

УДК 539.8; 53.08
PACS 07.79.-v

К вопросу определения точки контакта в силовых измерениях методами атомно-силовой микроскопии

И. А. Морозов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
ilya.morozov@gmail.com

Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) являются на сегодняшний день широко распространенным средством получения информации о трехмерной структуре, а также физико-механических свойствах поверхности. В задачах наноиндентации зонд АСМ подводится к образцу с некоторого расстояния, а затем взаимодействует с поверхностью. Точное определение точки контакта острия зонда с поверхностью в этих измерениях необходимо как для достоверного вычисления констант бесконтактных взаимодействий, так и для структурно-механических свойств материала. В экспериментах в воздушной среде контакту предшествует обусловленный силами притяжения быстрый скачок зонда к поверхности. Если жесткость балки зонда или образца не позволяют зонду деформировать поверхность, то за начало контакта обычно принимается завершение скачка зонда (минимум отклонения балки на участке сближения зонда с материалом). Если же поверхность достаточно мягкая, то контакт может наступить раньше завершения этапа быстрого сближения, т.е. острие начнет вдавливаться в поверхность до завершения скачка. В данной работе показано, что контакт острия с деформируемой поверхностью полимера наступает еще до завершения скачка острия к поверхности. За начало контакта зонда с материалом целесообразно принимать точку, соответствующую максимуму изменения изгиба балки. Значительная скорость сближения острия с поверхностью под действием сил притяжения приводит к потере экспериментальных данных на участке кривой, в окрестности перехода от бесконтактного к контактному взаимодействию. В целом, недостаточная частота регистрации данных, а также высокая скорость сближения могут являться причинами пропуска значимых точек силовой кривой, т.е. приводить к ошибкам в определении начала контакта, причем как с мягкой, так и жесткой поверхностями.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия; индентация; контакт

Поступила в редакцию 03.07.2024; после рецензии 26.08.2024; принята к опубликованию 29.08.2024

On determining the contact point in force measurements by atomic force microscopy methods

I. A. Morozov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia
ilya.morozov@gmail.com

Atomic force microscopy (AFM) is a widely used technique for obtaining information about the three-dimensional structure and physical and mechanical properties of surfaces. In nanoindentation methods, an AFM probe is brought to the sample from a distance and then interacts with the surface. Accurate determination of the point of contact of the probe tip with the surface in these measurements is necessary for reliable calculation of both the non-contact interaction constants and the structural and mechanical properties of the material. The tip-surface contact is preceded by a rapid jump of the probe to the surface due to attractive forces in experiments conducted in ambient conditions. If the stiffness of the probe beam or the sample does not allow the probe to deform the surface, then the end of the probe jump (minimum deflection of the beam as the probe approaches the material) is usually taken as the start of the contact. If the surface is soft enough, contact may occur earlier than the end of the rapid jump, i.e., the tip will begin to penetrate into the surface before the jump is complete. In this work it is shown that the contact of the tip with a deformable polymer surface occurs before the completion of the jump of the tip to the surface. It is reasonable to take the point corresponding to the maximum change in the beam deflection as the beginning of the contact between the probe and the material. The significant speed of the approach of the tip to the surface under the action of attractive forces leads to a loss of experimental data in the section of the curve near the transition from non-contact to contact interaction. Insufficient rate of data capture and high approach velocity can cause significant points of the force curve to be missed, i.e., lead to errors in determining the beginning of the contact both for soft and hard surfaces.

Keywords: atomic force microscopy; indentation; contact

Received 03 July 2024; revised 26 August 2024; accepted 29 August 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-67-74

1. Введение

На этапе сближения зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) с поверхностью между острием зонда и поверхностью материала начинают действовать силы притяжения. В результате, при исследовании в воздушной среде острие совершает резкий скачок к поверхности. Данный эффект особенно проявляется при исследовании в среде с малой вязкостью (например, воздух) и небольшой изгибной жесткостью кантилевера. В этом случае изменение отклонения балки от точки равновесия до завершения прыжка под действием сил Ван-дер-Ваальса может достигать нескольких нанометров, электромагнитных – десятки нанометров. Расшифровка этого начального участка взаимодействия зонда АСМ с поверхностью материала важна при определении константы Гамакера [1–3], электростатических [4–7], магнитных свойств материала [8], калибровки геометрии зонда [9, 10], а также для корректной оценки начала контактного взаимодействия [11, 12]. Достоверное определение контакта необходимо для вычисления глубины индентации и, соответственно, механических свойств материала либо оценки толщины мягких пленок. Точка контакта важна и для вычисления расстояния зонд-образец в исследовании бесконтактных взаимодействий (например, при расчете константы Гамакера).

При проведении экспериментов в жидкости скачок острия к поверхности отсутствует. В этом

случае точка контакта может быть определена из анализа изменения отклонения или модуля упругости, вычисляемого с использованием модели упругого контактного взаимодействия [11, 13]. Далее речь пойдет только об экспериментах в воздушной среде.

В случае поверхностей, недеформируемых зондом данной жесткости, за начало контакта принимают завершение прыжка острия к поверхности (максимальный по модулю изгиб кантилевера), однако, как будет показано в данной работе, даже в этом случае возможны нюансы. Более сложная ситуация возникает тогда, когда материал целиком, либо его верхний слой, достаточно мягкие и продавливаются данным зондом. В этом случае точка контакта является неопределенной величиной. Ряд авторов предлагают анализировать жесткость, т.е. производную от силовой кривой [14]; такой подход позволяет вычислять модуль упругости без определения точки контакта. Другие предлагают использовать в качестве контакта окрестность начала отклонения зонда к материалу [12]. Точка контакта может быть определена моделированием движения острия к поверхности [15], однако в этом случае возникает проблема выбора физических и механических констант. В целом же, к настоящему времени, вопрос определения точки контакта зонда с мягким материалом является нерешенным в силу влияния многих факторов (параметры зонда, материала, среды и эксперимента).

Одним из факторов, влияющих на измерение, в особенности если речь идет о мягких (поли-

мерных или биологических) материалах, является скорость взаимодействия острия зонда с поверхностью. В экспериментах исследователь задает скорость сближения основания зонда и образца, при этом скорость взаимодействия (изгиба свободного конца балки) – величина непостоянная; она изменяется в зависимости от этапа нагружения, достигая максимальных по абсолютной величине значений на участке скачка острия к поверхности. Другим важнейшим фактором, влияющим на точность измерений начального скачка острия к материалу, является частота регистрации сигнала отклонения кантилевера. К настоящему моменту влияние данного параметра на достоверность получаемых данных, взаимосвязь с другими параметрами эксперимента практически не исследована.

Изучение неоднородных материалов, сбор больших объемов данных для статистического анализа требуют проведения экспериментов с относительно высокими скоростями подвода-отвода зонда (больше 1 мкм / с). В настоящей работе исследовали особенности определения точки контакта зонда с мягким полимерным материалом, а также с жесткой подложкой в зависимости от частоты получения данных и различных скоростей сближения. Показано, что недостаточная частота снятия данных в совокупности с высокой скоростью сближения приводит к существенным ошибкам определения начала контакта в случае полимера. Динамические свойства системы также влияют и на определение начала контакта с жесткой поверхностью, однако в значительно меньшей степени.

2. Материалы и методы

В работе исследовали особенности определения точки контакта зонда с полиэтиленом (ПЭ) низкого давления (начальный модуль упругости ~100 МПа), а также с жесткой подложкой SiO₂ в зависимости от частоты получения данных и различных скоростей сближения.

Эксперименты проводили на АСМ *Ntegra Prima* в режиме быстрой индентации в воздушной среде в закрытом боксе. Использовали кремниевые зонды с прямоугольной балкой, калиброванной жесткости и формой острия (жесткость – 0.8 нН / нм, резонансная частота – 55 кГц, радиус скругления острия – 30 нм). Силовые кривые получали по области 2×2 мкм на равномерной сетке 50×50 точек; результаты осредняли. Максимальное усилие нажатия – 0.5 нН. Сканирование образцом – к неподвижно закрепленному зонду подводится образец с постоянной скоростью V_z (варьировали от 1 мкм / с до 30 мкм / с). Обычно, частота f регистрации данных в экспериментах по наноиндентации по умолчанию не превышает 10 кГц; в настоящей работе использовали $f \approx 32$ кГц.

Типичная кривая взаимодействия зонда с полимерным материалом при проведении экспериментов в воздушной среде представлена на рис. 1: образец подводится к неподвижному зонду, на некотором расстоянии от поверхности острие начинает (точка А на рис. 1) резко отклоняться по направлению к образцу. Скачок острия зонда к поверхности завершается в точке В. Дальнейшие этапы индентации не рассматриваем.

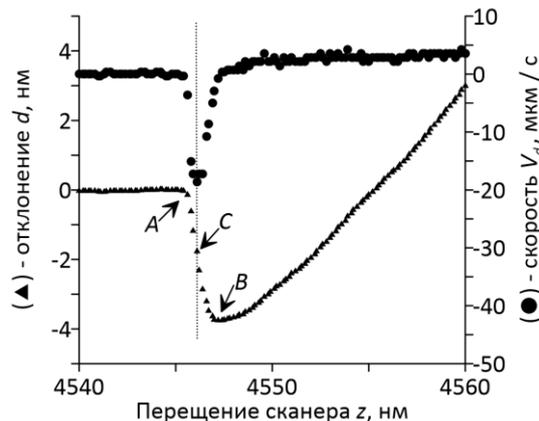


Рис. 1. Изгиб и скорость изгиба балки при взаимодействии острия зонда с поверхностью ПЭ. Скорость сближения $V_z = 5$ мкм / с. Показаны данные, снятые с частотой 32 кГц и с увеличенным в 4 раза шагом записи, т.е. с частотой 8 кГц. Пояснения в тексте

В случае деформируемых материалов (полимеры, биологические объекты) острие может касаться поверхности на участке быстрого сближения АВ, т.е. еще до завершения прыжка, после чего происходит вдавливание зонда в материал под действием сил инерции и адгезии. Высокая частота записи данных позволяет детально проанализировать участок быстрого сближения АВ. Исследуем скорость V_d изгиба балки, которую вычисляем приближенно: $V_{di} \approx (d_i - d_{i-1}) / \Delta t$, где Δt – шаг по времени. V_d достигает экстремума (точка С на рис. 1) в первой половине скачка зонда к поверхности. Дальнейшее падение скорости вызвано близостью поверхности, т.е. контакт зонда с поверхностью должен происходить в окрестности точки С. Далее проверим эту гипотезу.

В общем случае, наблюдаемый в экспериментах по быстрой индентации, рельеф поверхности зависит от усилия нажатия зонда на поверхность. Для детального исследования структурных изменений были проведены эксперименты по индентации с разрешением в плоскости xy 400×400 точек; $V_z = 5$ мкм / с. Алгоритм извлечения рельефа из силовых кривых при заданной нагрузке детально описан в работе [16]: разобьем кривые нагрузки $d(z)$ с постоянным шагом $\Delta d = 0.1$ нм и перейдем к координатам $z_i(d_i)$, где $d_i = d_{i-1} + \Delta d$; неизвестные z_i

получаем линейной интерполяцией между соседними узлами z . Высота рельефа h в любой момент взаимодействия зонда с поверхностью, т.е. при изгибе d_i балки, выражается: $h(x,y,d_i) = -(z(x,y,d_i) - \min(h(d_i)))$. Среднее изменение рельефа: $\langle \Delta Z \rangle = \langle Z_i - Z_0 \rangle$, где Z_0 – поверхность в начальный момент взаимодействия (точка А на рис. 1), Z_i – рельеф поверхности при отклонении d_i .

3. Обсуждение результатов

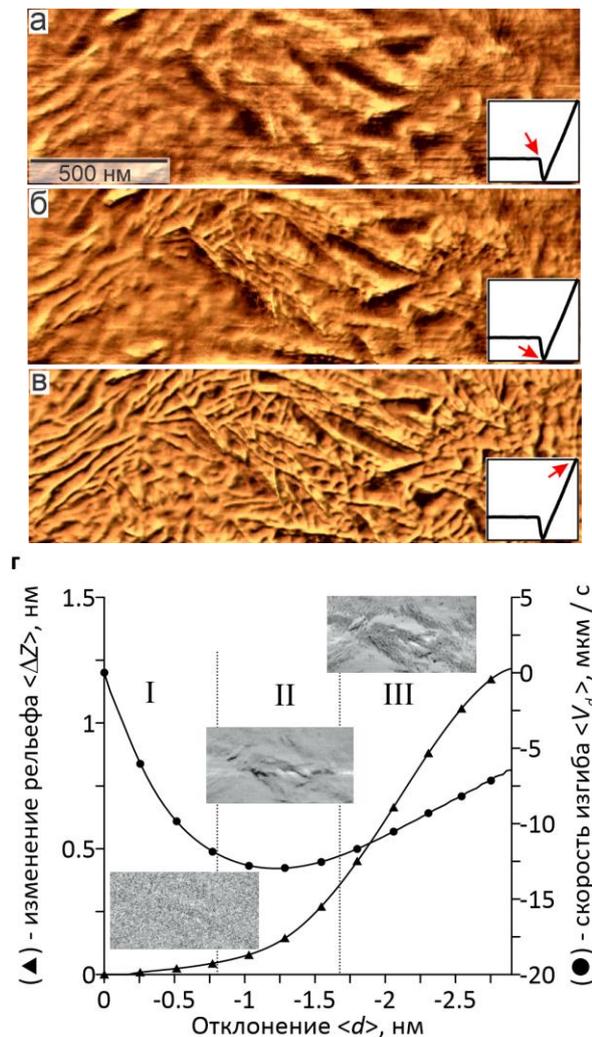


Рис. 2. Наблюдаемый рельеф поверхности ПЭ: а – в начале скачка зонда к поверхности; б – в завершении скачка; в – при максимальной нагрузке; г – средние изменения рельефа и скорости отклонения от начала взаимодействия до завершения прыжка зонда к поверхности; показаны карты ΔZ на начальном этапе сближения (I), в окрестности максимума скорости изменения изгиба (II) и в окрестности завершения прыжка (III)

Поверхность полимеров зачастую покрыта низкомолекулярным нанослоем, скрывающем внутреннюю неоднородную структуру материала [17].

Это справедливо и для сегментированной структуры ПЭ [18]: его внутренняя структура, полученная при нагрузке ~ 2 нН (рис. 2, в), отличается от рельефа в начале скачка зонда к материалу (рис. 2, а). Рельеф, соответствующий завершению скачка (рис. 2, б), уже частично отражает внутреннюю структуру полимера. То есть, контакт зонда с поверхностью должен происходить где-то на участке сближения.

В начале притяжения зонда к поверхности $\langle \Delta Z \rangle$ представляют собой однородный шум (область I на рис. 2, г). Картина меняется в окрестности экстремума скорости изгиба: изменения рельефа нарастают, частично отражая внутреннюю структуру материала (область II на рис. 2, г). По мере приближения к завершению прыжка изменения структуры становятся всё более выраженными (область III на рис. 2, г): зонд начинает деформировать верхний низкомолекулярный однородный слой, взаимодействуя через него с внутренней структурой ПЭ.

То есть острие начинает индентировать полимер еще на этапе быстрого приближения в результате действия сил притяжения (Ван-дер-Ваальсовы, капиллярные взаимодействия). К моменту завершения скачка глубина индентации составляет 2...5 нм (в зависимости от материала, зонда и условий эксперимента). Таким образом, при обработке экспериментальных данных за начало контакта острия с поверхностью мягкого материала целесообразно принять отклонение, в котором скорость изгиба достигает максимального по абсолютной величине значения.

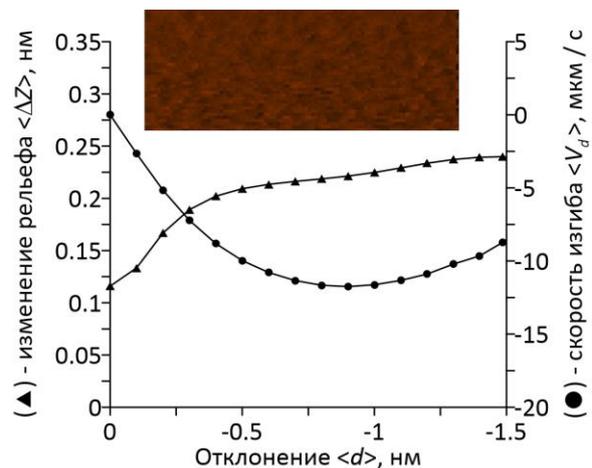


Рис. 3. Средние изменения рельефа и скорости отклонения от начала взаимодействия до завершения прыжка зонда к жесткой поверхности SiO_2 . На вставке показана гладкая неизменная топология данного рельефа

В случае взаимодействия зонда с жесткой поверхностью оксида кремния рельеф поверхности не изменяется – средние изменения рельефа

(рис. 3) < 0.1 нм, что можно соотнести с шумами измерений. Экстремум скорости изгиба смещен в сторону минимума отклонения, но не совпадает с ним. С одной стороны, это можно объяснить проскальзыванием зонда по жесткой гладкой поверхности, с другой стороны – недостаточно высокой частотой записи данных.

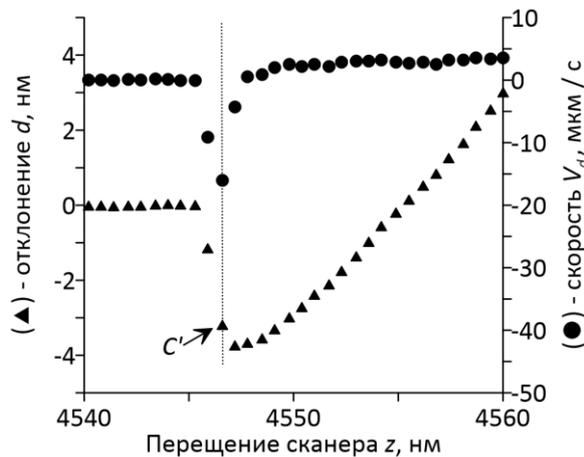


Рис. 4. Изгиб и скорость изгиба балки при взаимодействии острия зонда с поверхностью полимера при частоте снятия данных 8 кГц

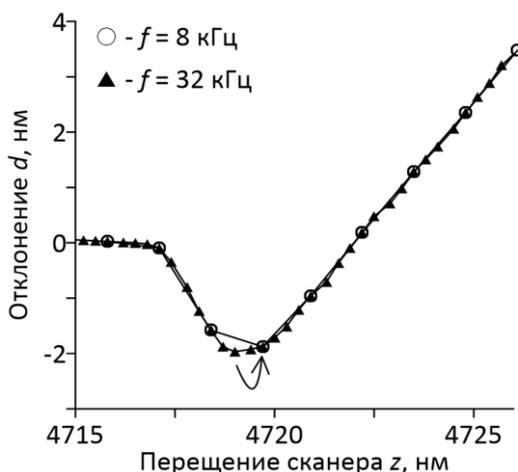


Рис. 5. Изгиб балки при взаимодействии острия зонда с жесткой поверхностью SiO_2 при частоте снятия данных 8 кГц и 32 кГц

Прыжок зонда к материалу – быстрый процесс. Точность измерений на этом участке существенно зависит от частоты f снятия данных (пропускной способности контроллера АСМ). На рис. 4 представлена исходная силовая кривая (см. рис. 1) индентации полимера, но построенная с шагом по времени в 4 раза большим, т.е. с частотой 8 кГц. Снижение f привело к потерям точек на участке прыжка, смещению измеряемого экстремума скорости, и, соответственно, смещению точки пред-

полагаемого контакта (С на рис. 1 перешла в С' на рис. 4) на ~ 1.8 нм в сторону минимума изгиба.

Частота записи данных оказывает влияние и на силовую кривую взаимодействия с жесткой поверхностью (рис. 5): минимум отклонения, принимаемый за начало контакта острия с жестким материалом, может смещаться как по координате z , так и по d . То есть, строго говоря, наблюдаемая точка контакта острия с жестким материалом также зависит от параметров эксперимента.

Высокие скорости сближения ($V_z > 1$ мкм / с), необходимые в задачах быстрой индентации и/или при исследовании неоднородных материалов, усугубляют влияние недостаточности частоты снятия данных. Измеряемое отклонение d_c в точке контакта в зависимости от f и V_z показано на рис. 6.

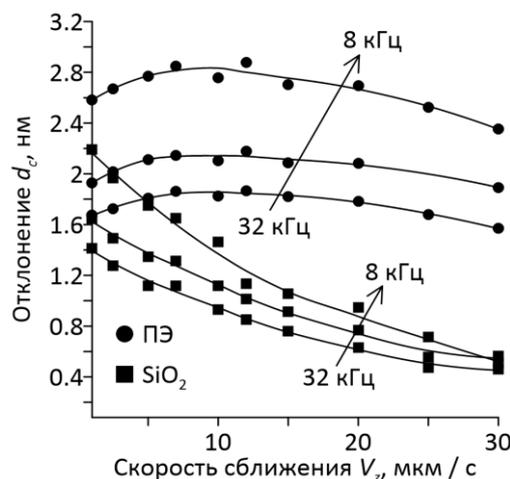


Рис. 6. Измеряемое отклонение в момент контакта острия с поверхностями ПЭ и SiO_2 в зависимости от частоты снятия данных (8, 16, 32 кГц) и скорости сближения основания зонда с образцом

Точность измерения контакта зонда с деформируемой поверхностью ПЭ существенно зависит от частоты снятия данных (рис. 6), скорость сближения при этом влияет незначительно (связано с особенностями индентации вязкоупругого полимера). Точка контакта с жесткой поверхностью также зависит от условий эксперимента: с увеличением шага по времени, измеряемый минимум $d(z)$ смещается относительно реального вправо (см. рис. 5). В этом случае существенное влияние на ошибку измерений оказывает V_z .

4. Заключение

В работе исследовали переходный участок от бесконтактного к контактному взаимодействию: ускоренное приближение острия зонда под действием сил Ван-дер-Ваальса к мягкому полимерному материалу, а также к жесткой подложке. Показано, что за начало контакта зонда с материалом

целесообразно принимать точку, соответствующую максимуму скорости изгиба балки зонда. Недостаточная частота регистрации данных, а также высокая скорость сближения могут являться причинами ошибок в определении точки контакта.

Показано существенное влияние частоты снятия данных на точность определения начала контакта острия с поверхностью. При приближении к поверхности кантилевер развивает высокую скорость изгиба, которая, складывается со скоростью сближения и еще более усугубляет потерю значимых точек на участке быстрого сближения. Неоднозначность определения контакта обусловлена внедрением острия в мягкий материал за счет сил инерции и адгезии. В случае жесткого материала динамические свойства системы влияют на наблюдаемую в эксперименте точку контакта в значительно меньшей степени.

В экспериментах, где требуется точное определение начала контакта (вычисление констант бесконтактных взаимодействий, определение свойств тонких пленок), рекомендуется использовать максимально высокую частоту записи данных (не менее 30 кГц) и скорости подвода не более 5...10 мкм/с.

Дальнейшие исследования предусматривают изучения влияния свойств зонда, материала и среды взаимодействия на точность определения начала контакта, а также оценку необходимой и достаточной частоты снятия данных.

Работа выполнена в рамках госбюджетной программы АААА-А20-120022590044-7.

Список литературы

1. *Argento C., French R.H.* Parametric tip model and force–distance relation for Hamaker constant determination from atomic force microscopy // *Journal of Applied Physics*. 1996. Vol. 80. P. 6081–6090. DOI: 10.1063/1.363680
2. *Liu Y., Song C., Lv G., Chen N., Zhou H., Jing X.* Determination of the attractive force, adhesive force, adhesion energy and Hamaker constant of soot particles generated from a premixed methane/oxygen flame by AFM // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 433. P. 450–457. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.10.030
3. *Stevenson M. C., Beaudoin S. P., Corti D. S.* Toward an improved method for determining the Hamaker constant of solid materials using atomic force microscopy. III: Experimental validation of a new approach-to-contact method // *J. Phys. Chem. C*. 2023. Vol. 127. P. 9371–9379. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c01623
4. *Butt H.-J.* Electrostatic interaction in atomic force microscopy // *Biophysical Journal*. 1991. Vol. 60. P. 777–785. DOI: 10.1016%2FS0006-3495(91)82112-9
5. *Matsuyama T., Ohtsuka M., Yamamoto H.* Measurement of force curve due to electrostatic charge on a single particle using atomic force microscope // *J. Soc. Powder Technology, Japan*. 2006. Vol. 43. P. 174–180. DOI: 10.14356/kona.2008021
6. *Falter J., Langewisch G., Hölscher H., Fuchs H., Schirmeisen A.* Field ion microscopy characterized tips in noncontact atomic force microscopy: Quantification of long-range force interactions // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 87, 115412. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115412
7. *Revilla R. I.* The jump-into-contact effect in biased AFM probes on dielectric films and its application to quantify the dielectric permittivity of thin layers // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27, 265705. DOI: 10.1088/0957-4484/27/26/265705
8. *Passeri D., Dong C., Reggente M., Angeloni L., Barteri M., Scaramuzza F.A., Angelis F. D., Marinelli F., Antonelli F., Rinaldi F., Marianecchi C., Carafa M., Sorbo A., Sordi D., Arends I. W., Rossi M.* Magnetic force microscopy // *Biomatter*. 2014. Vol. 4, e29507. DOI: 10.4161/biom.29507
9. *Fronczak S. G., Browne C. A., Krenek E. C., Beaudoin S. P., Corti D. S.* Non-contact AFM measurement of the Hamaker constants of solids: Calibrating cantilever geometries // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 517. P. 213–220. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.01.108
10. *Ku B., Van De Wetering F., Bolten J., Stel B., Van De Kerkhof M. A., Lemme M. C.* AFM-based Hamaker constant determination with blind tip reconstruction // *Adv. Mater. Technol.* 2023. Vol. 8, 2200411. DOI: 10.1002/admt.202200411
11. *Melzak K. A., Moreno-Flores S., Yu K., Kizhakkedathu J., Toca-Herrera J. L.* Rationalized approach to the determination of contact point in force–distance curves: Application to polymer brushes in salt solutions and in water // *Microscopy Research & Technique*. 2010. Vol. 73. P. 959–964. DOI: 10.1002/jemt.20851
12. *Yang C.-W., Chen C.-H., Ding R.-F., Liao H.-S., Hwang I.-S.* Multiparametric characterization of heterogeneous soft materials using contact point detection-based atomic force microscopy // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 522, 146423. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146423
13. *Gavara N.* Combined strategies for optimal detection of the contact point in AFM force-indentation curves obtained on thin samples and adherent cells // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. N. 1, 21267. DOI: 10.1038/srep21267
14. *Garcia M., Schulze K.D., O'Bryan C.S., Bhattacharjee T., Sawyer W.G., Angelini T.E.*

Eliminating the surface location from soft matter contact mechanics measurements // *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*. 2017. Vol. 11, № 4. P. 187–192.

DOI: 10.1080/17515831.2017.1397908

15. Bowen J., Cheneler D. A Dynamic model of the jump-to phenomenon during AFM analysis // *Langmuir*. 2012. Vol. 28. P. 17273–17286. DOI: 10.1021/la304009c
16. Morozov I. A. Nanoindentation of polyurethane with phase-separated fibrillar structure // *Polymer Testing*. 2021. Vol. 94. Article 107038. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.107038
17. Spitzner E.-C., Riesch C., Magerle R. Subsurface imaging of soft polymeric materials with nanoscale resolution // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5. P. 315–320. DOI: 10.1021/nn1027278
18. Ivanov D. A., Magonov S. N. Atomic force microscopy studies of semicrystalline polymers at variable temperature // *Polymer Crystallization* / ed. Reiter G., Sommer J.-U. Berlin: Springer, 2003. Vol. 606. P. 98–130.

References

1. Argento C., French R.H. Parametric tip model and force–distance relation for Hamaker constant determination from atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 1996, vol. 80, pp. 6081–6090. DOI: 10.1063/1.363680
2. Liu Y., Song C., Lv G., Chen N., Zhou H., Jing X. Determination of the attractive force, adhesive force, adhesion energy and Hamaker constant of soot particles generated from a premixed methane/oxygen flame by AFM. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 433, pp. 450–457. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.10.030
3. Stevenson M. C., Beaudoin S. P., Corti D. S. Toward an improved method for determining the Hamaker constant of solid materials using atomic force microscopy. III: Experimental validation of a new approach-to-contact method. *J. Phys. Chem. C*, 2023, vol. 127, pp. 9371–9379. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c01623
4. Butt H.-J. Electrostatic interaction in atomic force microscopy. *Biophysical Journal*, 1991, vol. 60, pp. 777–785. DOI: 10.1016%2FS0006-3495(91)82112-9
5. Matsuyama T., Ohtsuka M., Yamamoto H. Measurement of force curve due to electrostatic charge on a single particle using atomic force microscope. *J. Soc. Powder Technology*, 2006, vol. 43, pp. 174–180. DOI: 10.14356/kona.2008021
6. Falter J., Langewisch G., Hölscher H., Fuchs H., Schirmeisen A. Field ion microscopy characterized tips in noncontact atomic force microscopy: Quantification of long-range force interactions. *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 87, 115412. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115412
7. Revilla R. I. The jump-into-contact effect in biased AFM probes on dielectric films and its application to quantify the dielectric permittivity of thin layers. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, 265705. DOI: 10.1088/0957-4484/27/26/265705
8. Passeri D., Dong C., Reggente M., Angeloni L., Barteri M., Scaramuzza F.A., Angelis F. D., Marinelli F., Antonelli F., Rinaldi F., Marianecchi C., Carafa M., Sorbo A., Sordi D., Arends I. W., Rossi M. Magnetic force microscopy. *Biomatter*, 2014, vol. 4, e29507. DOI: 10.4161/biom.29507
9. Fronczak S. G., Browne C. A., Krenek E. C., Beaudoin S. P., Corti D. S. Non-contact AFM measurement of the Hamaker constants of solids: Calibrating cantilever geometries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 517, pp. 213–220. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.01.108
10. Ku B., Van De Wetering F., Bolten J., Stel B., Van De Kerkhof M. A., Lemme M. C. AFM-based Hamaker constant determination with blind tip reconstruction. *Adv Mater. Technol.*, 2023, vol. 8, 2200411. DOI: 10.1002/admt.202200411
11. Melzak K. A., Moreno-Flores S., Yu K., Kizhakkedathu J., Toca-Herrera J. L. Rationalized approach to the determination of contact point in force–distance curves: Application to polymer brushes in salt solutions and in water. *Microscopy Research and Technique*, 2010, vol. 73, pp. 959–964. DOI: 10.1002/jemt.20851
12. Yang C.-W., Chen C.-H., Ding R.-F., Liao H.-S., Hwang I.-S. Multiparametric characterization of heterogeneous soft materials using contact point detection-based atomic force microscopy. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 522, 146423. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146423
13. Gavara N. Combined strategies for optimal detection of the contact point in AFM force-indentation curves obtained on thin samples and adherent cells. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, no. 1, 21267. DOI: 10.1038/srep21267
14. Garcia M., Schulze K.D., O'Bryan C.S., Bhattacharjee T., Sawyer W.G., Angelini T.E. Eliminating the surface location from soft matter contact mechanics measurements. *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 187–192. DOI: 10.1080/17515831.2017.1397908
15. Bowen J., Cheneler D. A dynamic model of the jump-to phenomenon during AFM analysis. *Langmuir*, 2012, vol. 28, pp. 17273–17286. DOI: 10.1021/la304009c

16. Morozov I. A. Nanoindentation of polyurethane with phase-separated fibrillar structure. *Polymer Testing*, 2021, vol. 94, 107038. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2020.107038
17. Spitzner E.-C., Riesch C., Magerle R. Subsurface imaging of soft polymeric materials with nanoscale resolution. *ACS Nano*, 2011, vol. 5, pp. 315–320. DOI: 10.1021/nn1027278
18. Ivanov D. A., Magonov S. N. Atomic force microscopy studies of semicrystalline polymers at variable temperature. In: Reiter G., Sommer J.-U. (Eds.) *Polymer Crystallization*. Berlin: Springer, 2003. Vol. 606. P. 98–130.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Морозов И. А. К вопросу определения точки контакта в силовых измерениях методами атомно-силовой микроскопии // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 3. С. 67–74. doi: 10.17072/1994-3598--2024-3-67-74

Please cite this article in English as:

Morozov I. A. On determining the contact point in force measurements by atomic force microscopy methods. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 3, pp. 67–74. doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-67-74

Сведения об авторах

Морозов Илья Александрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. ак. Королёва, 1, Пермь, 614013

Author information

Ilya A. Morozov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia