

АСМ АНАЛИЗ ДОРОЖЕК ТРЕНИЯ НА УГЛЕРОДНОМ ПОКРЫТИИ

А. М. Дубравин¹, Х.-С. Ан², А. Н. Попов³, В. П. Казаченко³, Янь Цуан¹, С. А. Чижик¹

¹ Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, ул. Кирова 32А, 246050 г. Гомель, Беларусь.

² Корейский институт науки и технологий, г. Сеул, Республика Корея.

³ Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова 34, 246050 г. Гомель, Беларусь.

Введение

Возрастающий интерес к исследованию углеродных плёнок объясняется уникальностью их свойств: высокой твердостью и удельным электрическим сопротивлением, оптической прозрачностью в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения, низким коэффициентом трения, высокой стойкостью в агрессивных химических средах и к некоторым видам излучений. Комплекс свойств углеродных пленок определяет перспективы их применения в различных областях науки и техники. Эти плёнки могут использоваться в качестве абразивных материалов, теплоотводов полупроводниковых приборов, пассивирующих и изолирующих плёнок, покрытий оптических, покрытий на инструменте, защитных покрытий на магнитных дисках, коррозионно-стойких покрытий, биосовместимых покрытий и др.

Находясь в алмазоподобном состоянии углеродные пленки имеют чрезвычайно высокую твердость и можно ожидать их абразивного воздействия при скольжении. Тем не менее, алмазоподобные покрытия (АПП) успешно используются в узлах трения [1–3]. Причем, их стабильному функционированию с высокими фрикционными показателями, предшествует период приработки. На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость, которая демонстрирует значительное снижение коэффициента трения в процессе приработки скользящего контакта. Целью работы было исследование механизма трения АПП с использованием возможностей атомно-силовой микроскопии.

Экспериментальные исследования

Образцы, изготавливались на подложке из стали ШХ15 с исходной шероховатостью $R_a=0,06\text{мкм}$. Перед нанесением покрытия поверхность образцов очищалась органическими растворителями и путем травления в вакууме при давлении 0,06 Па ионами N^+ с энергией 4 кэВ и плотностью ионного тока 25 A/m^2 . Углеродное покрытие α -C наносилось методом импульсного катодно-дугового осаждения из графитового катода при напряжении разряда 300В с частотой импульсов 20 Гц, на предварительно нанесенные подслои нитрида титана и титана, толщиной 0,5 мкм и 0,05 мкм, соответственно. Толщина углеродного слоя составляла 1,6 мкм (при времени нанесения 15 мин). Триботехнические испытания проводились по схеме шарик-плоскость при возвратно-поступательном движении. Скорость скольжения – 0,01 м/с, нормальная нагрузка 2,5 Н, диаметр шарика – 6 мм, длина дорожки трения – 0,01 м. Испытания проводились при сухом трении.

На рис. 2 представлены результаты сканирования исходной поверхности АПП. Поверхность покры-

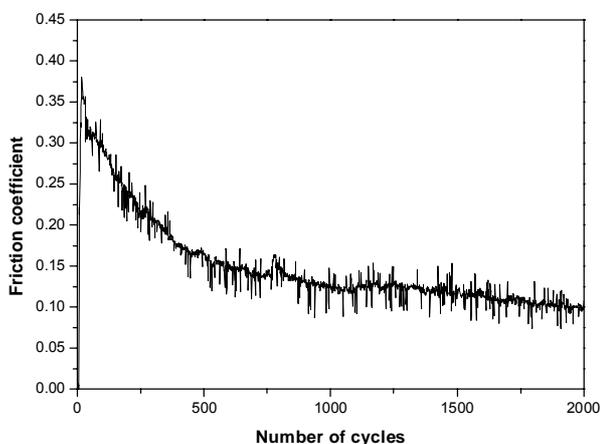


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения сферического индентора (сталь) по поверхности АПП

тия образуется плотной упаковкой кластеров (зерен). Наблюдается сильная корреляция изображений топографии и фазового контраста. Межзеренные границы имеют меньшую жесткость, по сравнению с жесткостью материала зерен и на фазовом изображении зерна АПП оконтурены границами черного цвета.

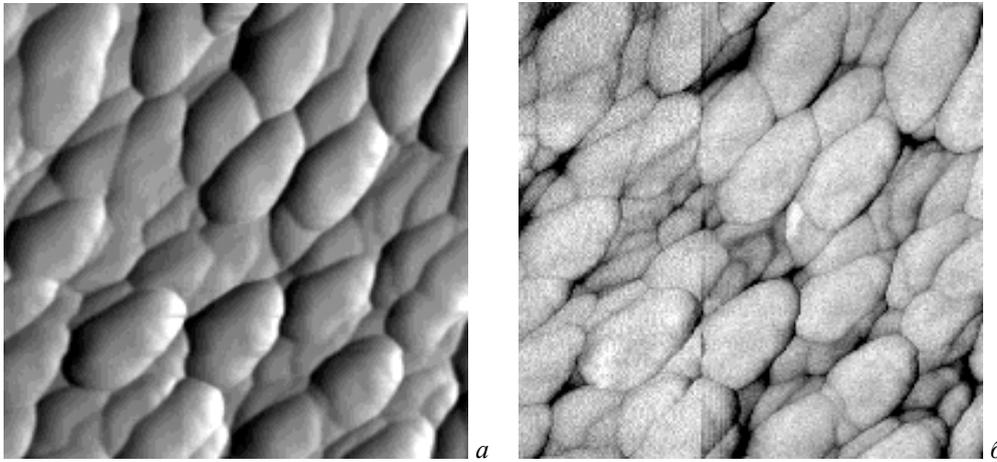


Рис. 2. АСМ-изображения исходной поверхности АПП (зона А): *a* – топография ($\sigma = 33,7$ нм); *б* – фаза ($\Delta\Phi_{\max} = 20,7^\circ$), размер скана $3,8 \times 3,8$ мкм

СЗМ измерения, проведенные в дорожке трения, демонстрируют значительные изменения морфологической структуры покрытия в процессе трения (рис. 3). В таблице приведены количественные параметры шероховатости для сравнения исследовавшихся зон. В качестве таких параметров используются: среднеквадратическое отклонение шероховатости σ , среднее значение локального угла наклона поверхности α_{mid} , наиболее вероятное значение угла наклона поверхности α , средний размер зерна S , коэффициент анизотропии ζ (для изотропной поверхности он равен единице).

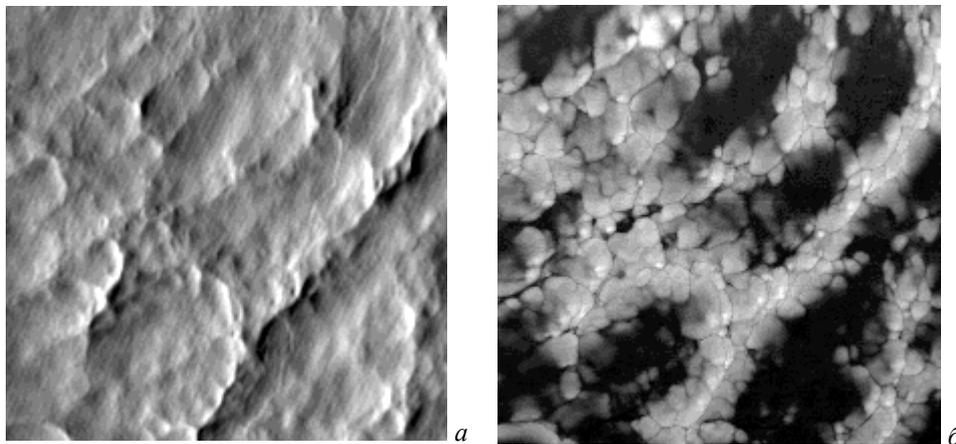


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности трения АПП: *a* – топография ($\sigma = 13,8$ нм); *б* – фаза ($\Delta\Phi_{\max} = 24,0^\circ$), размер скана $10,8 \times 10,8$ мкм

Параметры рельефа для различных зон поверхности трения АПП

	σ , nm	α_{mid} , deg	α , deg	S , μm	ζ
Исходная поверхность	52,0	16,6	10,8	0,74	0,3
Поверхность трения	14,3	2,0	1,2	0,55	0,5

Сравнивая параметры шероховатости для исходной поверхности и центральной части дорожки трения, можно отметить, что в процессе трения произошло существенное сглаживание шероховатости. Выступы зеренной природы на поверхности слабо угадываются, их высота не превышает 30 нм.

Отсутствуют пиковые структуры. Несмотря на то, что выявляются микроборозды трения, параметр σ для центральной зоны трения уменьшился более чем в три раза. Увеличение параметра ζ свидетельствует о том, что поверхность стала более изотропной. Наблюдается уменьшение локального угла наклона неровностей α_{mid} , α . Это свидетельствует о том, что вершины выступов более пологие (имеют больший радиус закругления).

Качественно иная картина наблюдается для изображений фазового контраста [4–7]. В целом, сдвиг фазы на поверхности трения уменьшился по сравнению со значениями соответствующими исходной поверхности АПП, т.е. материал поверхностного слоя стал более мягким. Именно фазовое изображение позволяет обнаружить зеренную структуру поверхности трения. Поверхность стала существенно неоднородной. Имеет место как неоднородность структуры, так и неоднородность микромеханических свойств. Средний латеральный размер зерен (параметр S) уменьшился. Хотя образованная текстура ориентирована вдоль направления трения, в целом по участку сканирования размером 10×10 мкм поверхность выглядит как более изотропная по сравнению с исходной. На вершинах и гребнях рельефа поверхность является более мягкой. В пределах наиболее мягких пятен (черного цвет) структура покрытия не обнаруживается.

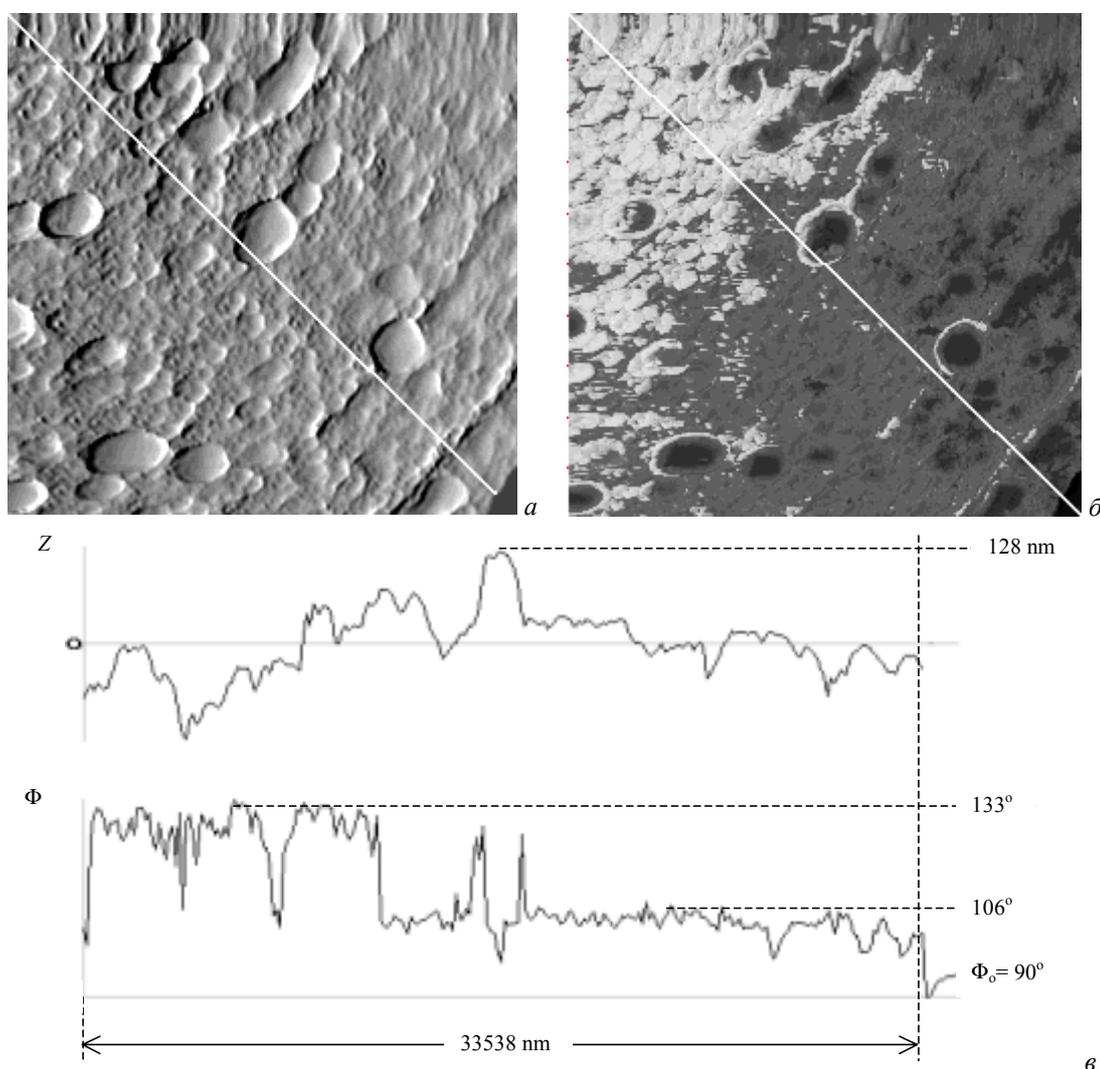


Рис. 4. АСМ-изображения границы дорожки трения: *a* – топография ($\sigma = 33,6$ нм); *б* – фаза ($\Delta\Phi_{\text{max}} = 57,1^\circ$), размер скана $24,9 \times 24,9$ мкм; *в* – профильные сечения для топографии и фазы

На следующем АСМ изображении удалось зарегистрировать участок поверхности на границе между исходной поверхностью и поверхностью трения (рис. 4). Переход от одной зоны к другой характери-

зается резко контрастным переходом на изображении фазы от белого цвета к черному. Профильное сечение для данного участка демонстрирует уменьшение шероховатости при переходе от исходного участка поверхности к изношенному (рис. 4 в). Причем, уменьшение шероховатости коррелирует с уменьшением жесткости материала (сравнение профиллограмм для топографии и для фазы). Можно заметить, что наиболее мягкий материал (имеющий черный цвет на изображении фазового контраста) расположен на вершинах выступов и толщина мягкого слоя на этих участках максимальная (15–20 нм).

Обсуждение результатов

Для определения природы трибослоев образованных на поверхности трения и вносящие существенную неоднородность в микромеханические свойства поверхности были проведены исследования с помощью других аналитических методов. Анализировалась поверхность на участках включающих как исходную поверхность, так и след трения.

Анализ неоднородностей типа частиц и выступов на поверхности трения с помощью метода AGE показал, что преобладающим элементом для большинства точек является углерод. Перенесенных слоев из материала индентора, либо другого не углеродного материала, отличающегося по составу от материала исходного покрытия, на поверхности обнаружить не удалось.

Данные SIMS анализа показали подавляющее преобладание в дорожке трения углеродного материала. Из других элементов удалось обнаружить лишь наличие Fe в незначительном количестве. Повидимому, хорошо регистрируемые с помощью изображений фазового контраста мягкие слои на поверхности трения имеют углеродную природу. Согласно литературным данным это могут быть сформированные при трении слои графита [8]. В зоне трения возникают значительные давления и высокие температуры, которые могут инициировать переход алмазоподобной фракции в графитообразную, которая является намного более мягкой. На вершинах выступов, где локальные давления более высокие, а также имеют место температурные вспышки, образовавшийся слой графита имеет большую толщину.

Заключение

Проведенные с помощью данных методик исследования поверхности трения АП покрытий показали существенную неоднородность дорожки трения по отношению к центру сферического контакта. Модифицированный материал расположен в виде поверхностного слоя толщиной 2–20 нм. Большая толщина слоя наблюдается на вершинах выступов, на которых реализуются максимальные контактные давления и температурные вспышки.

Сравнение данных результатов с результатами AGE и SIMS позволило сделать вывод о графитизации АПП структур в процессе многоциклового трения. Образование тонких слоев графита на поверхности АПП покрытий играет позитивную роль при их использовании в фрикционных сопряжениях, поскольку приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа.

Проект частично финансировался в рамках INTAS проекта №99-0671.

Литература

1. Liu Y., Erdermir A., Meletis E.I. A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films // *Surface and Coatings Technology* 82 (1996) 48-56.
2. Zhao J.F., Liu Z.H., McLaughlin J. The wear effect on microstructure of DLC films PECVD-deposited on $Al_2O_3:TiC$ substrates-a confocal micro-Raman study // *Thin Solid Films* 357 (1999) 159-165.
3. Koskinen J., Schneider D., Ronkainen H., Muukkonen T., Varjus S., Burck P., Holmberg K., Scheibe H.J. Microstructural changes in DLC films due to tribological contact // *Surface and Coatings Technology* 108-109 (1998) 385-390.
4. Tamayo J. and Garcia R. Deformation, contact time and phase contrast in tapping mode scanning force microscopy // *Langmuir* 12 (1996) 4430-35.
5. Magonov S.N., Elings V. and Whangbo M.-H. Phase imaging and stiffness in tapping-mode atomic force microscopy // *Surf. Sci. Lett.* 375 (1997) L385.
6. Tamayo J. and Garcia R. Effects of elastic interactions on phase contrast images in tapping-mode scanning force microscopy // *Appl. Phys. Lett.* 72 (1997) 2394.
7. Behrend O.P., Odoni L., Loubet J.L., and Barnham N.A. Phase imaging: Deep or superficial? // *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 2551.
8. Celis, Tan H.S., Tay B.K., Cheah L.K. and Roos J.R. Tribological behaviour of different diamond-like carbon materials // *Surface and Coatings Technology* 106 (1998) 72-80.