

УДК 621.793:620.172

Камышанченко Н.В., Колпаков А.Я., Гончаров И.Ю., Дручинина О.А.,  
Белгородский гос. ун-т

Эффект восстановления деформированной  
поверхности пластичной подложки с алмазоподобным углеродным покры-  
тием

*Исследована зависимость времени восстановления деформированной области вокруг отпечатка после микроиндентирования поверхности жесткого магнитного диска персонального компьютера с углеродным алмазоподобным покрытием толщиной 100 - 200 нм, полученным импульсным вакуумно-дуговым методом, от толщины защитного покрытия и взаимного расположения отпечатков. Обнаружен эффект восстановления деформированной поверхности с алмазоподобным углеродным покрытием через 24 и 72 ч. Предложен возможный механизм данного явления, связанный с релаксацией внутренних напряжений сжатия в покрытии.*

В настоящее время одной из перспективных областей применения тонких пленок алмазоподобного углерода является защита поверхности жестких дисков компьютеров [1]. Определение эксплуатационных характеристик, а именно микротвердости этих покрытий, ввиду малой их толщины является довольно сложной технической задачей, требующей применения современного оборудования для анализа поверхности и большого объема исследований. Одним из способов определения микротвердости является измерение размера отпечатка, оставленного алмазным индентором после его вдавливания в поверхность с заданной нагрузкой [2]. В последнее время все большее применение находят методы инструментального наноиндентирования, которые имеют высокое пространственное и временное разрешение [3]. При исследовании различных материалов

данными методами часто наблюдается явление упругого восстановления размеров отпечатков [4].

В данной работе приведены результаты исследования обнаруженного нами эффекта восстановления деформированной области по изменению интерференционной картины вокруг отпечатка после микроиндентирования на поверхности жесткого диска компьютера с нанесенным на него тонким углеродным алмазоподобным покрытием через 24 и 72 часа. Целью работы было изучение процессов восстановления деформированной области в зависимости от толщины защитного покрытия и взаимного расположения отпечатков.

Объектами исследования являлись образцы из алюминиевого сплава, используемого при изготовлении жестких дисков для компьютеров, на которые наносилось углеродное алмазоподобное покрытие толщиной 100, 170 и 200 нм импульсным вакуумно-дуговым методом, подробно описанным в работах [5,6]. В качестве катода использовался графит марки МПГ-6. Перед нанесением покрытия поверхность образцов обрабатывали ионами воздуха с энергией ионов порядка 1 кэВ в течение 25 мин. После этого наносили углеродное алмазоподобное покрытие вышеназванной толщины. Частота следования импульсов 2,5 Гц, при длительности импульсов разряда 0,5 – 0,6 мс и напряжении на емкостном накопителе 300 В. Углеродная пленка оптически прозрачна, имела интерференционную окраску, соответствующую ее толщине и коэффициенту преломления. Толщину покрытия измеряли с помощью сканирующего зондового микроскопа SMENA-A, используя предварительно созданную «ступень». Индентирование проводили при комнатной температуре на микротвердомере ПМТ-3М пирамидой Виккерса с нагрузкой 0,098 Н. Время выдержки при этой нагрузке составляло 15 с. Фотосъемку изменения интерференционной картины вокруг отпечатка индентора производили при помощи цифровой фотокамеры

OLYMPUS непосредственно после разгрузки, а также через 24 и 72 часа. Результаты представлены на рисунках 1, 2 и 3.

Установлено, что непосредственно после разгрузки средняя диагональ отпечатка составляла 4,7 мкм, максимальный размер интерференционной области – 25 мкм, глубина кратера вблизи отпечатка – 0,4 мкм (рис. 1а). Через 24 часа средний размер диагонали не изменился, в то время как максимальный размер зоны деформации составил 20 мкм, а глубина кратера уменьшилась до 0,2 мкм (рис. 1б). Через 72 часа зона интерференции не наблюдалась, остался только отпечаток от индентора (рис. 1в).

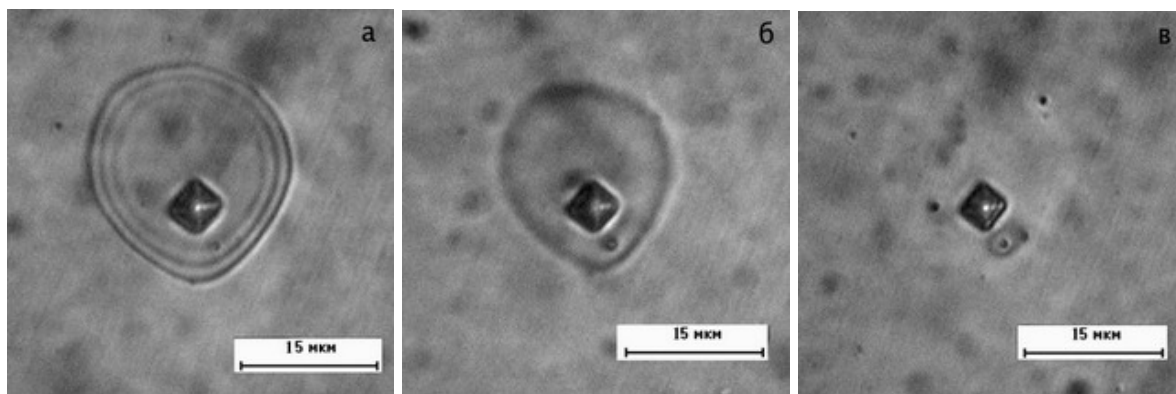


Рис.1. Изменение интерференционной картины вокруг отпечатка при нагрузке  $P = 0,098\text{Н}$ , толщина покрытия 170 нм;

а – сразу после снятия нагрузки; б – через 24 ч; в – через 72 ч.

Интересной особенностью зоны деформации является ее смещение относительно отпечатка, что, скорее всего, свидетельствует о неоднородности упруго-пластичных свойств подложки.

При расположении отпечатков в непосредственной близости друг от друга (на расстоянии 15 мкм) область деформации представляет собой *суперпозицию* областей деформации от каждого из отпечатков (рис. 2). Неоднородность и кинетика процесса во времени сохраняются такой же, как в предыдущем случае.

Уменьшение толщины твердого углеродного конденсата до 100 нм практически не изменяет максимальной зоны деформации, однако умень-

шается глубина кратера до 0,15 мкм, и время полного исчезновения деформации сокращается до 24 часов.

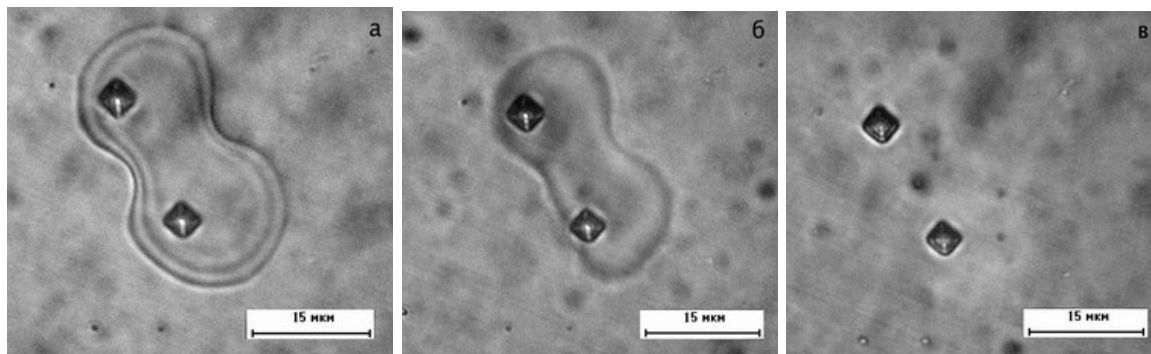


Рис.2. Объединение областей интерференции у близко расположенных друг от друга отпечатков. Нагрузка 0,098Н, толщина покрытия 170 нм. а – сразу после снятия нагрузки; б – через 24 ч; в – через 72 ч.

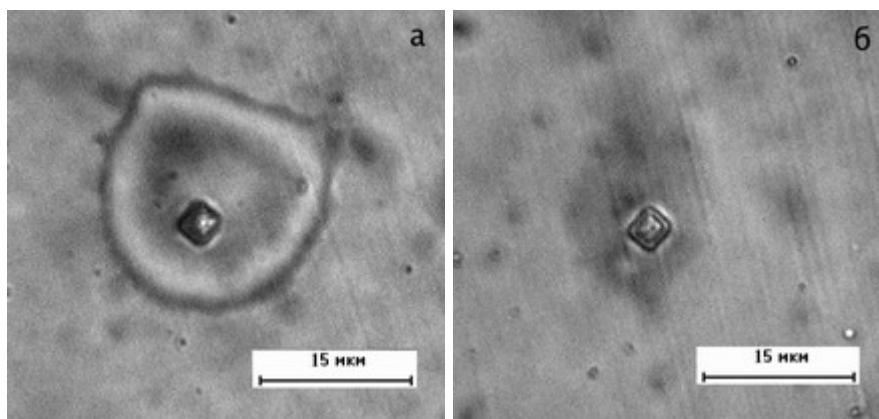


Рис.3. Покрытие толщиной 100 нм; а – непосредственно после снятия нагрузки, б – через 24 часа.

При увеличении толщины покрытия до 200 нм также наблюдается эффект восстановления, однако деформированная область не имеет такой интенсивной равномерной окраски, и процесс протекает значительно быстрее и ограничивается одним часом.

В работах [7,8] предложена модель индентирования системы «пластичная подложка – твердое покрытие», позволяющая объяснить распределение зон пластической и упругой деформации при внедрении в поверхность индентора, однако нами для учета сложной картины деформации при индентировании использовалось компьютерное моделирование этого

процесса для системы «пластичная подложка без твердого покрытия» и «с твердым покрытием» с помощью программы ELCUT, основанной на методе конечных элементов [9].

Результаты компьютерного моделирования (см. рис. 4) свидетельствуют об изменении картины распределения напряжений в подложке при индентировании в случае отсутствия и наличия твердого покрытия. Эти результаты являются прекрасной иллюстрацией защитной роли твердого покрытия, нанесенного на пластичную подложку, заключающейся в перераспределении нагрузки на большую поверхность и, соответственно, уменьшении величины давления. Это приводит к изменению соотношения между процессами упругой и пластической деформации.

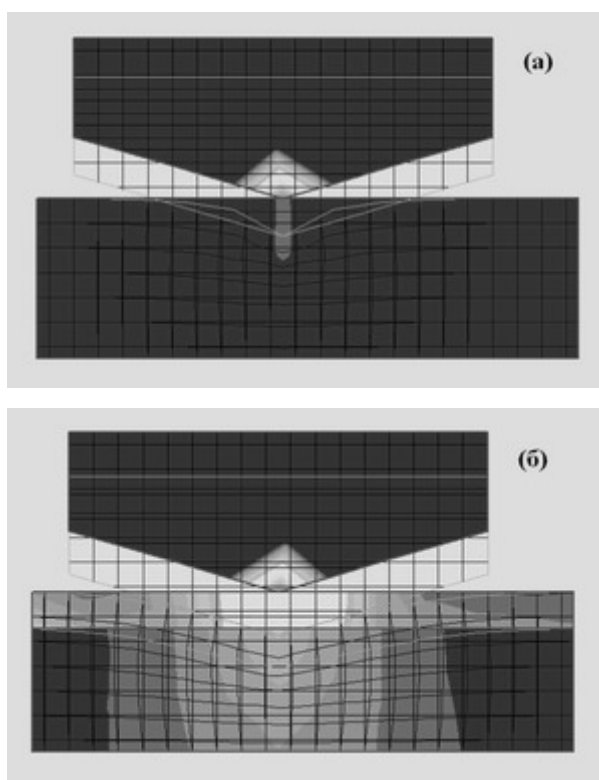


Рис. 4. Моделирование процесса индентирования с нагрузкой 0,098 Н.  
а – пластичная подложка,  $E = 70$  ГПа; б – подложка со сверхтвердым углеродным алмазоподобным покрытием,  $E = 600$  ГПа.

Достаточно неожиданным оказался эффект *распределенного во времени* (24 и 72 часа) процесса восстановления зоны деформации вокруг

отпечатка индентора. Объяснение этого явления возможно при учете особенностей углеродного конденсата, получаемого вакуумно-дуговым методом [6,10]. Эти пленки обладают твердостью на уровне натурального алмаза, модулем упругости порядка 600 ГПа, а самое главное, аномально высокими значениями внутренних напряжений сжатия, достигающих 10 – 12 ГПа [10]. В случае пластичной подложки, высокого значения адгезионной прочности между твердым покрытием и подложкой, а также при условии отсутствия хрупкого разрушения защитного покрытия можно предложить возможный механизм восстановления поверхности после микроиндентирования, связанный с релаксацией внутренних напряжений сжатия в покрытии. Достаточно большое время восстановления может быть в основном связано с диффузионными процессами в самой пленке (перераспределением дефектов, внесенных микроиндентированием, под действием неоднородных полей внутренних напряжений). Этот процесс вероятно можно интенсифицировать за счет термического воздействия, однако в рамках данной работы такие эксперименты не проводились.

Необходимо отметить, что наблюдаемый нами эффект имеет место в достаточно узком диапазоне толщины твердого углеродного покрытия (100 – 170 нм), что связано с характеристиками как материала подложки, так и покрытия, а также величиной внутренних напряжений. С увеличением толщины покрытия поведение системы “сверхтвердое покрытие – пластичная подложка” определяется в основном пленкой.

Таким образом, в настоящей работе мы наблюдали явление, которое в дальнейшем можно использовать для визуализации и анализа деформаций при индентировании, а также для оценки общей деформации системы “сверхтвердая пленка – пластичная подложка”. Установлено, что эффект восстановления деформированной области вокруг отпечатка после микроиндентирования поверхности жесткого диска компьютера с тонкой алмазоподобной пленкой может происходить только при определенном соот-

ношении между толщиной углеродного покрытия и внутренними напряжениями в нем.

#### Библиографический список

1. S.G. Bull, A.M. Korsunsky Mechanical properties of thin carbon overcoats // Tribology International, 1998, v.31. №9. pp.547-551.

2. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230с.

3. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Коренкова Н.В., Рябко Р.И. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методами наноиндентирования // Конденсированной среды и межфазные границы, 2001., Т.3, №2, С.122-135.

4. Головин И.Ю., Иволгин И.Ю., Рябко Г.Р. Вязкоупругое восстановление различных материалов в области динамического наноконтакта // Письма в ЖТФ, 2004, том 30, вып. 5, С.64-69.

5. Маслов А.И., Дмитриев Г.К., Чистяков Ю.Д. Импульсный источник углеродной плазмы для технологических целей // Приборы и техника эксперимента, 1985, №3, С.146-149.

6. Гончаренко В.П., Колпаков А.Я., Маслов А.И. Способы получения алмазных и алмазоподобных покрытий, особенности применяемого оборудования // Материалы VII конференции стран СНГ по проблеме “Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов”, Белгород, 1997.

7. Chen Xi, Vlassak Joost J. A numerical study on the measurement of thin film mechanical properties by mean of nanoindentation // Harvard University, Cambridge, 2002.

8. Zeng Zuwei Adhesion Mechanics of Thin-Films Indentation // School of Mechanical & Production Engineering, Nanyang Technology University, Singapore, January, 2004, 120 p.

9. Пакет ELCUT – Студенческая версия 4.2.2.4., ТОР, Санкт-Петербург.

10. Inkin V.N., Kirpilenco G.G., Kolpakov A.J. Internal stresses in ta-C films deposited by pulse arc discharge method // Diamond and Related Materials, 2001, №10, pp.1103-1108.