

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М.С. Самохина¹, Е Ицун², Ван Либо², Л.С. Новиков³, В.Н. Черник³

¹ Физический факультет МГУ, студ. 5 курса

² Университет Цинхуа (Пекин), стажеры

³ НИИЯФ МГУ

E-mail: Novikov@sinp.msu.ru

Samples of polyimide films and graphite were irradiated by atomic oxygen stream, produced by SINP MSU plasmadynamic accelerator. Then samples were explored by atomic-force and optical microscopes. Images illustrating the irradiation effects were made. Irradiation effects explored are appearing of “nap” on surface of polyimide sample and cones on surface of graphite.

Введение

Для материалов низкоорбитальных космических аппаратов (КА) наибольшую опасность представляет атомарный кислород (АК). В результате воздействия АК происходит распыление материалов поверхности, т.е. потеря массы вещества и изменение структуры приповерхностного слоя [1,2]. В наибольшей степени подвержены такому воздействию полимерные материалы. Для моделирования в лабораторных условиях воздействия потока АК на материалы в НИИЯФ МГУ создан магнитоплазодинамический ускоритель.

В докладе дано краткое описание ускорителя НИИЯФ МГУ и методики лабораторных экспериментов, а также представлены результаты исследования с помощью атомно-силового и оптического микроскопов образцов полиимидных пленок и графита, облученных на данном ускорителе.

1. Атомарный кислород в верхней атмосфере Земли

Атомарный кислород преобладает на высотах ~ 200-700 км. При оценке воздействия АК на материалы КА необходимо учитывать распределение АК в атмосфере в зависимости от солнечной активности.

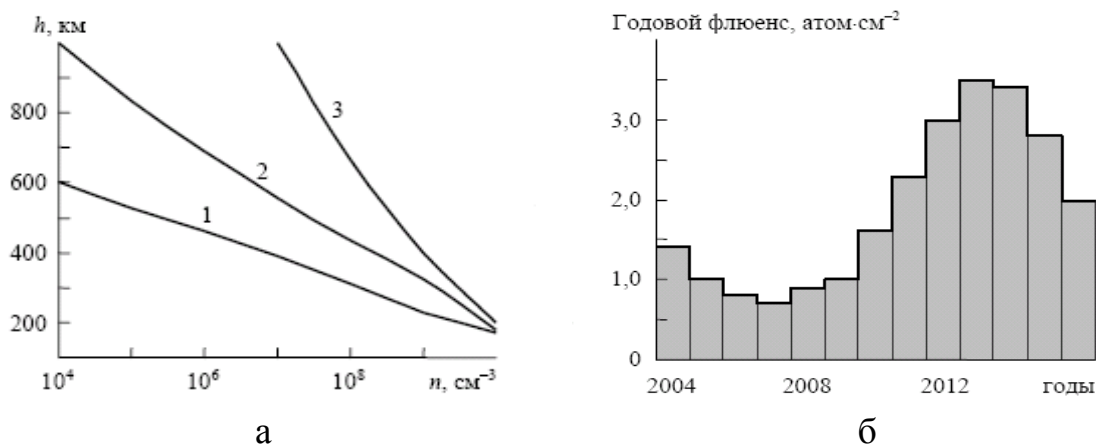


Рис.1. а. Зависимость концентрации АК от высоты при различных уровнях солнечной активности: 1 - минимальная, 2 - стандартная, 3 – максимальная; б. изменение годового флюенса АК в течение 11-летнего солнечного цикла

На рис. 1 приведены данные, характеризующие зависимость концентрации АК от высоты h при различных уровнях солнечной активности и изменение годового флюенса АК в течение 11-летнего солнечного цикла.

2. Механизм воздействия АК на материалы

Поток АК имеет скорость $\sim 8 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ относительно КА. При такой скорости атомы кислорода имеют энергию $\sim 5 \text{ эВ}$. Под действием потока АК происходит химическое распыление материалов за счет взаимодействия атомов кислорода с молекулами, приводящего к образованию летучих окислов. При значениях флюенса АК от 10^{17} до 10^{18} см^{-2} происходит ускорение эрозии из-за развития шероховатости поверхности, что увеличивает эффективность взаимодействия атомов кислорода с материалом поверхности вследствие многократных соударений.

Для количественной характеристики уноса материала под действием набегающего потока АК используется коэффициент эрозии R – массовый, равный соотношению удельной потери массы к флюенсу АК ($\text{г}/\text{атом O}$) и объемный, равный отношению удельной потери объема к флюенсу ($\text{см}^3/\text{атом O}$).

Эрозия полимеров при воздействии АК приводит к уменьшению толщины материала и потере им массы, а также изменению его физико-химических свойств, определяемых поверхностным слоем, например, к возникновению анизотропии оптических характеристик за счет шероховатости поверхности. Для защиты полимерных материалов от АК наносятся стойкие к АК тонкопленочные покрытия. Также исследуются возможности повышения стойкости материалов к воздействию АК за счет модификации поверхностного слоя.

Аналогичное воздействие АК оказывает на углеродные материалы, в том числе различные углепластики, широко используемые в конструкциях современных КА.

3. Методика эксперимента

Для моделирования воздействия потока АК в НИИЯФ МГУ используется магнитоплазодинамический ускоритель кислородной плазмы. На рис. 2 представлена его схема.

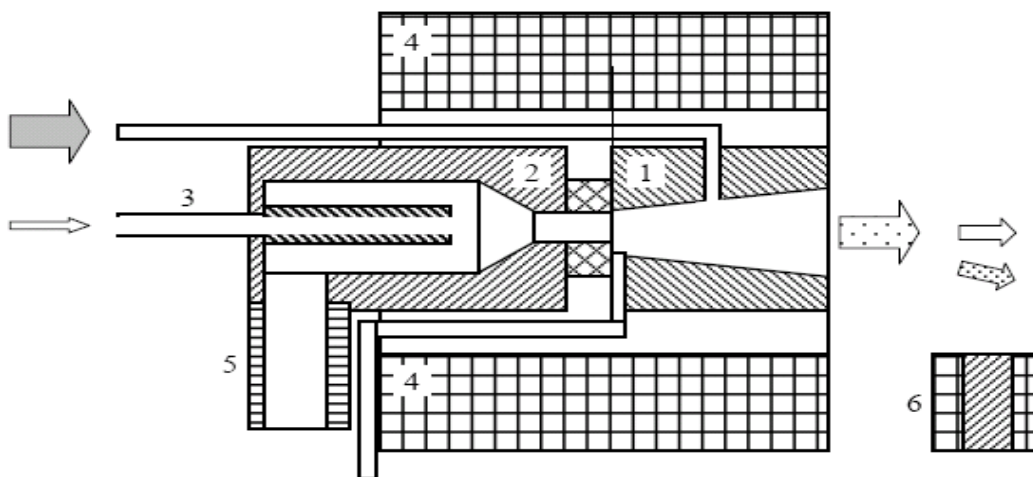


Рис.2. Схема магнитоплазодинамический ускоритель кислородной плазмы:
1 - анод, 2 - ферромагнитный промежуточный электрод, 3 – полюс термокатод, 4 – соленоид, 5 – патрубок дополнительной вакуумной откачки, 6 – отклоняющий электромагнит

Кислородная плазма, образующаяся в разрядном промежутке, ускоряется электрическим полем, возникающим в расходящемся магнитном поле соленоида. Средняя энергия ионов в потоке регулируется в диапазоне 20 - 80 эВ. При этом приведенная к энергии 5 эВ по полиимидному эквиваленту плотность потока ионов и нейтральных частиц кислорода на поверхности образца составляет $(0,6-8)10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Облученные на ускорителе образцы полиимидных пленок и графита исследовались с помощью оптического и атомно-силового микроскопов. Схема атомно-силового микроскопа приведена на рис.3.

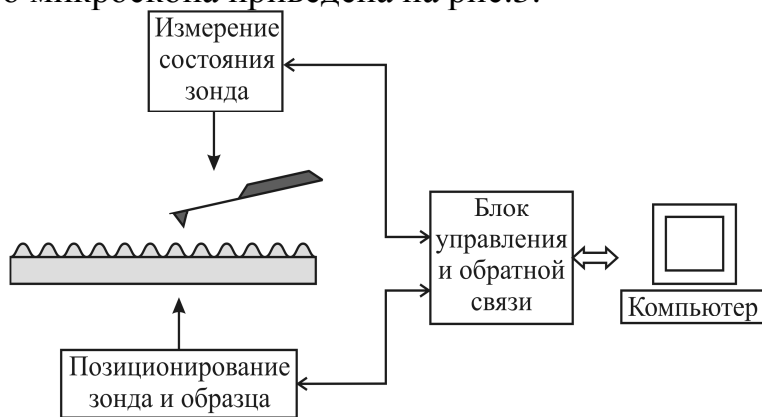


Рис.3. Схема атомно-силового микроскопа.

Исследование поверхности образца производится с помощью зонда, представляющего собой острую иглу, закрепленную на гибкой балке (кантилевере). Радиус закругления иглы не превышает 10 нм. При приближении иглы к образцу на расстояние порядка 1 нм возникает взаимодействие между атомами, находящимися на конце иглы и на поверхности исследуемого образца. Притягиваясь к образцу, балка изгибается пропорционально силе притяжения, величина угла отклонения балки от положения равновесия регистрируется с помощью чувствительного датчика (лазер – фотодиод).

Сканируя поверхность при постоянной силе притяжения, можно получить информацию о рельефе поверхности. Для того, чтобы сила взаимодействия была постоянной, образец приводится в движение с помощью пьезоманипулятора. Движение в горизонтальной плоскости осуществляется таким образом, чтобы зонд перемещался вдоль определенного участка поверхности, построчно его сканируя. Сила взаимодействия зонда с поверхностью поддерживается постоянной с помощью системы обратной связи, изменяющей расстояние между зондом и образцом. Разрешение атомно-силового микроскопа составляет доли нанометра, что позволяет исследовать наноструктуры и даже отдельные атомы.

4. Результаты экспериментов и обсуждение

На описанном выше ускорителе облучались потоком АК образцы полиимидной пленки и графита, при флюенсе 10^{20} см^{-1} . С помощью атомно-силового и оптического микроскопов получены изображения, позволяющие сделать вывод о влиянии облучения образцов потоком АК на рельеф поверхности.

На рис.4. показана в разных представлениях поверхность полиимидной пленки до облучения потоком АК. На изображениях отчетливо видна упорядоченная структура полимерных молекул.

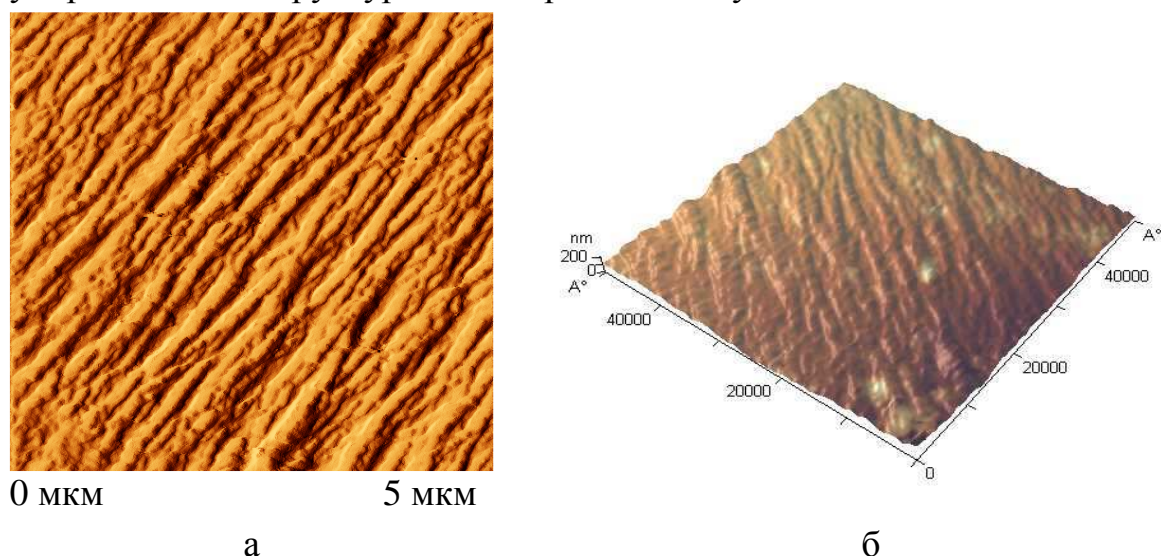


Рис.4. а. Интерпретация изображения с боковой «подсветкой»; б. трехмерная интерпретация изображения

После облучения образца полиимидной пленки потоком АК происходят значительные изменения рельефа поверхности. На рис.5а,б дано изображение границы облученной и необлученной областей на двух участках поверхности. Цветовая шкала, показанная в правой части рисунков, отражает глубину рельефа. На рис.5в представлено сечение поверхности вдоль одной из «строк» сканирования для изображения а), а на рис.5г дана Трехмерная интерпретация изображения б)

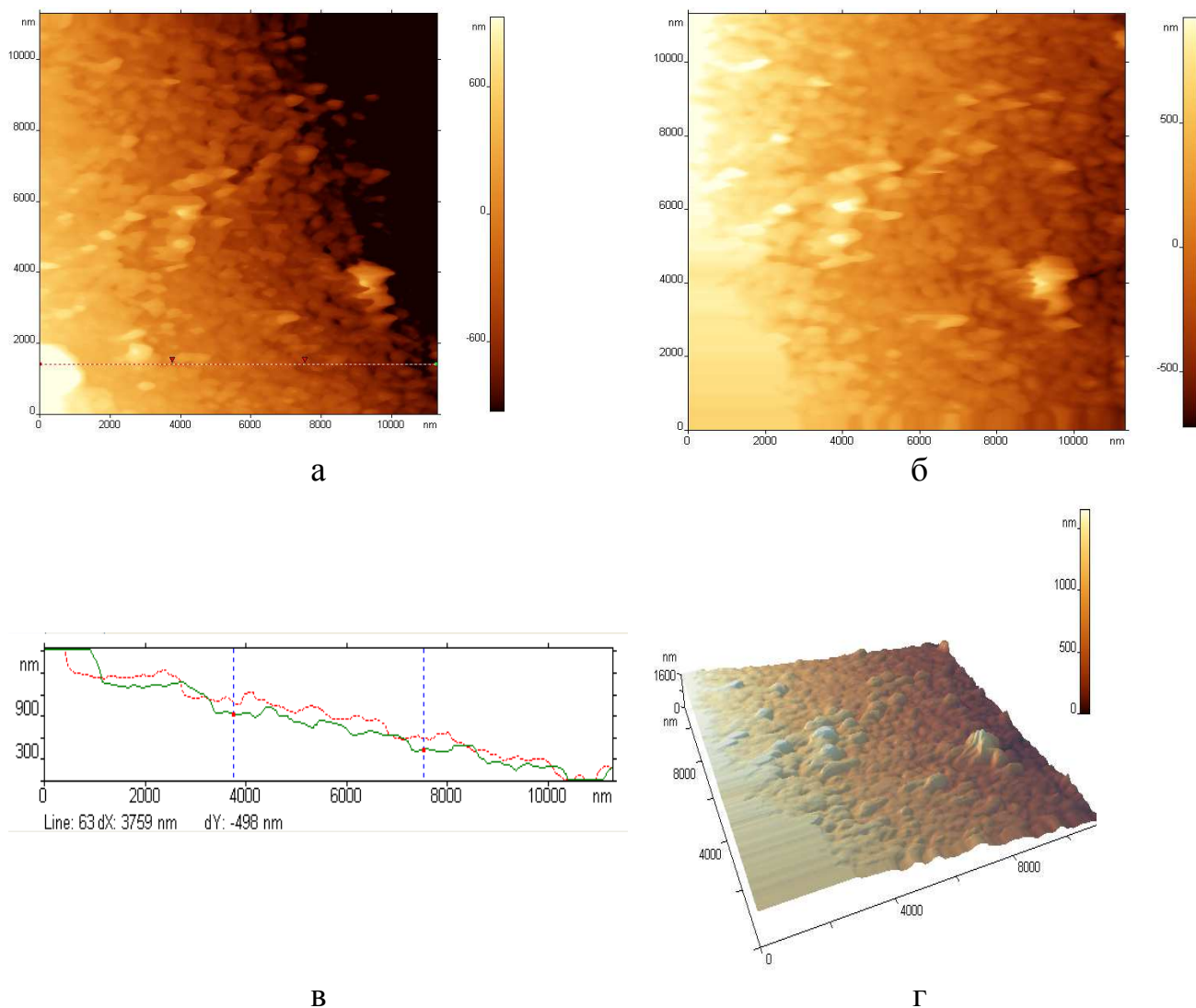
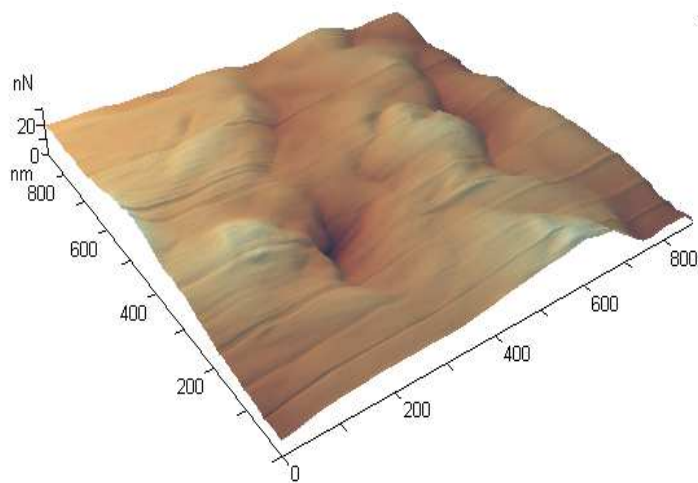


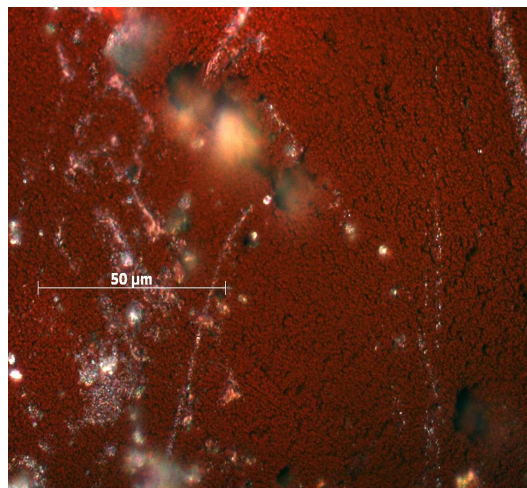
Рис.5. Различные интерпретации изображения поверхности образца полиимидной пленки после облучения потоком АК

На рис.5. можно наблюдать «ворс», образовавшийся в результате процесса эрозии материала под действием АК. На рис.4. б) видно, что диапазон рельефа граничной области составляет примерно 1200 нм, высота рельефа меняется соответственно изменению флюенса от 0 до основного значения.

На рис.6а приведено изображение локальной области повреждения поверхности, а на рис.6б – изображение поверхности, полученное с помощью оптического микроскопа.



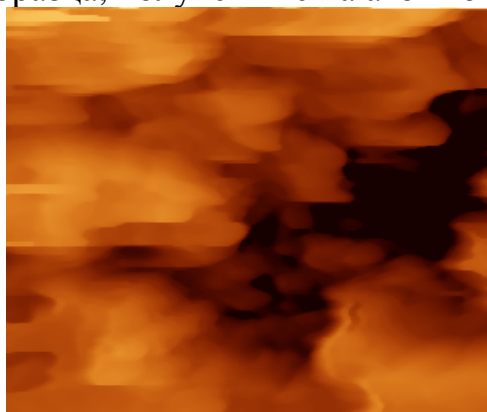
а



б

Рис.6. а. Изображение граничной области в большем масштабе; б. изображение поверхности, полученное на оптическом микроскопе

Были также получены изображения графита, облученного потоком АК при флюенсе $\sim 10^{20}$. На рис.7 и рис.8 представлены изображения поверхности образца, полученные на атомно-силовом и оптическом микроскопах.



0

3μкм

Рис.7. Изображение поверхности образца графита, полученное на атомно-силовом микроскопе

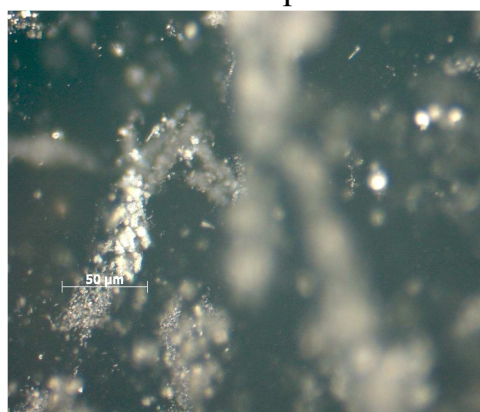


Рис.8. Изображение поверхности образца графита, полученное на оптическом микроскопе

На рис.9 приведено изображение поверхности того же образца, полученное на электронном сканирующем микроскопе.

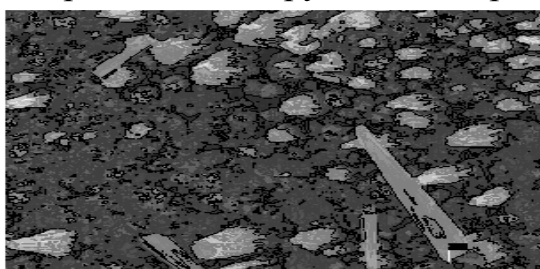


Рис.9. Изображение поверхности образца графита, облученного потоком АК, полученное на электронном сканирующем микроскопе

На рис. 7 можно увидеть вершины неких «возвышений», лежащих на поверхности, но диапазона перемещения пьезоманипулятора атомно-силового микроскопа не хватает для того, чтобы просканировать поверхность у оснований этих «возвышений». На рис.9 видно, что на облученной поверхности графита лежат обломки и основания конусов, получившихся,

очевидно, в результате эрозии материала поверхности графита под действием АК. На основе изображений, полученных атомно-силовым микроскопом, можно оценить высоту конуса: 0.5 – 2 мкм.

В результате анализа полученных данных, можно схематически представить влияние потока АК на образцы графита и полиимида. Схематическое изображение последствий облучения материалов представлена на рис.10.

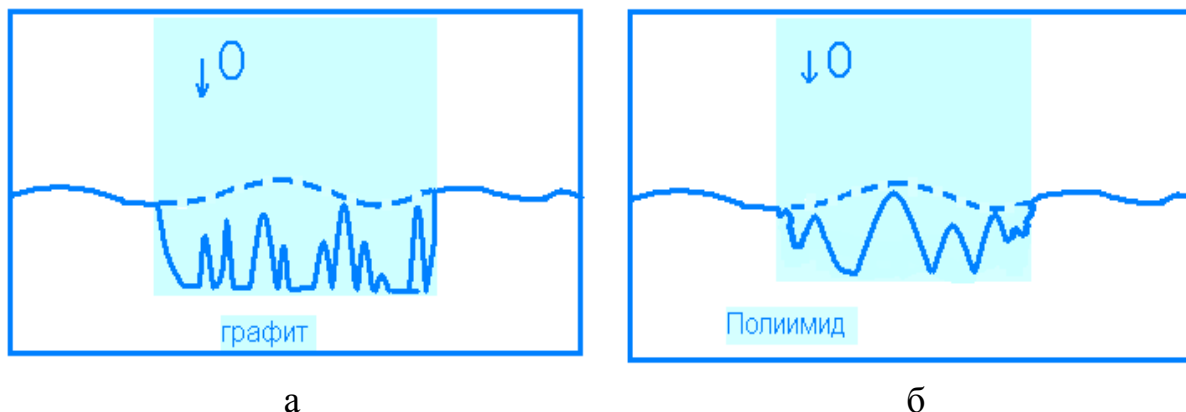


Рис.10. Схематическое изображение последствий воздействия потока АК (а) на поверхность образца графита; (б) на поверхность образца полиимидной пленки

Выводы

1. Воздействие атомарного кислорода вызывает потери массы и изменение рельефа поверхности материалов
2. Для лабораторного моделирования воздействия АК на материалы удобно использовать магнитоплазодинамический ускоритель
3. С помощью атомно-силового микроскопа удастся получить изображения рельефа поверхности с высоким пространственным разрешением, дающие информацию о степени воздействия АК на различные материалы.
4. В результате воздействия потока АК на полиимидную пленку на ее поверхности возникает характерный рельеф, глубиной более 2 мкм, на поверхности графита при таком воздействии наблюдается образование конусов высотой 0,5 – 2 мкм.

1. Новиков Л.С., Черник В.Н., Бабаевский П.Г. и др. Перспективные материалы, 2001, №5, с. 20-26.
2. Novikov L.S., Chernik V.N., Naumov S.F. et al. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, Vol. 43, No. 3, p. 534-537.