ДИНАМИКА МИКРОКОНСОЛИ В ПОЛУКОНТАКТНОМ РЕЖИМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

С. О. Пантелей

Развитие атомно-силовой микроскопии обусловило необходимость исследования колебаний микроконсоли атомно-силового микроскопа (АСМ), действие которого основано на механике, в различных режимах. Рабочим органом АСМ является консольно-закрепленная балка, на конце которой установлен зонд – тонкое острие. Консоль приводится в движение генератором колебаний. Ее приближают к поверхности образца, изображение которой требуется получить. При достаточном сближении с поверхностью колеблющаяся консоль попадает в поле действия сил Ван дер Ваальса (притягивающих). В то же время консоль перемещают вдоль заданного направления. Под действием сил Ван дер Вальса амплитуда колебаний консоли уменьшается; вычисляются отклонения консоли; сравниваются колебания консоли вдали от поверхности и в поле ван-дер-ваальсовых сил. Далее по результатам вычислений формируется изображение. Ситуация описана для небольших амплитуд колебаний консоли и задающего генератора – неконтактного режима работы атомно-силового микроскопа (АСМ). При больших амплитудах колебаний и достаточно близком расстоянии от поверхности консоль, раскачиваясь, в положении наибольшего отклонения от равновесия попадает в поле отталкивающих сил взаимодействия с поверхностью, которые действуют при расстояниях порядка 0,1 нм. При этом происходит внедрение в поверхность образца острия, закрепленного на свободном конце консоли. Это полуконтактный режим сканирования АСМ [1].

Выполнено численное моделирование с помощью пакета Mathematica, при этом для описания движения консоли использовано уравнение колебаний пружины точечной массы [2]. Притягивающие силы вычисляются через потенциал Леннарда-Джонса, отталкивающие силы – по формуле Герца. Рассчитаны графики колебаний консоли, зависимости общей силы от расстояния, глубины внедрения острия консоли в поверхность образца, т.е. деформации поверхности при обстукивании острием консоли, для различных материалов (сталь, кремний, твердый и мягкий полимеры). Материал острия – кремний. Результаты следующие:

- максимальная деформация мягкого полимера ($E_{\text{мп}} = 0{,}3$ ГПа) при внедрении в него кремниевого острия $d_{max} = 3{,}1$ нм, максимальная сила отталкивания при этом $F_{max} = 10$ нН;

• максимальная деформация твердого полимера ($E_{\text{тп}} = 3$ ГПа) при внедрении в него кремниевого острия $d_{max} = 1{,}25$ нм, максимальная сила отталкивания при этом $F_{max} = 30$ нН;

• максимальная деформация кремния ($E_{\text{к}} = 179$ ГПа) при внедрении в него кремниевого острия $d_{max} = 0{,}3$ нм, максимальная сила отталкивания при этом $F_{max} = 140$ нН;

• максимальная деформация стали ($E_{\text{с}} = 200$ ГПа) при внедрении в него кремниевого острия $d_{max} = 0{,}34$ нм, максимальная сила отталкивания при этом $F_{max} = 170$ нН.

Сила отталкивания пропорциональна модулю упругости материала. Данный метод пригоден, т.к. выполняется закон Гука. Заметим, что в наших результатах деформация стали больше деформации кремния, хотя сталь тверже. Это объясняется тем, что при обстукивании стали острием кремниевое острие сминается. Полученные результаты хорошо согласуются с практикой.

Литература

1. *Sarid D.* Scanning force microscopy: with applications to electric, magnetic, and atomic forces / N.Y. 1994.
2. *Sarid D.* Exploring scanning probe microscopy with Mathematica / N.Y. 1997.

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕБЕРНЫХ ГРАФОВ ЛИНЕЙНЫХ 3-УНИФОРМНЫХ ГИПЕРГРАФОВ

А. Х. Перез Чернов

1. Реберные графы линейных 3-униформных гиперграфов

Пусть задано конечное множество V. Под *гиперграфом* H будем понимать тройку $H = (V, E, I)$, где $V \neq \varnothing$, $I \neq \varnothing$, $|I| < \infty$, $E = \{E_i \subseteq V \mid i \in I\}$. Множества $E_i \in E$ называются ребрами гиперграфа H, элементы множества V – вершинами гиперграфа. *Порядком* ребра $E_i \in E$ называют количество вершин, в нее входящих. Гиперграф называют *линейным*, если любые два ребра пересекаются не более чем по одной вершине. Гиперграф называют *3–униформным*, если порядки всех его ребер равны *3*. *Реберным графом* $L(H)$ гиперграфа $H = (V, E, I)$ называется граф, вершины которого биективно соответствуют ребрам гиперграфа и две вершины E_i, E_j из $L(H)$ смежны, тогда и только тогда, когда соответствующие ребра пересекаются. Класс реберных графов линейных 3–униформных гиперграфов обозначают через L_3^l.