

**Ковальчук Алексей Владимирович,**  
Аспирант, Белорусский национальный технический университет,  
Беларусь, Минск  
[a-v-kov@yandex.com](mailto:a-v-kov@yandex.com)

**Константинов Станислав Валерьевич,**  
Аспирант, Белорусский государственный университет,  
Беларусь, Минск  
[my@mail3000@tut.by](mailto:my@mail3000@tut.by)

## **Фактор подложки в формировании свойств PVD покрытий**

*Аннотация: исследованы нанотвердость и модули упругости покрытий TiAlN на упрочненных стальных подложках; установлено, что вклад упрочненной подложки в наноиндентационный отклик поверхности с покрытием приводит к повышению наблюдаемых значений нанотвердости, покрытия на упрочненных подложках имеют больший модуль упругости и индекс пластичности, показатели упругого восстановления и сопротивление пластической деформации покрытий также повышаются.*

*Ключевые слова: магнетронное напыление, стальная подложка, нанотвердость, модули упругости.*

**Введение.** Важнейший параметр в формировании свойств покрытий на базе тугоплавких соединений переходных металлов, а также показатель их эффективности долгое время отождествлялись с твердостью покрытий и переходной зоны на различном уровне. На сегодняшний день достаточно убедительно установлено, что износостойкость в равной мере определяется твердостью и упругостью покрытия и переходной зоны между покрытием и основным материалом [1].

Поэтому при создании современных износостойких покрытий приходится оперировать соотношениями величин твердости и модуля упругости [2], а наиболее важным параметром в формировании свойств покрытий считается отношение  $H/E$  – показатель перехода от упругой деформации к разрушению (индекс пластичности), относительно которого в современном материаловедении можно выделить два основных подхода к созданию износостойких покрытий.

Первый основывается на теориях механики разрушения применительно к объемным материалам. Эти теории объединены идеей о том, что в любом материале так или иначе уже существуют дефекты, которые проявляются в виде очагов пластической деформации при приложении нагрузки или возникновении напряжений. Поэтому закономерным требованием к покрытиям при таком подходе является их высокая жесткость (высокое значение модуля  $E$ ), которая будет препятствовать росту дефектов до критических размеров, тем самым смещая начало разрушения в область более высоких нагрузок.

Второй, наиболее распространенный подход основывается на создании покрытий с очень высоким соотношением  $H/E$ . По мнению сторонников этого подхода [3], в том числе и авторов данной статьи, главным является снижение напряжений в переходной зоне между покрытием и подложкой, а также понижение свободной энергии границы раздела. Модуль упругости покрытия при этом должен быть близким к значению характерному для подложки, чтобы снизить напряжения на границе раздела и в точках контакта, а высокая твердость должна препятствовать возникновению пластических деформаций.

Помимо соотношения  $H/E$ , выделяют отношение  $H^2/E$ , которое характеризует способность материала поглощать энергию деформации и отношение  $H^3/E^2$  – показатель сопротивления пластическому течению.

**Цель работы** заключалась в исследовании нанотвердости, модуля упругости и жесткости покрытий TiAlN. При этом предполагалось получение на образцах идентичных покрытий с разницей свойств, обусловленной влиянием подложки.

Нанесение покрытий осуществляли на автоматизированной установке Caroline D12A1, процесс проводили со слабой степенью ионного воздействия при сбалансированном магнетроне, использовали импульсный среднечастотный магнетрон мощностью 0,5 кВт. Толщина покрытий 3 мкм.

Исходная микроструктура стальной подложки равновесная, полученная полным отжигом. В качестве упрочняющей обработки использовали низкотемпературную нитроцементацию 550–600 °С, 7 ч, насыщение проводили в порошковой среде.

Нанотвердость, модуль упругости и жесткость изучали на приборе Nanoindenter G200 (MES Systems, USA) по методике Оливера-Фарра, с применением трехгранного алмазного индентора Берковича с радиусом закругления при вершине 20 нм. Вдавливание наноиндентора осуществляли на глубину до 200–300 нм.

**Результаты.** Анализ кривых нагружения-разгрузки показал существенные различия в поведении покрытий. Покрытия на более мягкой подложке подвержены большим пластическим деформациям и показывают меньшее упругое восстановление. Результаты расчета нанотвердости ( $H$ ), модуля упругости ( $E$ ), жесткости ( $k$ ) (коэффициента упругости), индекса пластичности  $H/E$ , показатель упругого восстановления ( $H^2/E$ ) и сопротивления пластической деформации ( $H^3/E^2$ ) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики покрытий TiAlN

Характеристики	$h$ , мкм	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$k$ , Н/м	$H/E$	$H^2/E$ , ГПа	$H^3/E^2$ , ГПа
На не упрочненной подложке из стали 12X18H9T	3	28,1	770	2,47	0,036	1,025	0,037
На упрочненной подложке из стали 12X18H9T	3	52,9	870	1,48	0,061	3,217	0,196

Полученные характеристики покрытий позволили сделать вывод, что вклад упрочненной подложки в наноиндентационный отклик поверхности приводит к повышению наблюдаемых значений нанотвердости более чем в 1,8 раза. Покрытия на упрочненных подложках имеют несколько больший модуль упругости (на 13 %) и одновременно в 1,7 раза более высокий индекс пластичности. Показатели упругого восстановления и сопротивление пластической деформации покрытия при этом повышается более чем в 3,1 и 5,3 раза соответственно.

**Заключение.** Таким образом, роль подложки в поведении покрытий значительна при толщине покрытий много больше глубины внедрения индентора. Упрочнение подложки позволяет улучшить упруго-пластические характеристики покрытий. Пластические деформации в системах с упрочненной подложкой меньше, а упругое восстановление покрытия сильнее. Полученные результаты подтверждают значимость фактора подложки при создании покрытий с заданным уровнем свойств.

1. Хоккинг, М. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / М. Хоккинг, В. Вассантари, П. Сидки ; пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
2. Musil J., Kunc F., Zeman H., Polakova H., Relationship between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings // Surf. Coat. Technol. Vol. 154 – 2002 – p. 304–313.
3. Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссена ; перевод с англ. А.В. Хачояна, под ред. Р.А. Андриевского. М.: Техносфера, 2011 – 752 с.