

На рис. 1 представлено изображение, полученное на длине волны 850 нм, результат анализа мультиспектрального изображения представлен на рис. 2. Точность анализа представленной нейронной сети сопоставима с точностью сверточной сети, которая была предложена в работе [4]. В отличие от сверточной сети данная сеть не учитывает влияние соседних пикселей, однако превосходит в несколько раз по скорости анализа мультиспектральных изображений.



Рисунок 1 – Результаты съемки МСК на длине волны 850 нм



Рисунок 2 – Результаты анализа мультиспектрального изображения с помощью нейронной сети

Основными недостатками представленной сети являются ошибки в классификации изображений связанные с освещенностью объектов, зеркальной поверхностью объекта, а также с объектами, частично пропускающими излучение на длинах волн, на которых производилась съемка. Даже если нейронная сеть неверно определяет тип материала, она достаточно хорошо разделяет различные типы материалов. На полученном в результате анализа изображении можно выделить области, которые соответствуют одному типу материала. Далее такое изображение можно анализу с помощью традиционных нейронных сетей по классификации изображений.

Работа выполнена в рамках темы НИР Удм-ФИЦ УрО РАН «Искусственный интеллект в разработке, обучении и сопровождении экспертных систем представления и использования знаний в естественно-научных, технических и социогуманитарных направлениях» АААА-А19-119092690104-4.

#### Литература

1. Deep feature extraction and classification of hyperspectral images based on convolutional neural networks / Y. Chen [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2016. – Vol. 54, № 10. – P. 6232–6251.
2. Melgani, F. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines / F. Melgani L. Bruzzone // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – Vol. 42., № 8. – P. 1778–1790.
3. Ефимова, У. А. Макет мультиспектральной системы видения для мобильных систем / У. А. Ефимова, Г. М. Шаранова, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Р. Зарипов // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 367–369.
4. Применение искусственных нейронных сетей для анализа мультиспектральных изображений / М.Ю. Альес [и др.] // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88., № 8. – С. 48–53.

УДК 620.1.052

### ОСОБЕННОСТИ НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

Трухан Р.Э.<sup>1</sup>, Хабарова А.В.<sup>1</sup>, Кузнецова Т.А.<sup>1,2</sup>, Лапицкая В.А.<sup>1,2</sup>, Чижик С.А.<sup>1,2</sup>, Торская Е.В.<sup>3</sup>, Муравьёва Т.И.<sup>3</sup>, Мерзин А.М.<sup>3</sup>, Самардак В.Ю.<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН  
Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет  
Владивосток, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе описан метод наноскретч-теста, реализованный на наноинденторе Hysitron 750 Ubi. Приведены параметры эксперимента и испытуемого материала и их влияние на результаты, полученные при царапании алмазоподобных покрытий. Наибольшее влияние на стабильность результатов измерений оказывают длина царапины и шероховатость поверхности.

**Ключевые слова:** наноскретч-тест, алмазоподобные покрытия, наноиндентор.

## NANOSCRATCH TEST FEATURES WHEN STUDYING DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS

Trukhan R.<sup>1</sup>, Habarova A.<sup>1</sup>, Kuznetsova T.<sup>1,2</sup>, Lapitskaya V.<sup>1,2</sup>, Chizhik S.<sup>1,2</sup>, Torskaya E.<sup>3</sup>, Myravyeva T.<sup>3</sup>, Merzin A.<sup>3</sup>, Samardak V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS  
Moscow, Russia

<sup>4</sup>School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russia

**Abstract.** Nanoscratch test implemented on the Hysitron 750 Ubi described in this paper. The experiment and the test material parameters and their influence on diamond like carbon coatings scratch results are given. The greatest influence on the measurement results stability is the scratch length and the surface roughness.

**Key words:** nanoscratch test, diamond like carbon coatings, nanoindenter.

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

Тонкие твердые пленки и покрытия широко применяются для улучшения и придания новых свойств поверхностям различного назначения при создании миниатюрных устройств [1]. Для контроля параметров таких слоев используется специальное оборудование, позволяющее работать в микро- и наномасштабах нагрузок.

Скретч-тест применяется в качестве метода оценки адгезионных и механических свойств материалов и в качестве инструмента, реализующего контакт с единичной неровностью. Если он используется для определения твердости покрытия, то называется склерометрией. При определении микротвердости склерометрия значительно уступает индентированию, но имеет свои преимущества в наномасштабе:

1) шероховатость и дефекты материала оказывают меньшее влияние на результат за счет усреднения данных при обработке;

2) эффект упругого восстановления ширины царапины меньше по сравнению с периметром отпечатка при индентировании;

3) чувствителен к анизотропии механических свойств.

С целью расчета твердости необходимо определить ширину царапины. Для этого выполняется визуализация с помощью оптических, интерферометрических методов и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). СЗМ предпочтительнее при малых размерах царапин т. к. позволяет получать более полное и точное представление о рельефе поверхности, чем другие методы [2]. Зачастую в склерометрии используются наконечники типа Беркович, что позволяет изменять ориентацию индентора и разносторонне оценивать свойства поверхности [3].

В работе [4] предложен способ оценки упругих и упруго-пластических напряжений на основе параметров нанесенных царапин. Полученные в работе [4] значения предела текучести согласуются со справочными данными для выбранных

материалов и является статистически значимым, т. к. длина царапины составляла от 3 до 5 мм. Также этот способ можно использовать при оценке прочности поверхности после упрочняющей обработки.

Измерения с помощью скретч-теста реализуются тремя способами: 1) с постоянной нагрузкой, 2) с возрастающей нагрузкой, 3) многопроходный, повторяющийся, однонаправленный с постоянной нагрузкой (наноизнос). Широкое применение этот метод получил при определении адгезионных характеристик покрытий. Измерение в этом случае проводят с возрастающей нагрузкой с регистрацией нормальной и тангенциальной силы, коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии. Изменение этих параметров дают представление о критических нагрузках, при которых происходит переход между разными типами деформации и разрушение покрытия [5].

Для проведения испытания царапанием применяются как специализированные устройства (скретч-тестеры), так и приборы с возможностью индентирования и перемещения в направлении двух координат.

Наноиндентор Hysitron 750 Ubi, оснащенный двойным преобразователем, кроме индентирования реализует скретч-тест и испытание на износ. В совокупности с коническим алмазным индентором он становится чувствительным инструментом для испытания царапанием. Радиус закругления 226 нм повышает чувствительность зонда к неровностям и локальным свойствам в области контакта, и позволяет реализовывать высокие контактные давления (до 70 ГПа).

Подбор параметров проведения наноцарапания зависит как от свойств покрытия, так и от характеристик используемого прибора. Так, для наноиндентора 750 Ubi при царапании с постоянной нагрузкой, доступное время нанесения царапины находится в интервале от 5 до 30 сек,

что соответствует скоростям от 0,67 до 4 мкм/с. Такого диапазона достаточно для того, чтобы наблюдались изменения значений силы и коэффициента трения. Приборы, реализующие скретч-тест, работают с широким диапазоном нагрузок. В случае возрастающей нагрузки при достижении определенного значения происходит разрушение покрытия. В зависимости от твердости подложки и покрытия могут быть реализованы разные механизмы отрыва покрытия от подложки [5]. Шероховатость, как и микротвердость ( $H$ ) покрытия, оказывает большое влияние на результат царапания. При царапании индентором с радиусом закругления 226 нм алмазоподобных покрытий (АПП) с разной твердостью и шероховатостью СКО коэффициента трения снижается с уменьшением показателя  $R_a$  (табл. 1). Эти значения получены при нагрузке 1400 мкН и скорости царапания 1,33 мкм/с, но и при нагрузках до 2000 мкН наблюдается схожая тенденция.

Во время движения индентора по поверхности на ней могут находиться образования, взаимодействие с которыми приводит к перепадам значений силы трения и, следовательно, коэффициента трения. Перепады бывают как слабые, так и сильные при которых сила трения может изменить свой знак, что приведет к появлению в массиве значений нулевого коэффициента трения. Эти значения вносят вклад в конечный результат, изменяя как среднее значение, так и стандартное отклонение (СКО) результата измерений.

Таблица 1. Влияние  $R_a$  и  $H$  на стандартное отклонение коэффициента трения

Подложка	Сталь ШХ15		Кремний $n$ -типа (111)		
$H$ , ГПа	17,5	19,8	25,0	33,0	20,0
$R_a$ , нм	15,70	14,10	2,61	1,60	1,01
СКО	0,163	0,144	0,070	0,030	0,020

В случае царапания АПП длина царапины также влияла на конечный результат. Нанесение царапин на одном покрытии, значение среднего арифметического отклонения профиля ( $R_a$ ) которого составляет 2,61 нм, с одинаковой скоростью в 1,33 мкм/с и нагрузкой в 2000 мкН привело к разным значениям коэффициента трения и его стандартного отклонения (табл. 2). При этом ко-

личество точек было постоянным и составляло 3000, то есть менялось только расстояние между соседними точками. Как видно из табл. 2: с увеличением длины царапины снижается отклонение результатов от среднего значения.

Таблица 2. Значения коэффициентов трения при варьировании длины царапины

Длина царапины, мкм	$K_{тр}$	СКО	$K_{обр}$	СКО
6	0,190	0,095	0,192	0,083
10	0,265	0,049	0,228	0,075
16	0,274	0,047	0,236	0,068
20	0,237	0,060	0,197	0,063

**Заключение.** На результаты наноскретч-теста индентором с радиусом закругления в 226 нм оказывает влияние множество факторов. Среди них: шероховатость и микротвердость исследуемого покрытия, длина царапины, скорость царапания и прилагаемые нагрузки, и наличие на поверхности препятствий для движения индентора. Наиболее стабильные результаты измерений достигаются при длине царапины – 20 мкм и  $R_a$  менее 3 нм.

**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.
2. Кузнецова, Т. А. Применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии / Т. А. Кузнецова // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 3. – С. 276–281.
3. Усеинов, А. Измерение механических свойств методом царапания / А. Усеинов, С. Усеинов // Наноиндустрия. – 2010. – № 6. – С. 28–33.
4. Селиванов, К. С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «скретч-тест» / К. С. Селиванов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 100–106.
5. Определение адгезионных характеристик покрытий с использованием современного скретч теста. Часть 1. Возможности использования современного скретч теста для определения адгезионных свойств покрытий / В.К. Белов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76, № 2. – С. 143–152.