

## НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ НАНОТРИБОЛОГИИ

А. И. Свириденко

Отдел проблем ресурсосбережения НАНБ, пл. Тизенгауза 7, 230023 г. Гродно, Беларусь.

*На основании анализа публикаций последних лет оценен вклад белорусских исследователей в области нанотрибологии. Обсуждаются проблемы и задачи дальнейших работ в этой области.*

*2040 год – будет усовершенствован “Универсальный репликатор”, основанный на нанотехнологиях: может быть создан объект любой сложности при наличии сырья и информационной матрицы. Бриллианты и деликатесная еда могут быть сделаны в буквальном смысле слова из грязи. В результате за ненадобностью исчезнут промышленность и сельское хозяйство, а вместе с ними и недавнее изобретение человеческой цивилизации – работа. После чего последует взрывное развитие искусств, развлечений, образования.*

*Предсказания на XXI век  
писателя-фантаста Артура Кларка  
 (“Комсомольская правда” от 03.05.2000)*

### Введение

Нанотехнологии и научно-обеспечивающие их наноструктурные исследования - одно из самых актуальных направлений мировой науки и техники. Поэтому развитие научного потенциала Республики Беларусь в этой области позволяет создать необходимые условия для:

- получения “конвертируемых” научных результатов современного уровня, обеспечивающих повышение имиджа и постоянное присутствие белорусской науки на рынке научного обеспечения высоких технологий (High Technology);
- прямого и косвенного воздействия на экономику республики, прежде всего, в таких важнейших областях, как микроэлектроника, микробиология и биотехнология, микротехника разнообразного, в т.ч. медицинского, космического, приборостроительного и другого назначения;
- расширения рынка научных услуг для белорусских ученых и специалистов в рамках международных проектов;
- повышение уровня высшего образования за счет оперативного введения в учебные курсы новейших нанотехнологических знаний.

Представляется целесообразным анализ некоторых интересных достижений последних лет в области нанотрибологии с целью определения актуальных для Республики Беларусь направлений дальнейших исследований и разработок.

Анализ показывает, что в нанотехнологии и нанотехнике значительное место занимают общие трибологические проблемы, связанные с исследованием топографии, структуры и адгезии поверхности, механизмов трибопроцессов на наноуровне, изучением роли трения и изнашивания в построении наноструктур и эксплуатации нано- и микротехники.

Внутри этих проблем в последние годы обращают внимание такие вопросы, как: наноиндентирование, адгезия и трение поверхностей на наноуровне и роль трения в нанотехнике.

### Индентирование, адгезия и трение на наноуровне

Предшественником исследования свойств поверхности путем индентирования является микроиндентирование путем внедрения в изучаемую поверхность алмазной пирамиды с размером диагонали 10–20  $\mu\text{m}$ . При движении микроиндентора представляется возможность оценить на микроуровне сопротивление движения, неоднородность структуры поверхности и характер контакта (склерометрия).

Методом склерометрии удается, например, оценить существенную неоднородность строения полимерных сферолитов. Дальнейшим шагом в направлении развития метода индентирования явилось уменьшение размеров индентора – трехгранной алмазной пирамиды – на три порядка до 10–1000 nm.

Это позволяет осуществлять оценку свойств поверхности (нанотвердость, модуль упругости и др. характеристики).

В настоящее время ряд фирм выпускают специальные приборы для микро- и наноинденторометрии (табл. 1).

Основные характеристик инденторов

№	Основные параметры	Микроиндентометр (CSEM)	Наноиндентометр (Micro Material Lim.)
1	Максимальная нормальная нагрузка	10 N ± 0,001 N	0,5 N ± 20 mN
2	Максимальная глубина внедрения	50 μm ± 0,01 μm	–
3	Максимальная сила трения	10 N ± 0,0011 N	200 mN
4	Максимальные размеры образца	105 мм x 135 мм	50 мм × 50 мм
5	Максимальная длина царапания	до 20 мм	до 500 мм

Использование наноиндентирования позволило найти новые возможности изучения физических и механических свойств тончайших поверхностных слоев. К примеру, глубины (а это – показатели упругости и пластичности) внедрения наноиндентора в необработанную и обработанную (имплантированный бором титан) поверхности существенно отличаются [3]. Можно наблюдать на наноуровне и характерную ползучесть [4, 5]. Наносклерометрия позволяет оценить адгезионную прочность полимерных и порошковых покрытий [6, 7], неоднородность структуры и межфазных свойств материалов композиционного состава [8, 9].

В последние годы особенно активизировались исследования микроадгезии, микротрения, микроизнашивания и микросмазки. Полученные принципиально новые научные данные о природе и механизме этих явлений не только применительно к техническим, но и биологическим объектам [10–18].

В Беларуси нанотрибологические исследования были начаты в конце 70 г.г. текущего столетия в Институте механики металлополимерных систем. В докладе [19] была сформулирована, пригодная для прикладного анализа, трехуровневая модель шероховатой поверхности, затем развитая в работах [19–20] и обобщенная в монографии [21]. Далее в ИММС НАНБ начатое стало активно развиваться в плодотворном международном сотрудничестве. Сегодня “гомельская школа” – один из признанных в мире центров нанотрибологии [21–27]. Кроме Гомеля, такие исследовательские работы ведутся в Гродно (ГрГУ им. Я.Купалы и ОПР НАНБ) [28–31] и начаты в НИИ порошковой металлургии (Минск).

## Микротехника

Появление зондовых нанометодов создало принципиально новые возможности для миниатюризации современной техники и, прежде всего, в создании нового класса микроэлектромеханических систем (MEMS), развитии микротехнологий, наноэлектроники, различных микроинструментов и приборов. Наиболее концентрированы проблемы создания микротехники в аэрокосмических отраслях [32, 33], связанные с созданием микроспутников, микроприборов, нанокомпьютеров, микросенсорных устройств, микрозеркал, микрооптоэлектронных систем, микрофрижидеров, химических и биохимических микрореакторов, миниатюрных телероботов. При их производстве и эксплуатации приходится сталкиваться с поверхностными явлениями, включая трибологические проблемы. Особенно чувствительны к трибологическим процессам MEMS и технологии профилирования [34–37].

Физически существенные силы поверхностного притяжения, например, между полупроводниковыми поверхностями MEMS и смазками (или загрязнениями) могут возникать вследствие Ван-Дер-Ваальсовых, водородных и капиллярных сил (рисунок). Водородные и межмолекулярные связи значительны только в областях очень близкого контакта. Капиллярные силы действуют активно во всех типичных MEMS-измерениях [37].



Энергия адгезии для поверхности MEMS из силикона

Поэтому роль трибологии в создании современной микротехники очень велика и, очевидно, будет возрастать.

### Заключение

Недавно американские биологи К. Отэль и Р. Фулл, инженеры Т. Кенни и Р. Фиринг, изучая уникальную способность некоторых ящериц легко передвигаться по зеркальным поверхностям, обнаружили, что конечности этих пресмыкающихся заканчиваются миллионами тончайших щетинок, каждая из которых, в свою очередь, расщеплена на микропластинки, заканчивающиеся контактными поверхностями размеров в десятки нанометров. Сотни миллионов таких наноконтактов обеспечивают очень высокое межмолекулярное сцепление с очень гладкими поверхностями.

Природа еще раз показала, что законы мироздания познаются только после соответствующего скачка в измерительной технике и научных знаниях человечества.

Нантехнологии и их научное обеспечение – одно из самых перспективных направлений современной и будущей конкурентоспособной науки и техники и требуют повышенного внимания и поддержки общества для своего развития.

### Литература

1. Pollock H.M. Nanoindentation / ASM Handbook. V. 18, "Friction, Lubrication and Wear Technology". Ed. by P.J.Blau. ASM International, 1992, p.p. 419–429.
2. Blau P.J. Glossary of Terms / ASM Handbook. V. 18, "Friction, Lubrication and Wear Technology". Ed. by P.J.Blau. ASM International, 1992, p.p. 2–21.
3. Pollock H.M., Maugic D., Barquins M. Characterization of Sub-micrometr-Layers by Indentation. // Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering, ASTM STP 889, P.J. Blau and B.R.Lawn. Ed., ASTM, 1986, p. 47–71.
4. Mannula S.P., Stone D., Li C.Y. Determination of Time-Dependent Plastic Properties of Metals by Indentation Load Relaxation Techniques / Electronic Packaging Material Science (Symp. Proc. 40), MRC, 1985, p. 217–224.
5. Syed Asif S.A., Pethica J.B. Nano-Scale Indentation Creep Testing at Non-Ambient Temperature. // J. Adhesion, 1998, v. 67, p.p. 153–165.
6. Ritter J.E., Lardner T.J., Rosenfeld L., Lin M.R. Measurement of Adhesion of Thin Polymer Coating by Indentation // J. Appl. Phys., v. 66, 1989, p.p.3626–3634.
7. Russ B. E., Tabbot J. B. A Method for Measuring the Adhesion Strength of Powder Coatings // J. Adhesion, 1998, v. 68, p.p. 257–268.
8. Ross J.D.V., Pollock H.M., Guo Q.. Fine-Scale Adhesive and Frictional Interactions between Ceramics // Powder Technol., v. 65, 1991, p.p. 21–35.
9. Topolski L.T.T. Continuous Microindenntor Puch-Through Thechnique for Meachuring Interfacial Shear strength of Fiber Composites // Compos. Sci. Technol. v. 34, 1989, p.p. 289–303.
10. Dulevey F., Gourdon D., Dupas E., Liley M., Duschl C., Kulik A.J., Gremand G., Burnham N.A. Micromechanics and Microtribology of Polymer Films, p.p. 118–123; Blachmann G.S., Lin L., Matheson R.R. Micro- and Nano-Wear of Polymeric Materials, p.p. 206-218 / Microtribology. American Chemical Society, 2000.
11. Overney R., Meyer E. Tribological investigations using friction force microscopy // MRS Bulletin, 1991, 60, p.p. 1438–1444.

12. Feldman K., Fritz M., Hahner G., Marti A., Spencer N.D. Surface force, surface chemistry and tribology // *Tribology Int.*, v. 31, N1–3, 1998, p.p. 99–105.
13. Czajka R., Mielcarek S., Mroz B., Szuba S., Kusuya A., Kaszczyszyn S. Atomic force microscopy and friction force microscopy studies of ferroelastic crystal surfaces // *Wear*, v. 238, 2000, p.p. 34–39.
14. Han Y., Schmitt S., Friedrich K. Microfriction of various phases in carbon fiber, polytetrafluoroethylene, graphite and polyetheretherketone composite blend as measured by atomic force microscopy // *Tribology Int.*, v. 31, N12, 1998, p.p. 715–725.
15. Batteas J.D., Quan X., Weldon M.K. Adhesion and wear of colloidal silica probed by force microscopy // *Tribology Letters*, N7, 1999, p.p. 121–128.
16. Ravikiran A., Low T.S. Nano-Wear mechanism of amorphous carbon thin films // *Tribology Letters*, N8, 2000, p.p. 41–43.
17. Bowen W.R., Lovit R.W., Wright C.J. Application of atomic force microscopy to the study of micro-mechanical properties of biological materials // *Biotechnology Letters*, v. 22, 2000, p.p.893–903.
18. Scherge M., Gorb S.N. Microtribology of biological materials // *Tribology Letters*, v. 8, 2000, p.p. 1–7.
19. Белый В.А., Петроковец М.И., Свириденко А.И. Многоуровневая модель шероховатого контакта / В сб.: “Триботехника и антифрикционное материаловедение”, Новочеркасск, 1980, с. 167–168.
20. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Статистическая модель упругого контакта с учетом субшероховатости // *Трение и износ* т. VIII, №6, 1985, с. 982–989.
21. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. – Минск, Наука и техника, 1990. – 272 с.
22. Чижик С.А., Грояновский А.М., Свириденко А.И. Исследование субмикрорельефа поверхностей трения методом сканирующей туннельной микроскопии // *Трение и износ*, т. 12, №4, 1991, с. 596–603.
23. Чижик С.А., Горбунов В.В., Мышкин Н.К. Компьютерное моделирование зоны контакта твердых тел в молекулярном масштабе на основании данных сканирующей туннельной микроскопии // *Трение и износ*, т. 14, №4, 1993, с. 634–644.
24. Chizhik S.A. Scanning probe microscopy as a method of control of structure, geometry and physical surface properties // *Computers methods and inverse problems in nondestructive testing and diagnostics*. Minsk, 1995, p.p. 332–335.
25. Chizhik S.A., Huang Z., Gorbunov V.V., Myshkin N.K., Tsukruk V.V. Micromechanical properties of elastic polymeric materials as probed by scanning force microscopy // *Langmuir*. – 1998.– Vol.14, № 9.– P.3012–3015.
26. Chizhik S.A., Goldade A.V., Korotkevich S.V., Dubravin A.M. Friction of smooth surfaces with ultra-fine particles in the clearance // *Wear*, N. 238, 2000, p.p. 25–33.
27. Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Chizhik S.A. Basic problems in contact characterization at nanolevel // *Tribology International*. 1999. P. 379–385.
28. Маскевич С.А., Свекло И.Ф., Януль А.И., Набиев И.Р., Кивач Л.Н., Свириденко А.И. Дальнодействие усиления гигантского колебательного рассеяния и сканирующая атомно-силовая микроскопия // *ДАН БССР*, т.40, №1, 1995, с. 55–59.
29. Лещик С.Д., Струк В.А. Исследование особенностей морфологии электрохимических композиционных покрытий на основе хрома / В сб. “3-ий Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии”, Гродно, 1998, с. 68–70.
30. Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Sveklo I.F. Microtribological problems of physics and mechanics in smooth surface contact // *Tribology Int.*, v. 29, N5, 1996, p.p. 377–386.
31. Sviridenok A.I., Sveklo I.F., Chizhik S.A. Investigation of the surface of the biotechnologically modified polyamide fiber by the atomic force microscopy / In “3-th Belarussian seminar on Scanning probe microscopy.” Grodno, 1998, p.p. 110–113.
32. Proceeding of the International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications. The Aerospace Press. 1995, 550 p.
33. Microengineering Aerospace Systems. Ed. H.Hevajian. The Aerospace Press, 1997, 707 p.
34. Bhushan B. Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices. 2-onded, New-York. Springer-Verlag, 1996, 750 p.
35. Shu X.-Y., Houston J.E. Molecular lubricant for Silicon-based micromechanical systems (MEMS): a novel assembly strategy // *Tribology Letter*, N7, 1999, p.p. 87–90.
36. Matsuyama K. Microfabricated Cantilever for AFM (FFM) // *Japanese Journal of Tribology*, v. 42, N11, 1997, p.p. 1201–1211.
37. Kahn H., Hemer A.H., Jacobs S.J. Materials Issues in MEMS // *Materials Today*, v. 2, N2, 1999, p.p. 3–7.