

10;15

Акустическая эмиссия и шероховатость поверхности хрупких материалов

© Ю.А. Фадин, О.Ф. Киреенко, С.В. Сычев, А.Д. Бреки

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

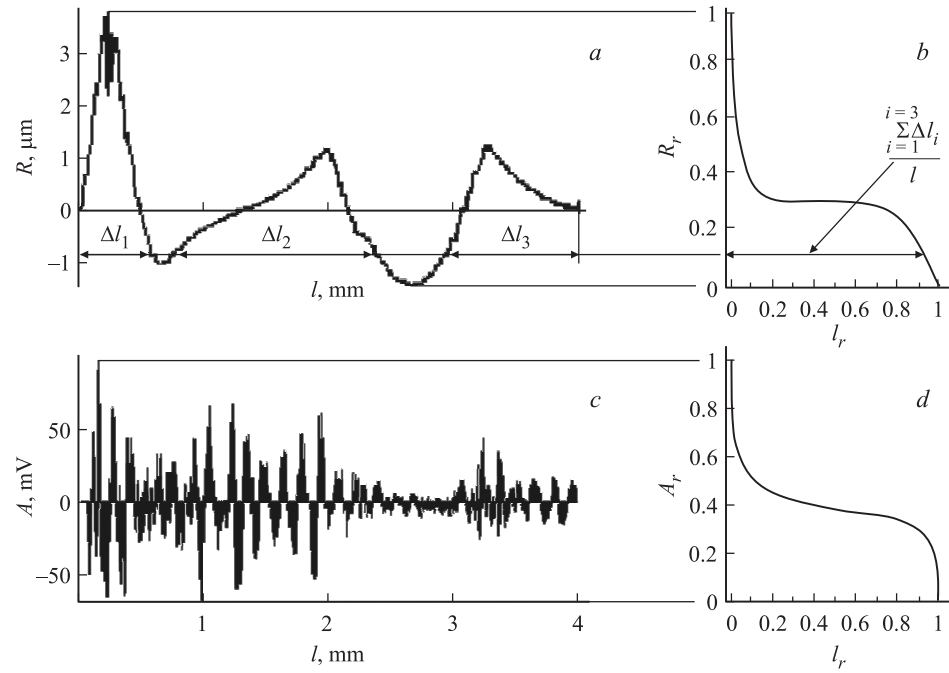
E-mail: fadinspb@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 июля 2014 г.

Разработан подход для оценки шероховатости поверхности хрупких материалов непосредственно в процессе трения (без его остановки), основанный на регистрации сигналов акустической эмиссии.

Шероховатость поверхности играет огромную роль в технике. Если поверхности находятся в контакте, как это имеет место при трении, то шероховатость поверхностей все время изменяется. Взаимодействие шероховатых поверхностей лежит в основе работы многих механизмов [1]. В настоящее время разработаны лабораторные методы изучения шероховатости [2–4] в статическом состоянии и технологические приемы получения заданной шероховатости. В то же время детальные механизмы изменения шероховатости, происходящие непосредственно во время трения, изучены плохо [5]. В значительной мере это обусловлено отсутствием возможностей для прямого доступа к трущимся поверхностям в контактном зазоре. Перспективными для исследования шероховатости представляются акустические методы. Цель настоящей работы состояла в разработке физического подхода для исследования шероховатости непосредственно во время трения.

В настоящее время в разных странах разработаны стандарты (которые очень похожи друг на друга), описывающие шероховатость



Рельеф поверхности и акустическая эмиссия во время трения: *a* — профилограмма дорожки трения на поверхности стекла; *b* — кривая Аббота для профилограммы дорожки трения на стекле; *c* — амплитуда акустической эмиссии, возникающей в стекле при перемещении индентора вдоль дорожки трения l ; *d* — график изменения относительных амплитуд акустической эмиссии, построенный аналогично кривой Аббота для профиля.

поверхности [6]. Они сводятся к тому, что вначале координаты рельефа поверхности определяются щуповым профилометром (см. рисунок, *a*), и в дальнейшем по определенным правилам вычисляются высотные и шаговые параметры профиля. Весьма наглядное значение имеет опорная кривая Аббота (см. рисунок, *b*), которая строится в относительных единицах и показывает распределение вещества в поверхностном слое [1]. Обычно координаты кривой по оси ординат R_r нормируются на максимальную высоту перепада профиля. По оси абсцисс l_r координаты представляют собой отношение сумм длин отрезков, возникающих при пересечении линий, расположенных на заданном уровне высоты относительно базовой линии, с профилем шероховатости к длине базовой линии l . Пример перестройки профилограммы в кривую Аббота для одного уровня высоты показан на рисунке, *a, b*. Особенно важное значение имеет область с малыми абсциссами, которая включает в себя самые выступающие шероховатости. Именно эти шероховатости являются наиболее нагруженными и в первую очередь участвуют в процессе износа. Интересно иметь оценку шага только этих больших шероховатостей, однако эта величина не входит в обычно используемые стандарты. В нашей работе этот шаг определялся по профилограмме с использованием начального участка (не более 10% общей длины) кривой Аббота. Частота взаимодействия больших шероховатостей одной поверхности с шероховатостями другой поверхности определяется их шагами на каждой поверхности и скоростью скольжения контртел. Оценки, полученные при обработке профилограмм, дают значение для частоты взаимодействия 2–10 kHz. Эта частота может быть определена экспериментально, например, акустическим методом.

Экспериментальная установка для изучения трения представляла собой микрометрический столик от прибора ПМТ-3, снабженный электроприводом, обеспечивающим перемещение с постоянной скоростью 35 mm/s. На столике в качестве подвижного образца размещалась пластина натриевого стекла. Неподвижный образец представлял собой трехгранную пирамиду из корунда с двухгранным углом при вершине в 90°, которая была нагружена силой в 60 N, что обеспечивало ширину дорожки трения до 100 μ m. Движение стеклянной пластины осуществлялось в направлении на грань пирамиды (тупой индентор). При движении контактных поверхностей возникала акустическая эмиссия, которая регистрировалась низкочастотным пьезоэлектрическим

1* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 24

датчиком GT 205 (предельная частота 35 kHz), прикрепленным к стеклянной пластине. Акустический сигнал регистрировался на цифровом осциллографе АКТАКОМ 3107 с частотой дискретизации 20 kHz. Шероховатость сформированной дорожки трения исследовалась на стандартном профилометре TR-200.

Полученные данные по низкочастотной акустической эмиссии обрабатывались таким же образом, как это принято при обработке профилограмм. На рисунке, *c* приведены данные по регистрации акустической эмиссии при движении индентора и на рисунке, *d* показана их обработка. По осям отложены относительные значения. Установлено, что в области до 0.1 по оси абсцисс корреляция между графиками рисунок, *b* и *d* составляет 0.99. Таким образом, оказывается, что существует фактически линейная зависимость между высотой наибольших шероховатостей и величиной наибольших амплитуд акустической эмиссии в низкочастотной области. Теперь можно перейти к оценке шероховатости поверхности по акустическим данным.

Известно, что параметр шероховатости R_z определяется как среднее арифметическое суммы абсолютных значений 5 наибольших выступов и 5 наибольших впадин в пределах базовой линии. Фактически рассматривается пять самых больших перепадов рельефа. Учитывая это замечание и установленную выше высокую степень линейной корреляции между значениями шероховатости и акустической эмиссии, считаем, что возможно проводить оценку значений R_z по пяти самым большим амплитудам акустической эмиссии по формуле

$$R_z = k_{er} \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (A_{\max})_i, \quad (1)$$

где k_{er} — коэффициент пропорциональности, определяемый на стеклянном эталоне, а амплитуда A_{\max} представляет собой размах амплитуды, как показано на рисунке, *d*, и измеряется в mV. Величина коэффициента k_{er} для описанных выше экспериментов на стекле (серия из 30 шт.) составляет $0.01 \pm 0.0005 \mu\text{m}/\text{mV}$ при выбранных условиях измерения.

Наибольший интерес представляет использование предлагаемого подхода для оценки шероховатости поверхности в процессе трения

Сравнение значений шероховатости R_z , полученных в прямых измерениях и с помощью оценок

Материал	Шероховатость R_z , μm , по данным профилометра TR-200	Шероховатость R_z , μm , по данным акустической эмиссии
Al_2O_3	8.52	7.03
Si_3N_4	2.319	1.968
ZrO_2	1.186	1.050
SiC	1.210	1.119

практически важных хрупких материалов. К таким материалам относятся керамики, керметы, монокристаллы и некоторые виды композитов. Эти материалы, как правило, обладают большей, чем стекло, твердостью, а шлифованные поверхности обладают и большей, чем у стекла, шероховатостью. При испытаниях с такими нагрузками, как описано выше, дорожка трения при обычных наблюдениях не видна, и стандартный прибор для определения шероховатости не применим, в то время как акустическая эмиссия фиксируется весьма уверенно. Поэтому коэффициент пропорциональности k_{er} для конкретных керамических пар в большинстве случаев невозможно определить. В связи с этим возникает вопрос, можно ли для оценки шероховатости этих материалов воспользоваться найденным выше коэффициентом пропорциональности для пары трения керамика-стекло?

Проверка проводилась на вышеописанной установке с использованием того же самого индентора на плоских керамических образцах Si_3N_4 , SiC , ZrO_2 , Al_2O_3 . Исходные поверхности керамик были отшлифованы. Уровни шероховатости R приведены в таблице. После прохода индентора шероховатость плоского образца, к которому был прикреплен датчик акустической эмиссии, рассчитывалась только по акустическим данным. Результаты расчетов приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что предложенный подход позволяет получать вполне приемлемые оценки шероховатости. Важным преимуществом этого подхода является то, что оценка шероховатости может быть получена в режиме *in situ*, без остановки трения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-08-00553) и программы ОЭММПУ под руководством чл.-корр. РАН Р.В. Гольдштейна.

Список литературы

- [1] Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М. : Физматлит, 2007. С. 19–29.
- [2] Al-Kindi G.A., Shirinzadeh B. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. V. 47. P. 697–708.
- [3] Veňo J., Maňková I., Vrabel M., Kottfer D. // Measurement. 2013. V. 46. P. 582–592.
- [4] Mathia T.G., Pawlus P., Wiczorowski M. // Wear. 2011. V. 271. P. 494–508.
- [5] Hermann T., Blanchet T.A., Panayotou N.F. // Wear. 2010. V. 268. P. 126–132.
- [6] Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 136 с.