

ют не только упругие свойства нанокристалла, но и влияют на его электрофизические свойства, поскольку дефекты различной конфигурации должны иметь разную систему уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Список литературы

1. Tersoff J. Enhanced solubility of impurities and enhanced diffusion near crystal surfaces // Phys. Rev. Lett. 1995. **74**. 5080.
2. Segall D. E., Arias T. A. Elasticity of nanometer-sized objects // Phys. Rev. 2002. **65**. 214109.

3. Balamane H., Halicioglu T., Tiller W. A. Comparative study of silicon empirical interatomic potentials // Phys. Rev. 1992. **46**. 2250.
4. Tersoff J. New empirical approach for the structure and energy of covalent systems // Phys. Rev. 1988. **37**. 6991.
5. Tersoff J. New empirical model for silicon with improved elastic properties // Phys. Rev. 1988. **38**. 9902.
6. Ramana Murty M. V., Atwater H. A. Empirical interatomic potential for Si—H interactions // Phys. Rev. 1998. **57**. 13295.
7. Герузин Я. У. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 344 с.
8. Yu D. K., Zhang R. Q., Lee S. T. Structural transition in nanosized silicon clusters // Phys. Rev. 2002. **65**. 245417.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.

УДК 681.586

Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук, доц.
Санкт-Петербургский государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТРИБОЛОГИИ

Рассмотрены тенденции развития современной трибологии на микро- и наноуровнях, указаны проблемы и направления их решений, а также их взаимосвязь с традиционной трибологией.

В современной трибологии наблюдается тенденция перехода к моделям, рассматривающим контакт на микро- и нанометровом уровнях [1, 2].

С одной стороны, трибология появилась из недр классической механики и использует ее методы, результаты и подходы, а с другой — стимулирует интерес механиков к так называемым неклассическим задачам, адекватным условиям реального контакта — с учетом дискретности и поверхностных сил.

Общая тенденция к миниатюризации [3, 4] настоятельно требует для моделей фрикционного контакта перехода от рассмотрения объемных свойств материала к изучению их поверхностных свойств, оцениваемых по данным микро- и наноиндентирования.

Основной проблемой остается физическая интерпретация экспериментальных данных при изменении масштаба измерения, поскольку *в зависимости от избранного уровня такие характеристики, как модуль Юнга и твердость, могут отличаться не только по величине, но и по физическому смыслу* [1].

При этом следует иметь в виду, что при взаимном скольжении твердых тел механические свойства контактирующих материалов могут изменяться под действием теплоты, генерируемой при трении. Хотя существуют многочисленные теории,

позволяющие рассчитать объемную и поверхностную температуры и температуру вспышки, но механизм генерирования теплоты остается, по существу, не очень ясным. И здесь определенные перспективы можно связать с моделями нанотрибологии, описывающими процессы возникновения и разрушения молекулярных фрикционных связей.

Такой переход заставляет механиков подвергать ревизии физические основы своей науки, формулируя задачи на стыке молекулярной и статической физики, проливает свет на фундаментальные проблемы трибологии, такие как связь между адгезионными и деформационными механизмами трения [2].

Условно тенденция может быть выражена так. При переходе от макро- к наномодели снижается влияние механических свойств и топографии, повышается влияние таких факторов, как поверхностные силы и выделение тепла. В моделях же трения влияние деформаций, доминирующее в макромире (до 10^{-3} м), в микромасштабе (до 10^{-6} м) сравнивается с адгезией, а на наноуровне (до 10^{-9} м) полностью вытесняется последней. При этом нужно отметить, что различие микро- и наноуровней заключается в наличии или отсутствии сплошности материалов.

Известно множество видов изнашивания, но в реальности не существует трибосистем с единственным видом изнашивания.

Общепринято, что форма частиц износа и внешний вид изношенных поверхностей ясно указывают на вид изнашивания. Однако совместное действие адгезии, пластической деформации, усталости, отслаивания, нагрева и т. д., т. е. различных видов изнашивания, в некоторых случаях приводит к возникновению частиц яйцеобразной формы с максимальным размером до 5 мкм. При достаточно большом количестве указанных частиц наблюдается снижение потерь на трение и замедление процесса изнашивания. И если при этом проводится замена смазки, то вначале фиксируется повышение износа соприкасающихся поверхно-

стей и увеличение потерь на трение. Последнее, якобы парадоксальное, явление объясняется появлением наряду с трением скольжения трения качения. Кроме того, впадины микрорельефа играют роль ловушек для твердых частиц износа и определяют способность удерживать эти частицы, локализуя их действие и снижая износ. Механизм же образования указанных выше частиц пока неясен и, наверное, также связан с решением задачи на микро- и наноуровнях.

Контакт твердых тел и трение реализуются на микроскопически малых участках реальных площадей контактов, но только, начиная с 1970-х годов, трибологи столкнулись с проблемами трения и износа на микроуровне. Это произошло в результате бурного развития компьютерной техники, потребовавшей создания устройств записи, хранения и обработки информации на магнитных носителях памяти [1].

Развитие техники затронуло много других областей, где контроль трения и износа в микро- и наномасштабе стал необходимостью. Новая область трибологии, определяемая сейчас как микро- и нанотрибология, стала основой разработки нового класса приборов — МЭМС, и новой области микросистемных технологий. Микросистема определяется как миниатюрный прибор [2], сочетающий функции датчика, преобразователя сигнала и исполнительного механизма, т. е. мехатронный объект на микроуровне [3]. Трение, смазка и износ в микросистемах реализуются на очень гладких площадках контакта, соизмеримых с размерами самих систем, и поэтому роль адгезии и поверхностных сил в них очень велика.

Поскольку микроэлектронные технологии основаны на использовании кремния и его оксидов, механические и трибологические характеристики которых очень низки, это требует применения специальных сверхтонких покрытий или методов модификации поверхностного слоя, например, ионной имплантации.

При этом необходимо напомнить, что метод регуляризации микрорельефа, предложенный проф. Ю. Г. Шнейдером [1, 5, 6] и дающий в макромире эффект резкого снижения трения и износа, имеет ряд ограничений по применению — в частности, это хрупкие, непластичные материалы, пленки, кристаллы.

Для замены используемого процесса вибронакатывания предлагается применять лазерное микроstructuring поверхностей материалов, используемых в МЭМС [6].

Кроме того, лазерное микроstructuring, основанное на местном испарении материала, можно использовать и для решения задач по снижению трения и износа в макромире. Так, для структурированных поверхностей наблюдается повышение срока их эксплуатации в 8 раз, благодаря

образованию микропор [6], которые сохранялись и после завершения эксплуатации. Форма и размер неровностей — взаимосвязанные характеристики поверхности, поэтому для повышения износостойкости предложено использовать сетку достаточно глубоких кратеров, которые будут играть роль и маслосъемных карманов и ловушек для продуктов изнашивания. Такой подход был реализован в работе [7]. Кстати, роль подобных карманов играют полости микропор в микромеханических устройствах, отверстия в которых имеют звездообразную форму вместо традиционной цилиндрической в макромире [3].

В механике уже давно был замечен эффект резкого возрастания трения при уменьшении нагрузки до 30 Н, что учитывалось эмпирическим коэффициентом Понселе. Недавно был зарегистрирован еще один эффект — резкое (на порядок и более) увеличение трения при увеличении длины трибопары всего в 1,5 раза [8]. Однако механизм этого явления [9] полностью до сих пор не ясен. Переход к микро- и наномоделям трения должен дать ответ на указанные выше вопросы.

В заключение необходимо отметить, что микро- и нанотехнологии будут продолжать бурно развиваться в XXI веке на базе таких достижений науки, как сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия, новые технологии и материалы. Дальнейшее развитие современных технологий невозможно без использования достижений механики контактов, теории адгезии и граничной смазки, т. е. разделов традиционной трибологии.

Из всего изложенного выше можно заключить, что новые разделы трибологии, связанные с микро- и наноуровнями, иллюстрируют прекрасные возможности старой, как мир, науки в эпоху новых технологических возможностей, в частности, в области микросистемной техники.

Список литературы

1. Петроковец М. И., Мышкин Н. К., Чижик С. А. // Трение и износ. 1997. № 2. Т. 18. С. 147—154.
2. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. Гомель: Изд-во ИММС НАН Б, 2002. 310 с.
3. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5—9.
4. Шалобаев Е. В. Проблемы микросистемной техники и XXI век // Микросистемная техника. 2001. № 3. С. 37—38.
5. Шнейдер Ю. Т. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб.: ИТМО, 2001. 120 с.
6. Вейко В. П., Дышловченко С. С. Лазерное микроstructuring поверхностей // Научно-технический вестник СПбГТИО (ТУ). 2001. № 4. С. 119—129.
7. Weber H. R. Laser microstructuring of surface for improving their tribological performance // Proc. SPIE. V. 4157. Laser-assisted Microtechnology. 23—25 August 2000. P. 105—112.
8. Шалобаев Е. В., Петров С. Ю., Шапошников М. М., Громова С. В. Проблемы лентопротяжного механизма мехатронного устройства // Материалы Межвузовской конференции: 28-я неделя науки в СПбГТУ. В 5 частях. Ч. 2. СПб.: ГТУ, 2000. С. 30—31.
9. Мусалимов В. М., Лертунгуранг К. Бифуркации в механизмах // Известия вузов. Приборостроение. 2002. № 2. С. 36—46.