

УДК 620.178.152.341.4

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ,
ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ**
Трухан Р.Э.¹, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³,
Муравьёва Т.И.³, Мерзин А.М.³, Самардак В.Ю.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН

Москва, Российская Федерация

⁴Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведены результаты исследования физико-механических свойств алмазоподобных пленок на стальной подложке методом многоциклового индентирования с частичным разгрузением. Получены зависимости модуля упругости и микротвердости от максимальной нагрузки в цикле. Показано влияние подслоя Ti в совокупности с толщиной пленок на поведение их свойств.

Ключевые слова: алмазоподобное покрытие, модуль упругости, микротвердость, инструментальное индентирование, частичное разгрузение.

**DIAMOND LIKE CARBON COATINGS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
DETERMINED BY NANOINDENTATION**

**Trukhan R.¹, Habarova A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Torskaya E.³,
Myravyeva T.³, Merzin A.³, Samardak V.⁴**

¹A.V. Lukov Heat- and Mass Transfer institute NAS Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS

Moscow, Russia

⁴School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Abstract. The paper presents the results of the physical and mechanical properties studying of diamond-like coatings on a steel substrate by the indentation with partial unloading technique. The elasticity modulus and microhardness dependences on the maximum load in the cycle are obtained. The effect of the Ti sublayer with the thickness of the films on the behavior of their properties is shown.

Key words: diamond like carbon coating, elasticity modulus, microhardness, instrumental indentation, partial unloading.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. Петруся Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Введение. Модуль упругости (E , Па) и микротвердость (H , Па) являются важными характеристиками для оценки свойств покрытий и тонких пленок. Они характеризуют способность материала упруго деформироваться под действием нагрузок и сопротивления внедрению в покрытие деформирующего его тела [1]. На основании этих характеристик оценивается индекс пластичности (H/E), сопротивление пластической деформации (H^3/E^2) и моделируются контактные взаимодействия объектов с пленками [2].

Определение E и H является непростой задачей в случае тонких покрытий из-за их малой толщины (менее 2,5 мкм). Для этого применяется оборудование, которое реализует метод индентирования с регистрацией зависимости глубины внедрения от приложенной силы величиной до

10000 мкН и анализирует их в соответствии с моделью Оливера-Фарра.

Алмазоподобные покрытия (АПП) объединяют тонкие углеродные слои со структурой, сочетающей в себе межатомные связи как алмаза (sp^3), так и графита (sp^2). Такое сочетание приводит к большой вариативности свойств присущих алмазу (высокая твердость, химическая инертность, износостойкость, высокое удельное сопротивление) и графиту (невысокое удельное сопротивление, низкий коэффициент сухого трения и поглощение видимого света) [3]. Из-за высоких внутренних напряжений и низкой адгезии пленки к подложке толщина АПП не превышает нескольких микрометров. Для нивелирования этих недостатков применяют различные технологические приемы: легирование, нанесение

подслоев и другие. Применение таких покрытий достаточно широкое, хоть и ограничено небольшой толщиной и деградацией свойств при температуре более 350 °С. Это снижение коэффициента трения износа в деталях автомобилей, защита от износа сверл, концевых фрез и пресс форм, оптические компоненты [4].

Материалы и методы исследования. Объектами исследования стали алмазоподобные покрытия, нанесенные на подложку из стали ШХ15 методами лазерной абляции и импульсным дуговым осаждением. Толщина покрытий составляла 100, 300 и 500 нм. Перед нанесением 300 и 500 нанометровых покрытий осаждался подслои титана толщиной 800 нм для снижения внутренних напряжений.

Определение модуля упругости и микротвердости проводилось на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США) путем внедрения трехгранной алмазной пирамиды Берковича с радиусом закругления в 150 нм в поверхность покрытия. Применялся метод многоциклового индентирования с частичным разгрузением. Нагрузка увеличивалась с 440 до 10000 мкН. Каждый последующий шаг сопровождался повышением нагрузки на 683 мкН относительно предыдущего максимального значения.

Результаты исследования. По итогам проведенных испытаний покрытий были получены зависимости значений модуля упругости (рис. 1) и микротвердости (рис. 2) от максимальной приложенной нагрузки.

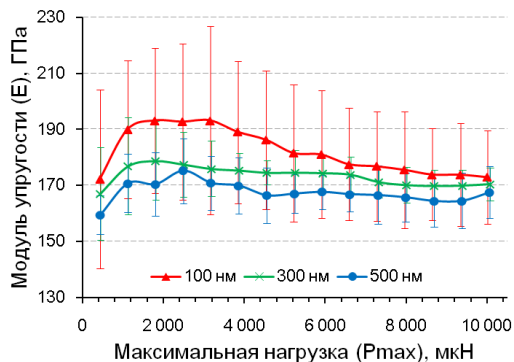


Рисунок 1 – Изменение E с ростом нагрузки

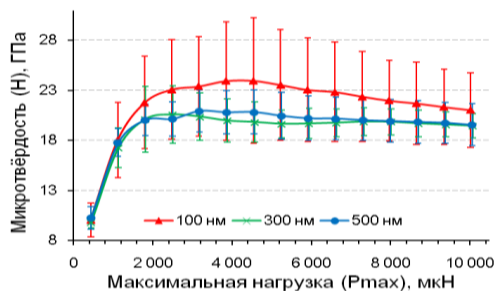


Рисунок 2 – Изменение H с ростом нагрузки

По мере увеличения нагрузки до 1200 мкН наблюдался рост E для всех покрытий. Это объясняется наличием более мягких слоев на поверхности. Далее чередуются области, в которых модуль упругости изменяется незначительно или уменьшается. При нагрузке в 10000 мкН E для всех покрытий стремится к значению 170 ГПа. Наибольшими средними значениями обладает покрытие толщиной 100 нм, наименьшими – АПП 500 нм.

Значение микротвердости (рис. 2) покрытий сильно возрастает к нагрузке 2200 мкН, а при дальнейшем нагружении незначительно изменяется у АПП 300 и 500 нм и растет до 24 ГПа с последующим уменьшением у АПП 100 нм. Большим значением H обладает пленка с толщиной 100 нм. АПП 300 и 500 нм обладают близкими значениями параметра.

Контактная глубина (h_c) при максимальной нагрузке на индентор в контакте с пленкой толщиной 100 нм составила 118,7 нм, при этом h_c в 100 нм достигалась при нагрузках от 7200 мкН. Стабилизация значений E и H происходит на уровне 20 и 27 нм, снижение значений E и H начинается при h_c около 50 нм и 58 нм. В случае АПП 300 и 500 нм максимальная контактная глубина составляла около 125 нм. Выравнивание значений E и H для всех покрытий происходит примерно на одинаковой глубине.

Различия в физико-механических свойствах исследуемых пленок обусловлены их толщиной и характеристиками нижележащего слоя. Поведение модуля упругости и микротвердости у пленок толщиной 300 и 500 нм с подслоем титана очень схожи в отличие от АПП 100 нм у которого не было подслоя. Значение микротвердости и модуля упругости используемой стали при нагрузке в 1000 мкН составляют $12,9 \pm 0,59$ и $185,25 \pm 14,82$ ГПа. Эти показатели выше чем у титана что и внесло свой вклад в свойства 100-нанометрового АПП.

Заключение. Были исследованы свойства алмазоподобных покрытий на стали методом инструментального индентирования в многоцикловом режиме с частичным разгрузением. Получены зависимости E и H от максимальных нагрузок циклов. Самые высокие показатели характерны для пленки толщиной 100 нм. Различие в поведении свойств покрытий связано с наличием подслоя Ti.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф20Р-217.

Литература

1. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Б. Вархолински [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217