

НАНОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОРГСТЕКЛА ОБРАБОТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ (WATER JET TECHNOLOGY) ВЫСОКОНАПОРНОЙ ВОДНОЙ СТРУИ

¹С.А. Чижик, ²А.И. Свириденок, ²М.И. Игнатовский, ³Hartmut Louis

¹Институт механики металлополимерных систем НАНБ им. В.А. Белого ул. Кирова 32а, 246652, Гомель, Беларусь, e-mail schizhik@hotmail.com

²Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения НАНБ, пл. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь, E-mail: resource@mail.grodno.by

³Hannover Institut fuer Werkstoffkunde, Appelstr. 11A, 30167 Hannover, Federal Republic of Germany

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы заметно повышается интерес к водоструйным технологиям в связи с развитием высоконапорной (давление до 400 ÷ 500 МПа) техники и расширением областей их использования: медицинские операции, рециклинг металлических изделий, подводная резка затонувших морских судов и т.д. [1]. Несмотря на большое количество публикаций в области Water Jet Technology, тонкий механизм водоструйного разрушения поверхностей, особенно полимерных, мало изучен [2].

Зондовая микроскопия, как показывают результаты предварительных исследований, даёт возможности оценки свойств поверхностей на наноуровне [3-6].

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальные оценки осуществлялись с помощью атомно-силового микроскопа НАНОТОП 203. В качестве измерительных микрозондов использовались электрохимическим способом лабораторно изготовленные «Г» -образные зонды из вольфрама. Система детектирования перемещений (осцилляций) консоли зонда реализована на базе оптоволоконного интерферометра.

Исследования проводились в динамическом режиме, когда осциллирующий зонд приближался к поверхности образца. Измеряемой величиной является амплитуда колебаний острия зонда в зависимости от положения образца Z_{poz} по отношению к закреплённому концу консоли зонда, к которому прикладываются колебательные усилия, генерируемые пьезокерамическим биморфом (рис. 1).

По мере сближения поверхностей в системе зонд-образец происходит уменьшение амплитуды колебаний свободного конца консоли. На начальном участке сближения амплитуда уменьшается за счет действия поверхностных сил, а далее, за счет упругого взаимодействия острия с образцом. Именно на последнем участке взаимодействия функция амплитуда-расстояние несет информацию об упругих свойствах поверхности образца.

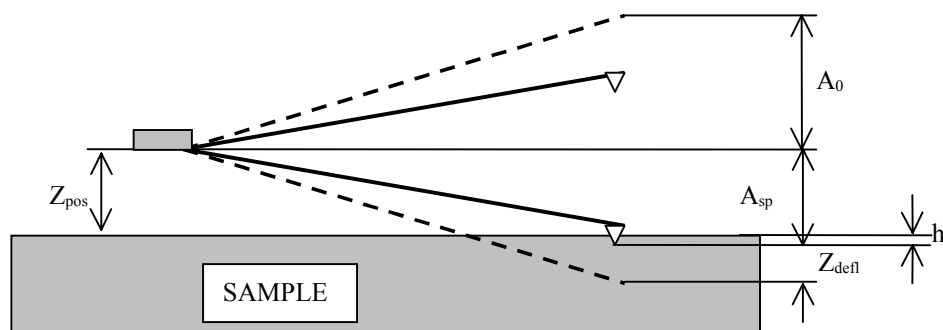


Рис. 1. Геометрическая схема измерений.

В качестве образцов, использовались обработанные высоконапорной водной струёй пластины из полиметилметакрилата, марки СЭ (прозрачное ГОСТ 9784-75) Микрогеометрические параметры обработанных поверхностей приведены в табл. 1. Цель исследований – отработка методики оценки физических и механических свойств обработанных поверхностей на наноуровне.

Таблица 1.

Микрогеометрические параметры образцов

образец №	Ra (мкм)	Rm (мкм)	Sm (мкм)	S (мкм)
7	26.227 07	143.90 49	540	85
8	20.784 98	112.07 85	251.80 56	98.8461 5
9	24.224 67	115.56 21	960	204.875

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

В наших исследованиях мы предполагали, что общая динамическая сила прикладываемая от консоли к острию зонда компенсируется упругим взаимодействием зонд-образец. Для корректного описания мы использовали систему отсчета расстояния, в которой начальное положение Z_{pos} равно амплитуде свободных колебаний консоли A_0 и уменьшается по направлению к образцу. В этой системе координат

$$A = h + Z_{pos} \quad \text{и} \quad (1)$$

$$A = A_0 - Z_{defl} . \quad (2)$$

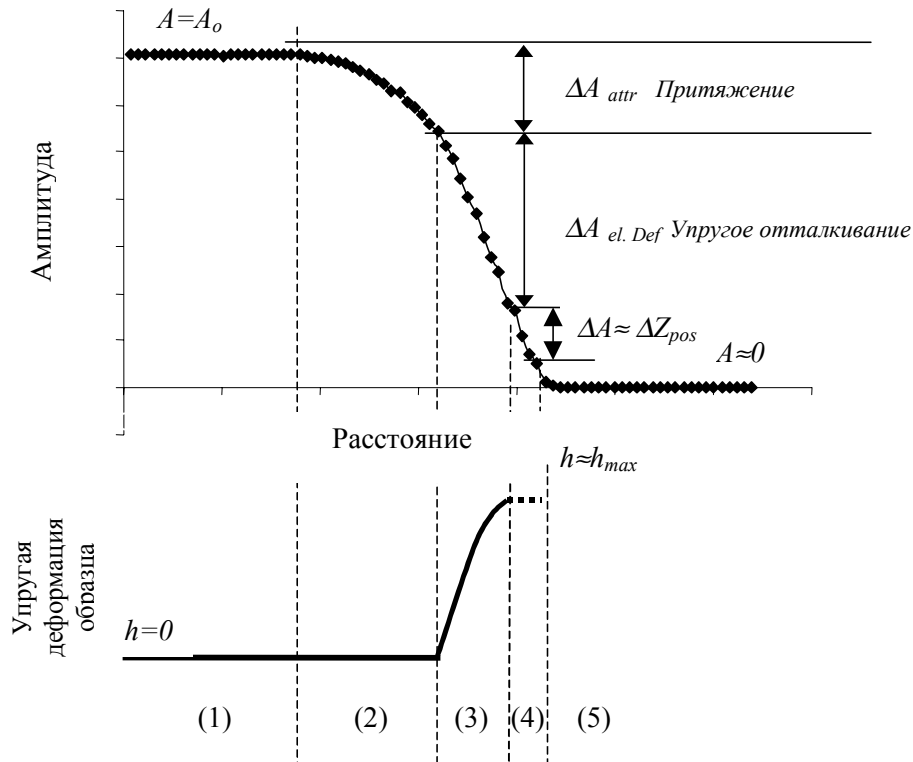


Рис.2. Общая схема уменьшения амплитуды колебаний зонда и деформирования образца при динамической силовой спектроскопии.

В состоянии квазистатического равновесия выполняется равенство

$$k_o Z_{defl} = P(h), \quad (3)$$

где $P(h)$ – функция нормально приложенной нагрузки, зависящей от глубины индентирования поверхности h . Геометрию контактной системы острие-образец будем моделировать схемой сфера-плоскость. Будем предполагать, что в данном случае справедлива теория Герца, из которой

$$P(h) = ER^{1/2} h^{3/2}, \quad (4)$$

где $E = \frac{4}{3} \left[\frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_t^2)}{E_t} \right]^{-1}$ – эффективный модуль упругости, E_t, ν_t и E_s, ν_s –

модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно для зонда и образца, R – радиус кривизны острия. Поскольку в рассматриваемом нами случае модуль упругости острия намного больше модуля исследуемого объекта, то можно считать, что эффективный модуль упругости характеризует только образец.

Из уравнений (1) и (2), глубину индентирования можно представить

$$h = A_o - Z_{pos} - Z_{defl}. \quad (5)$$

Для расчета реальной деформации следует скорректировать формулу (5) (рис.2)

$$h = (A_o - \Delta A_{attr}) - (Z_{pos} - \Delta Z_{attr}) - Z_{defl}. \quad (6)$$

Здесь ΔA_{attr} величина уменьшения амплитуды за счет сил притяжения, ΔZ_{pos} – положение зонда с которого начинается преобладающее влияние упругого деформирования образца. Тогда из теории Герца мы получим выражение для модуля эффективного упругости образца.

$$E = \frac{k_o}{\sqrt{R}} \frac{Z_{defl}}{[(A - \Delta A_{attr}) - (Z_{pos} - \Delta Z_{attr})]^{3/2}} \quad (7)$$

Таким образом, мы можем оценить модуль упругости образца исходя из данных динамической силовой спектроскопии, т.е. кривых амплитуда – расстояние.

Как видно из формулы (7) величинами, которые требуют калибровки является радиус закругления микрозонда и постоянная жесткости упругой консоли. Эта процедура является чрезвычайно тонкой и трудоемкой. В дальнейших рассуждениях мы использовали оценочные величины $R=200$ нм, $k_o=500$ Н/м. Важно также калибровать измеряемые величины перемещения зонда и амплитуды колебаний.

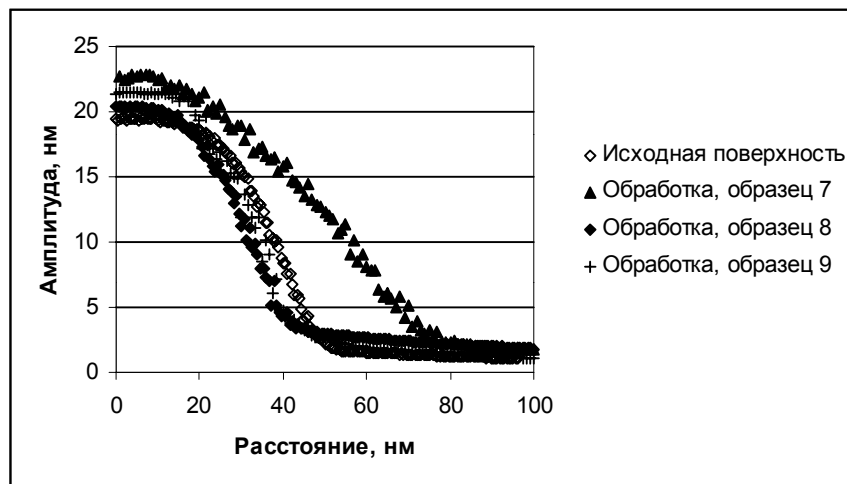


Рис. 3. Зависимости амплитуды колебаний зонда от положения зонда по отношению к образцу для исходной поверхности оргстекла и различных режимов WJ обработки.

ВЫВОДЫ

На рис. 3 приведены результаты динамического индентирования исходного образца поверхности оргстекла и трех типов Water Jet обработки. Видно различие в особенностях уменьшения исходной свободной амплитуды колебаний составляющей 19-23 нм в процессе сближения зонда с поверхностью образца для различных типов образцов. Характер изменения угла наклона кривых свидетельствует об увеличении модуля упругости («упрочнении» поверхностного слоя материала) для образцов 8 и 9 и об обратном эффекте уменьшения модуля упругости («разрыхлении» поверхностного слоя) для образца 7. Анализ данных динамической силовой спектроскопии для различных локальных точек образца 7 показывает, что разупрочнение (разрушение, разрыхление) поверхностного слоя материала происходит неравномерно. Так для точки 2 (рис. 4) разрушение происходило послойно. Верхний более тонкий слой является значительно более мягким. Тока перегиба для данного графика свидетельствует о переходе от слоя с меньшим модулем упругости к несколько более прочному подслою. Хотя и последний является мягче исходного образца. Размер площадки локализации измерений при этом не превышал нескольких десятков нанометров.

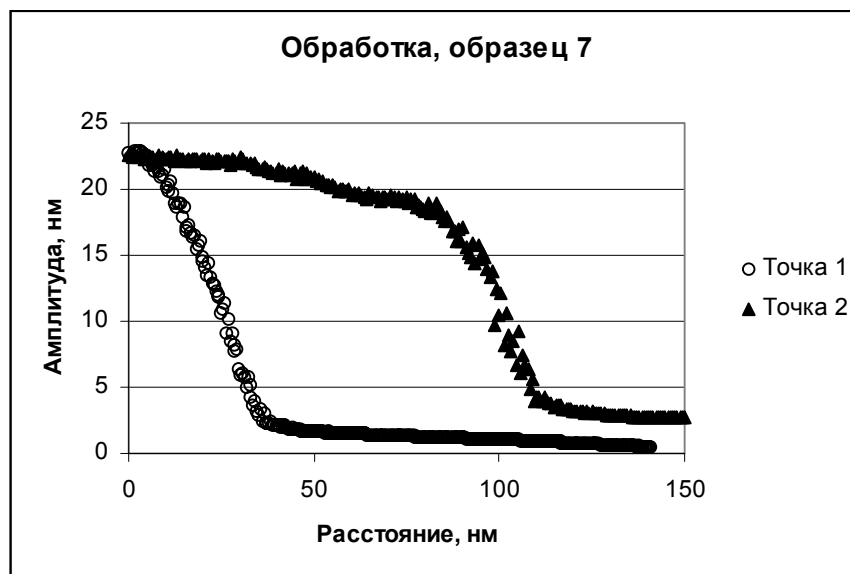


Рис. 4. Результаты динамической силовой спектроскопии для различных точек индентирования образца 7.

На следующем этапе исследований был проведен расчет эффективного модуля упругости по формуле (7).

Работа выполнена в рамках проекта № 268 программы INTAS “Wear of Fragile Coatings by High pressure Water Jet”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Louis H. Topics of Jetting Technology. New Application of Water Jet Technology. Ishinomaki, Japan, 1999
2. Louis H, Milchers W., Pude E.: Study on the Removal of Brittle Polymers with Pure Water Jets. Proceeding of the 15-th Intern. Conf. On Jetting Technology. Poenneby, 2000
3. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. —Мн.: Навука і тэхніка, 1990. —272с.
4. S.A. Chizhik, N.B. Gaiduk, N.K. Myshkin Computer simulation of precision contact with account of microgeometrical and mechanical heterogeneity of surfaces/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1909–1915
5. Chizik S.A., Huang Z., Gorbunov V.V., Myshkin N.K., Tsukrok V.V. Micromechanical properties of elastic polymeric materials as probed by scanning force microscopy // Langmur, — 1998, vol. 14, №9, pp. 3012–3015
6. Свириденко А.И., Свекло И.Ф., Игнатовский М.И., Чижик С.А., Hartmut Louis Методические особенности исследования поверхностей, после воздействия высоконапорной водной струи // “Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства” 2-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. Материалы конференции: ТулГУ, Тула 2002, с. 290-293