

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В КОЭФФИЦИЕНТЕ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МИКРО- И НАНОШКАЛЕ

Тюрин А.И., Пирожкова Т.С.

Научно-исследовательский институт «Нанотехнологии и наноматериалы»  
ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»,  
г. Тамбов, Россия, E-mail: tyurin@tsu.tmb.ru

Трение является одним из неотъемлемых процессов сопровождающих взаимодействие различных деталей и механизмов. При этом, несмотря на огромный опыт эксплуатации готовых изделий и большое количество публикаций [1–10], до сих пор остаются дискуссионными вопросы связанные с изучением процесса трения и поведением коэффициента трения различных материалов в микро- и наномасштабе.

Это обусловлено тем, что взаимодействие сопрягающихся поверхностей при трении происходит на микро- и наномасштабе, путем множественных локальных быстротечных контактов возникающих на неровностях с характерными размерами достигающими сотен и даже десятков нанометров и осуществляем достаточно хорошо аттестованных методик и оборудования, способного исследовать и характеризовать эти множественные контакты в большом количестве. Вместе с тем развитие нанотехнологий, переход к устройствам НЭМС и МЭМС стимулирует исследование вопросов связанных с природой трения особенно на микро- и наномасштабе. При этом прямые исследования крайне затруднительны и практически невозможны. Однако смоделировать условия эксплуатации различных конструкций в максимально контролируемых условиях возможно современными методами микро- и нанометрирования, которые позволяют исследовать широкий спектр локальных физико-механических свойств различных материалов [1,7,11-17].

Целью работы явилось смоделировать и изучить процессы, возникающие при трении на микро- и наномасштабе.

Для исследования применяли метод динамического индентирования, который заключается в одновременном приложении к индентору нормальной и латеральной нагрузок и записи кинетически происходящих при этом процессов.

В качестве объектов исследования был выбран ряд практически важных материалов – керамика (высокопрочная наноструктурированная TZP керамика на основе бадделеита – природного диоксида циркония), металлы и металлические сплавы (Al, сталь 3), ионные и ковалентные монокристаллы (LiF, Si, Ge), покрытие WC, полимеры (ПТФЭ, ПММА) для которых в литературе практически отсутствуют данные по масштабной зависимости коэффициента трения, особенно в микро- и наномасштабе.

В качестве контртела применялся сферический индентор (с радиусом  $R = 310$  мкм) выполненный из высокопрочной наноструктурированной TZP керамики на основе бадделеита.

Непрерывная регистрация нормальной и латеральной составляющих сил ( $F_N$  и  $F_L$ ) и смещений ( $h_N$  и  $h_L$ ) реализуемых при воспроизведении трибоконтактов индентором и дальнейший анализ регистрируемых данных позволяет моделировать процессы трения и износа. Мерой оценки служит коэффициент трения  $k_{тр}$ , который определяется отношением силы сопротивления относительно перемещению индентора при трении (латеральной силы  $F_L$ ) и нормальной составляющей реакции внешних сил  $F_N$ , действующих на поверхность тела в зоне контакта.

Полученные зависимости значений  $k_{тр}$  от  $F_N$  для ряда исследованных материалов приведены на рисунке 1. Их анализ показывает, что все они имеют характерный достаточно ярко выраженный минимум, соответствующий некоторому оптимальному значению нормальной силы  $F_{Nopt}$ .

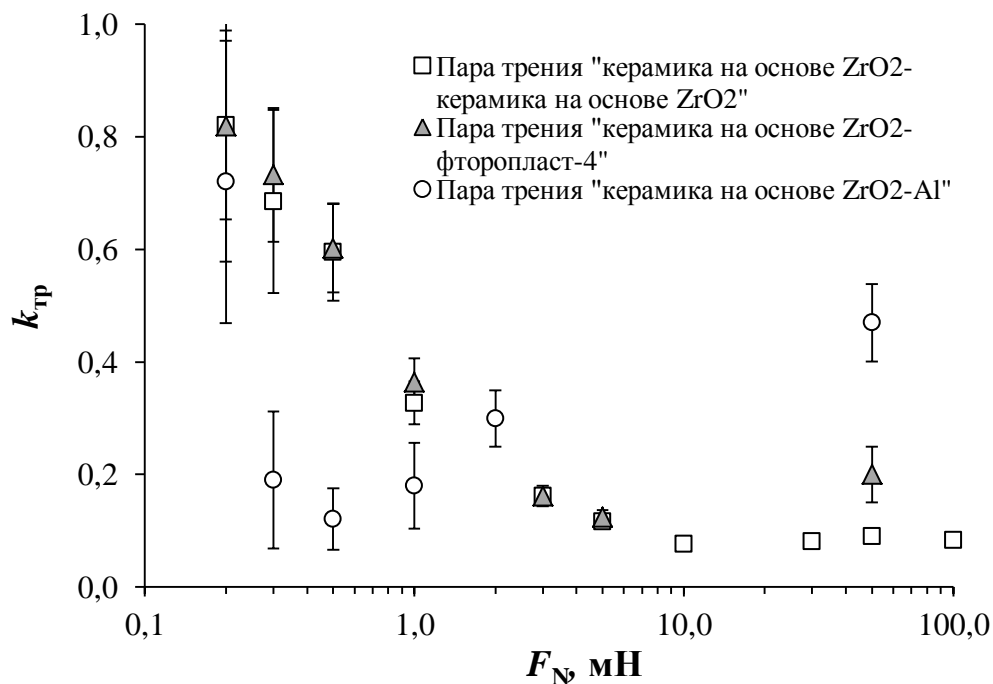


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость коэффициента трения  $k_{тр}$  от величины нормальной нагрузки  $F_N$  для ряда исследованных материалов

В теоретических оценках, проводимых на основе молекулярно-механической теории трения, развитой Ф.Боуденом, Д.Тейбором, Б.В.Дерягиным и др. [1-10], процессы трения принято рассматривать как процесс взаимодействия шероховатости и волнистости поверхностей контактирующих тел. Этот процесс происходит всегда дискретно, т.е. происходит в отдельных пятнах локальных контактов и разбивается на молекулярную  $k_{тр.мол.}$  и деформационную  $k_{тр.деф.}$  составляющие коэффициента трения [1-10]. При этом  $k_{тр}$  может быть представлен в виде выражения (1)

$$k_{тр} = k_{тр.мол.} + k_{тр.деф.} = \frac{F_{тр.мол.}}{F_N} + \frac{F_{тр.деф.}}{F_N} \quad (1)$$

Теоретический анализ [3-5] показывает, что при упругом контакте с увеличением нагрузки молекулярная составляющая коэффициента трения уменьшается, а деформационная – возрастает. В общем случае это приводит к тому, что на зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки наблюдается характерный минимум, соответствующий некоторым оптимальным значениям  $F_N$  [5].

Сопоставление полученных экспериментальных данных (рис.1) с ходом теоретической зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки показывает на их хорошее качественное соответствие для всех исследованных материалов.

Кроме того полученные данные показывают на наличие размерных эффектов в коэффициенте трения для всех исследованных материалов, которые выражаются в том, что с ростом нагрузки, а следовательно и размера зоны контакта взаимодействующих тел, коэффициент трения вначале достаточно резко падает с ростом нормальной нагрузки, вплоть до некоторого значения  $F_{N_{опт}}$ , а затем начинает расти с ростом  $F_N$ . Величина  $F_{N_{опт}}$  зависит от типа исследованного материала и пары трения. Так, например, для пары трения TZP керамика – фторопласт величина  $F_{N_{опт}} = 5$  мН; для пары трения TZP керамика – Al,  $F_{N_{опт}} = 0,5$  мН; для пары трения TZP керамика – TZP керамика,  $F_{N_{опт}} = 10$  мН (см. рис.1.).

Таким образом в работе для широкого класса материалов (керамики, ковалентные и ионные монокристаллы, металлы и металлические сплавы, полимеры) установлено влияние масштабного фактора на коэффициент трения в микро- и

наношкале. Для всех материалов и пар трения, в исследованном диапазоне нормальных нагрузок, показано хорошее качественное соответствие хода теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента трения от  $F_N$ .

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект 15-19-00181).*

**Список литературы:**

1. Bhushan B. Introduction to tribology. John Wiley & Sons, Ltd. New York. 2013. 714 p.
2. Lyubimov D., Dolgopolov K., Pinchuk L. Micromechanisms of Friction and Wear: Introduction to Relativistic Tribology. – Springer Science & Business Media, 2013. 210.
3. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 370 с
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
5. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники. М: Машиностроение, 2008. 206 с
6. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение. 1968. 544 с.
7. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2008. 312 с.
8. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. 2000, Т.170, №6, С. 586-618.
9. Рехвиашвили С. Ш. Дислокационный механизм трения при взаимодействии нанозонда с поверхностью твердого тела // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. №. 2. С. 140-142.
10. Myshkin N. K., Braunovich M., Konchits V. V. The mechanics and tribophysics of electrical contacts // Journal of Friction and Wear. 2015. V. 36. №. 6. P. 454-467.
11. Golovin Yu. I., Ivolgin V.I., Tyurin A.I., Khonik V.A. Serrated deformation of aPd<sub>40</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub>P<sub>20</sub> bulk amorphous alloy during nanoindentation // Physics of the Solid State. 2003. V. 45. № 7. P. 1267–1271.
12. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы ранних стадий внедрения жесткого индентора при микроиндентировании ионных кристаллов // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 5. С. 884-886.
13. Головин Ю.И., Шибков А.А., Боярская Ю.С., Кац М.С., Тюрин А.И. Импульсная поляризация ионного кристалла при динамическом индентировании // Физика твердого тела. 1988. № 11. С. 3491-3495.
14. Golovin Yu.I., Tyurin A.I. Dynamics and micromechanisms of the deformation of the ionic crystals in pulsed microindentation // Physics of the Solid State. 1996. Т. 38. № 6. С. 1000-1003.
15. Головин Ю.И., Иунин Ю.Л., Тюрин А.И. Скоростная чувствительность твердости кристаллических материалов в условиях динамического наноиндентирования // Доклады Академии наук. 2003. Т. 392. № 3. С. 336-339.
16. Викторов С.Д., Головин Ю.И., Кочанов А.Н., Тюрин А.И., Шуклинов А.В., Шуварин И.А., Пирожкова Т.С. Оценка прочностных и деформационных характеристик минеральных компонентов горных пород методом микро- и наноиндентирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 4. С. 46-54.
17. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Aslanyan E.G., Pirozhkova T.S., Vorob'ev M.O. Local physicomaterial properties of materials for use in calibration of nanoindentation instruments // Measurement Techniques. 2016. V. 59. N 9. P. 911-915.