

С. В. СЫЧЕВ, Ю. А. ФАДИН

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТРЕНИИ

В результате экспериментальных исследований начального этапа трения монокристаллов оксида алюминия установлено, что рельеф поверхности циклически изменяется, т.е. протекает амплитудно-модулированный процесс изменения шероховатости поверхностного слоя. Параметры процесса — несущая частота ω и частота модуляции Ω — могут быть получены из экспериментальных данных.

Ключевые слова: трение, износ, приработка, профиль поверхности, монокристалл сапфира, шероховатость.

Известно, что на начальной стадии трения происходят значительные изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев [1]. Этот процесс называется приработкой и имеет большое практическое значение [2, 3]. Анализ литературы показывает, что процесс приработки при сухом трении при использовании в узлах трения износостойких керамических и хрупких материалов практически не изучен [4, 5]. Этому можно найти несколько объяснений. Во-первых, процессы приработки неравновесные и быстропротекающие, во-вторых, доступ для непосредственных исследований в контактный зазор затруднен и, в-третьих, нет удобных инструментальных способов исследования.

Целью настоящей работы является детальное изучение эволюции шероховатости на начальном этапе сухого трения монокристаллов искусственного сапфира.

Материалы. В работе использовались монокристаллы сапфира, выращенные из расплава по способу Степанова с помощью формообразователей различных конфигураций [6]. Рабочие поверхности монокристаллов подготавливались так, чтобы кристаллографическая ориентация исследуемой поверхности совпадала с кристаллографическими плоскостями: $\{0001\}$ — базисной (B) и $\{01\bar{1}2\}$ — ромбоэдрической (R). Пары трения составлялись из монокристаллов с одинаковой ориентацией поверхностей трения, а именно: $B—B$ и $R—R$. Неподвижный образец представлял собой пластину монокристалла лейкосапфира (20×40 мм) с поверхностью соответствующей ориентации. Подвижный образец был выращен в виде монокристалльного стержня с внешним диаметром 6 мм. Торец стержня имел соответствующую ориентацию.

Экспериментальные исследования. Испытания на трение проводились по схеме торцового трения, непрерывно в течение 5, 10, 15, 20, 25 с, каждый раз на новых поверхностях выбранных трибопар. Начальные и конечные шероховатости измерялись на профилометре TR-200 фирмы Qualitest. После трения на поверхности неподвижного образца возникали кольцевые дорожки трения. Измерения профиля проводились в радиальном направлении.

Результаты. На рис. 1 представлены результаты измерения шероховатости неподвижной поверхности монокристалла в зависимости от времени t : a — пара трения $B—B$, b — $R—R$. Анализ данных рисунка показал, что на начальной стадии трения шероховатость поверхности циклически изменяется.

Для объяснения полученных на рис. 1 результатов была предложена модель изменения во времени шероховатости в виде амплитудно-модулированного процесса:

$$R_a(t) = R_a(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где R_a — средняя начальная шероховатость, $m = \frac{R_{a \max} - R_{a \min}}{R_{a \max} + R_{a \min}}$ — коэффициент модуляции,

Ω — частота модуляции, ω — несущая частота.

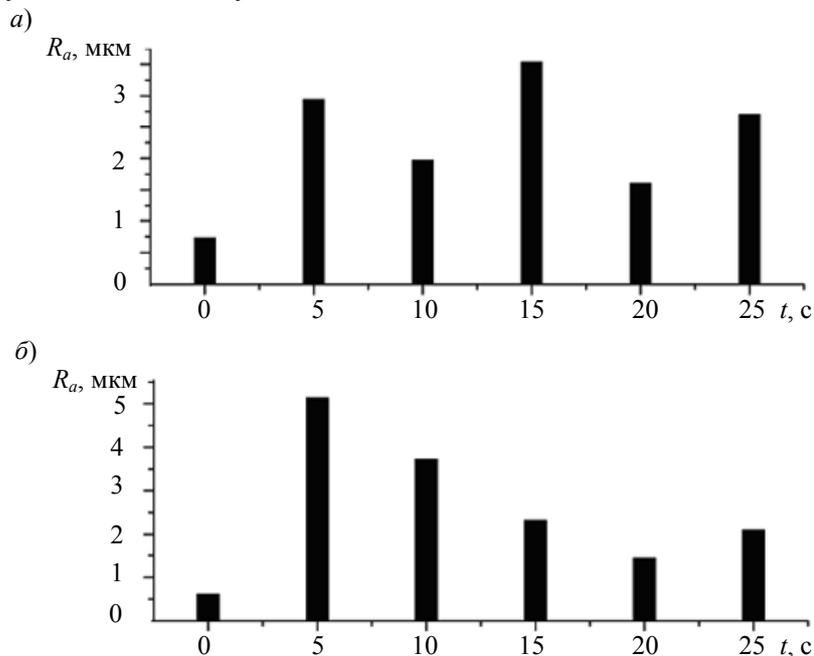


Рис. 1

Подбор параметров Ω и ω из формулы (1) под экспериментальные зависимости осуществлялся методом перебора, на рис. 2 показаны результаты (a — $\Omega=0,1$; b — $0,06$ Гц) для данных, приведенных на рис. 1, a .

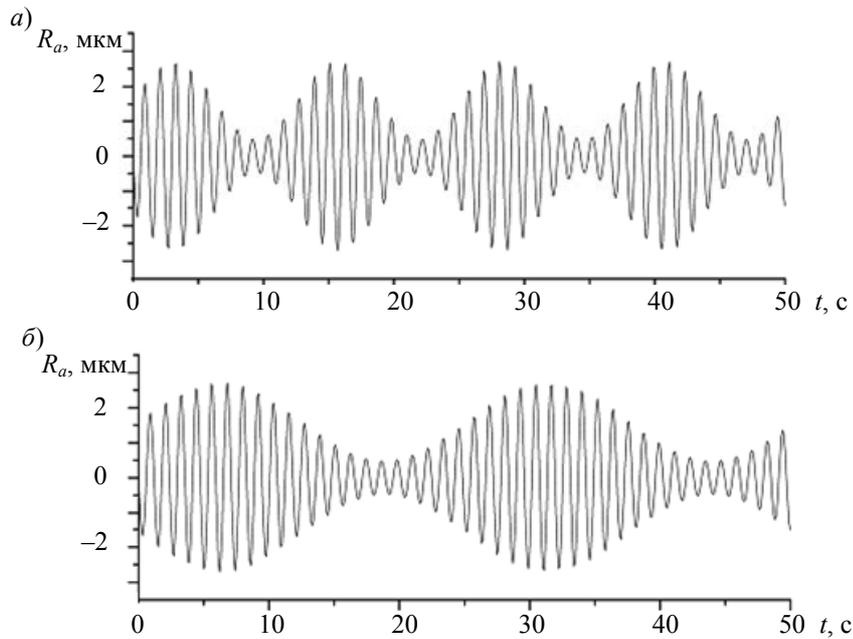


Рис. 2

Обсуждение результатов. В результате проведенной операции искусственной подгонки параметров под выбранную модель было установлено, что числовые значения параметров Ω и ω имеют вполне определенный физический смысл. Так, несущая частота ω может быть описана как частота соударений шероховатостей двух поверхностей. Эти данные могут быть определены по исходным профилограммам поверхностей трения. Профилограммы поверхности для монокристаллов сапфира дают значения расстояния между шероховатостями, попадающими на начальный участок кривой Аббота [7], в пределах 0,1—0,2 мм. С учетом скорости скольжения 0,25 м/с получаем частоту соударений 125—250 Гц, числовой подбор по формуле (1) дал значение несущей частоты в 160 Гц, порядок этой величины укладывается в приведенный интервал. Частоте модуляции Ω также может быть придан физический смысл.

Ранее было установлено, что при сухом трении наблюдаются циклические изменения различных физических свойств приповерхностных объемов [8—10]. Характерное время этих изменений лежит в пределах от единиц до десятков минут при сухом трении и скорости до 1 м/с. За это время успевает сформироваться и разрушиться тонкий поверхностный контактный слой.

Период циклических изменений свойств поверхности объекта T можно связать с частотой модуляции Ω следующим образом $\Omega = 1/T$. Оценки времени жизни слоя, полученные для поверхностей B и R монокристаллов сапфира (10 и 20 с соответственно), качественно соответствуют результатам, полученным ранее. Так, ромбоэдрические поверхности сапфира изнашиваются в 2—3 раза меньше, чем базисные [6], поэтому и время жизни поверхностных слоев должно подчиняться этим соотношениям.

В работе экспериментально изучен начальный этап сухого трения монокристаллов сапфира. Предложена модель, объясняющая циклический характер разрушения поверхности материалов при трении. Параметры модели имеют физический смысл и могут быть связаны с полученными ранее результатами по исследованию особенностей формирования и разрушения приповерхностных контактных слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00966-а) и Научной программы РАН под руководством академика И. Г. Горячевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
2. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.
3. Карасик И. И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. М.: Наука, 1978. 136 с.
4. Hsu S. M., Ming Shen. Wear prediction of ceramics // Wear. 2004. Vol. 256. P. 867—878.
5. Фадин Ю. А., Киреенко О. Ф., Кузнецова О. С., Сычев С. В. Начальная стадия контакта хрупких тел при трении // Трение и износ. 2011. Т. 32, № 3. С. 30—33.
6. Фадин Ю. А., Киреенко О. Ф., Крымов В. М., Никаноров С. П. Трибологические свойства монокристаллов оксида алюминия, полученных способом Степанова // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 32, № 10. С. 1466—1469.
7. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
8. Марченко Е. А., Непомнящий Е. Ф., Харач Г. М. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа // ДАН СССР. 1968. Т. 181, № 5. С. 1103—1104.
9. Жарин А. Л., Шипица Н. А., Фишвейн Е. И. Некоторые особенности усталостного процесса при трении скольжения // Трение и износ. 1993. Т. 14, № 4. С. 645—656.
10. Фадин Ю. А., Лексовский А. М., Гинзбург Б. М., Булатов В. П. Периодичность акустической эмиссии при сухом трении пары сталь—латунь // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 5. С. 10—13.

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Сычев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра машиноведения и деталей машин;
E-mail: Sychou@yandex.ru
- Юрий Александрович Фадин** — д-р техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург; заведующий лабораторией; E-mail: fadinspb@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.