

Определение модуля упругости и силы адгезии материалов методом атомно-силовой микроскопии с применением модифицированных зондов

Г.Б. Мельникова, А.А. Маханек, А.С. Петровская, Е.Э. Константинова, С.А. Чижик

*Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси», 220072, Минск, Беларусь
galachka@gmail.com*

В работе представлены результаты расчета модуля упругости полидиметилсилоксана и мембран тромбоцитов, рассчитанные по модели Джонсона-Кенделла-Робертса и Герца на основании данных, полученных методом атомно-силовой микроскопии в различных режимах индентирования.

Using atomic force microscopy with modified probes for determination modulus of elasticity and adhesion strength of the materials

G.B. Melnikova, A.A. Makhanek, A. S. Petrovskaya, E.E. Konstantinova, S.A. Chizhik

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, 220072, Minsk, Belarus

The results of calculation of elasticity modulus of polydimethylsiloxane and platelet membranes calculated by the Johnson-Kendell-Roberts and Hertz models are presented on the basis of data obtained by atomic force microscopy in various indentation regimes.

Цель – определить модуль упругости полидиметилсилоксана (ПДМС) и мембраны тромбоцитов в различных режимах статической силовой спектроскопии с использованием модифицированных зондов.

Материалы и методы. Тромбоциты фиксировали глутаровым альдегидом на пластинах слюды [1]. ПДМС получали методом полива раствора на стеклянную подложку. Время полимеризации 60 мин.

Процедуру статической силовой спектроскопии проводили на атомно-силовом микроскопе НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с применением коллоидных зондов CSG30_BIO жесткостью 0,6 Н/м, материал сферы SiO₂ диаметром 650 нм («TipsNano», Эстония) при различных временах индентирования от 12,59 до 128,4 с, и нагрузках кантилевера на поверхность образца – 40 и 60% от максимально допустимой. Модуль упругости рассчитывали по модели Герца [2] и Джонсона – Кенделла – Робертса (ДКР) [3]. Расчет всех параметров проводили по кривой отвода кантилевера от поверхности образца.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований получено, что с увеличением нагрузки кантилевера на поверхность ПДМС увеличивается максимальная глубина внедрения от 70 до 100 нм (определено по модели Герца). При расчете по модели ДКР эти величины составляют 170 и 220 нм соответственно. При расчете по модели ДКР увеличение значений глубины внедрения связано с выбором точек контакта, соответствующих этим моделям. С увеличением нагрузки кантилевера и изменением времени индентирования модуль упругости и сила адгезии не изменяется в пределах экспериментальной ошибки при уровне значимости $p = 0,05$. Значение модуля упругости, рассчитанные по модели ДКР, составляет $330,1 \pm 9,4$ КПа ($AV \pm SE$), по модели Герца – $801,1 \pm 12,7$ КПа, силы адгезии $10,2 \pm \pm 0,3$ нН.

Максимальная глубина внедрения кантилевера возрастает при увеличении нагрузки внедрения в поверхность мембраны тромбоцитов: от 12,7 до 16,0 нм. При различных временах задержки и нагрузке кантилевера на поверхность мембраны тромбоцитов модуль упругости и сила адгезии не изменяется в пределах экспериментальной ошибки при уровне значимости $p = 0,05$. При глубине внедрения 5 нм модуль упругости

составляет $29,64 \pm 3,87$ МПа, сила адгезии $6,6 \pm 1,8$ нН. Данные величины не зависят от применяемой модели расчета. Следует также отметить, что при анализе кривых индентирования, выборе точки контакта и расчете по модели ДКР достижение постоянных значений модуля упругости наблюдается при глубинах внедрения 0,5–5 нм.

Так как увеличение времени индентирования к изменению значений модуля упругости не приводит, можно сделать вывод об отсутствии проявления вязких свойств исследуемых образцов. Различие в экспериментальной ошибке значений модуля упругости и силы адгезии для ПДМС и мембраны тромбоцитов обусловлено структурными особенностями исследуемой поверхности образцов.

1. G.V. Melnikova et al, *Series on Biomechanics*, **4**, 29, 12 (2015).
2. С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер, *Теория упругости*, М. : Наука (1979).
3. K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts, *Proc. R. Soc. Lond.*, **324**. 301(1971).