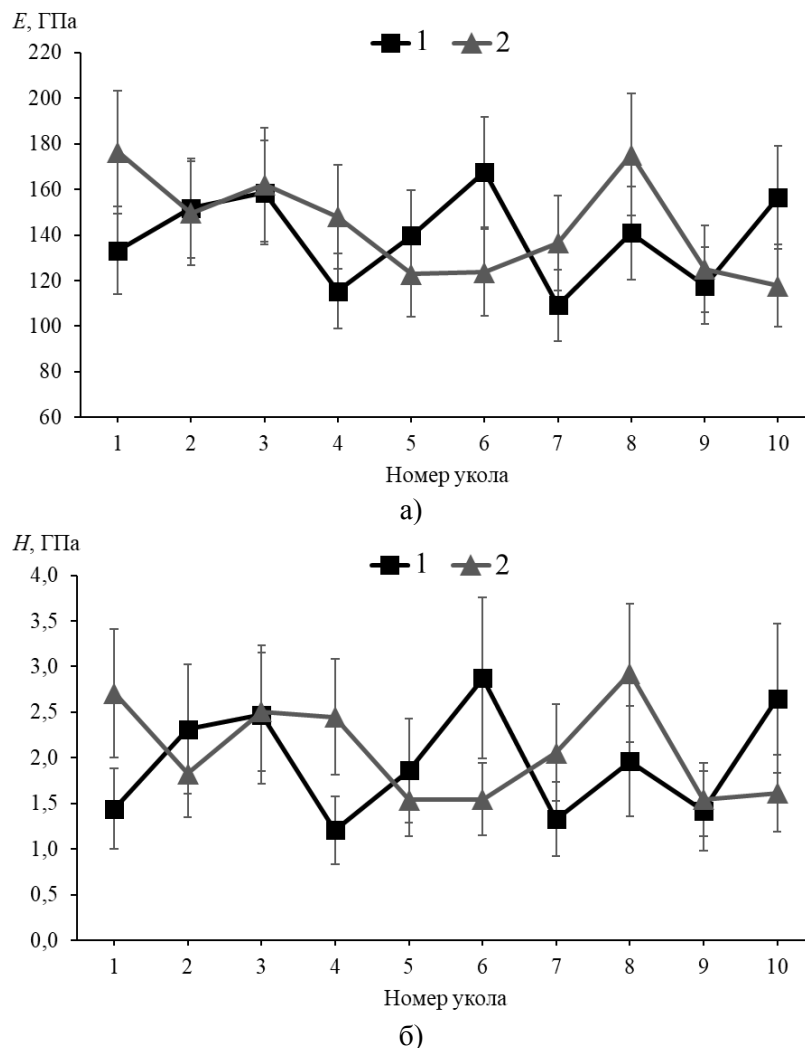


Рисунок 2 – Модуль упругости (а) и твёрдость индентирования (б) образцов титанового сплава VT1-0: 1 – после проката; 2 – после отжига

Исследования методом наноиндентирования титанового сплава VT1-0 после проката и отжига показали, что уровень значений твёрдости и модуля упругости не изменяется после отжига при 800 °С.

Список литературы

1. Фазовые превращения и механические свойства двухкомпонентных титановых сплавов после термообработки в двухфазной области (α + интерметаллид) и кручения под высоким давлением / А. С. Горнакова, Б. Б. Страумал, Ю. И. Головин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 11. – С. 45-50.
2. Asl M.S., Delbari S.A., Azadbeh M. et al. // J. Mater. Res. Technol. 2020. V. 9. P. 10647.
3. Moshokoa N., Raganya L., Obadele B.A., Machaka R., Makhatha M.E. // Int. J. Adv. Manufact. Technol. 2020. V. 111 P. 1237.
4. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъемах, тонких приповерхностных слоях и плёнках (Обзор) // Физика твердого тела. - 2008. - Т. 50, № 12. - С. 2113 - 2142.
5. Игнатович С. Р., Закиев И. М., Закиев В. И. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра «Микронгамма» // Вестник Харьковского национального авт.-дор. ун-та. 2008. Т. 42. С. 86-90.
6. ISO 141577-2 «Metallic materials – instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 2. Verification and calibration of testing machines».

7. Nanoindentation analysis as a two-dimensional tool for mapping the mechanical properties of complex surfaces [J]. Nicholas X. Randall, Matthieu Vandamme, Franz-Josef Ulm. Journal of Materials Research. 2009 (3).
8. Применение технологии наноиндентирования в механических испытаниях материалов [J]. Цзинь Цяолин, Ли Гуолу, Ван Хайдоу, Лю Джинна, Чжан Цзяньцзюнь. Технология поверхности. 2015 (12).
9. Oliver W.C., Pharr G.M. «Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology» J. Mater. Res., Vol. 19, No. 1, Jan 2004.