

05;12

Фрактальные особенности частиц износа

© Ю.А. Фадин, Ю.П. Козырев

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 4 февраля 2000 г.

Приведены экспериментальные результаты по исследованию фрактальности отделяющихся частиц износа поликристаллической меди при сухом трении ее по стали. На основе этих данных рассмотрены особенности образования трещин при трении.

Детальное исследование изнашивания представляет большой научный и практический интерес. Однако отсутствие доступа к поверхностям контакта в процессе изнашивания существенно ограничивает возможности непосредственного изучения поверхностного разрушения. Единственно доступными материальными объектами, по которым можно судить о процессе разрушения поверхности непосредственно в процессе трения, являются частицы износа.

Частицы износа образуются в результате объединения разных типов приповерхностных трещин. Поэтому поверхность частицы износа является поверхностью разрушения и ее исследование может дать богатую экспериментальную информацию о развитии разрушения. Такие сведения можно получить с помощью анализа количества, размеров и формы отделяющихся частиц [1].

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей береговой линии частиц изнашивания поликристаллической меди, возникающих при сухом трении ее по стали.

Сухое трение с параметрами: скорость скольжения 1 м/с, давление на контакте 4 МПа — проводилось по схеме: неподвижный медный образец (медь М1) — вращающийся стальной диск (сталь 35). Сбор частиц и их исследование проводились по методике [1].

К настоящему времени известно, что поверхности разрушения фрактальны [2], т. е. соответствующие геометрические элементы имеют дробную размерность поверхности или длины. Используемый в настоящей работе режим трения обеспечивал появление плоских частиц износа. Отношение максимального размера всех исследуемых частиц к их толщине

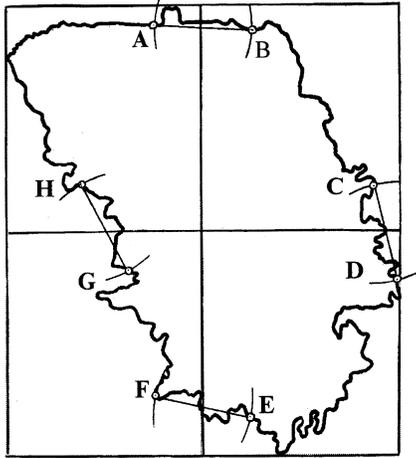


Рис. 1. Разбиение контура частицы на части для определения фрактальной размерности.

было > 5 . В литературе это явление носит название "лепесткового" или "чешуйчатого" износа [3]. Плоские частицы удобны в работе и часто встречаются на практике, поэтому интересно проследить за изменением фрактальной размерности вдоль береговой линии частицы, поскольку в образовании частицы участвуют напряжения сжатия и сдвига. Длина береговой линии частицы подчиняется уравнению [4]

$$L(\eta) = L_0 \eta^{1-D},$$

где η — мерный отрезок, которым производится измерение береговой линии, L_0 — значение длины для нефрактальной кривой, D — фрактальная размерность. Фрактальная размерность контурной линии частиц износа определялась по фотографическим изображениям частиц, полученных в оптическом микроскопе в проходящем свете при большом увеличении. В настоящей работе коэффициент фрактальной размерности рассматривался не на всей длине контура частицы, а на отдельных ее частях.

Для того чтобы можно было проводить сравнение между разными частицами, разбиение контурной линии на части проводилось следую-

Участок контурной линии	Размерность D
AB	1.02
CD	1.18
EF	1.26
GH	1.25

шим образом (рис. 1). Независимо от размеров каждую частицу можно вписать в прямоугольник. Наиболее гладкая часть контура частицы всегда размещалась в верхней части прямоугольника. Напротив середин соответствующих сторон прямоугольника контур частицы пересекался секущими фиксированной длины $AB = CD = EF = GH$. Фрактальная размерность D определялась на отрезках контура, которые отсекались секущими.

Для подсчета D использовался метод [5], который заключался в аппроксимации длины отрезка контура частицы ломаной линией, вершины которой располагались на контурной линии, а длина стороны представляла собой мерный отрезок длины η . При уменьшении длины мерного отрезка η получался ряд последовательных приближений длины контура. Зависимость длины контура от величины мерного отрезка строилась в двойных логарифмических координатах. В этом случае зависимость $L(\eta)$ линейна и размерность D определялась по формуле $D = 1 - m$, где m — коэффициент наклона прямой. Средние результаты определения фрактальной размерности D для 40 частиц приведены в таблице.

Оказалось, что фрактальная размерность части контура с минимальной изрезанностью всегда близка к $D \sim 1$, а фрактальная размерность части контура, лежащая против других сторон квадрата, всегда больше 1. Поскольку поверхность частицы является результатом взаимодействия трещин различных типов, можно предположить, что и контурная линия частицы в какой-то степени отражает особенности взаимодействия трещин. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Поверхность фрикционного контакта имеет весьма неровный вид, поскольку вся покрыта бороздками трения (рис. 2). Выявление на этом фоне трещин, да еще с малым раскрытием, практически невозможно даже при использовании электронного микроскопа. Поэтому было проведено электронно-микроскопическое исследование заранее отполированной и

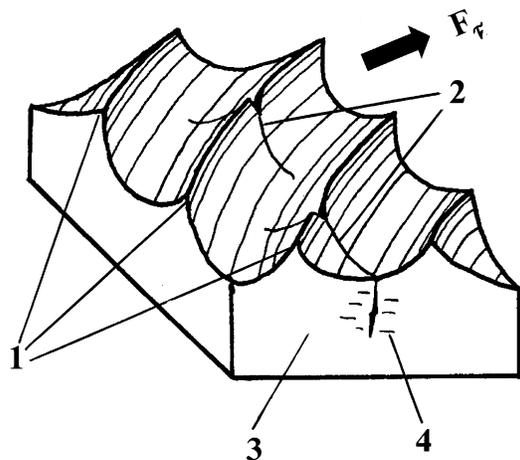


Рис. 2. Схема наблюдения трещин вблизи поверхности фрикционного контакта: 1 — бороздка трения; 2 — трещины, нормальные к направлению силы трения F_f ; 3 — полированная поверхность; 4 — полосы сдвига, возникающие под действием силы трения.

подготовленной боковой поверхности образца в области, максимально приближенной к поверхности фрикционного контакта. По-видимому, при трении в поверхностном слое формируются несколько систем трещин. Одна система трещин (рис. 2) образуется в плоскости фрикционного контакта в направлении, перпендикулярном к действию силы трения, которая в данном случае выступает как растягивающая сила. Такие трещины при своем росте и последующем объединении имеют весьма разветвленную зигзагообразную поверхность разрушения [6]. Можно ожидать, что соответствующие фрактальные размерности, длины и площади, на берегах такой трещины будут отличаться от целых значений.

По-видимому, существует и другая система трещин, которая образуется под действием сдвиговых напряжений, также вызываемых силой трения. Области сдвигов отчетливо наблюдались на хорошо отполированной и протравленной боковой поверхности (рис. 2). Сдвиговые напряжения обеспечивают формирование контура частицы в направлении действия силы трения и сдвиг всей частицы в плоскости, лежащей

на некоторой глубине и параллельной плоскости трения (скол). Берега трещины скола гладкие, поэтому геометрические размерности длины в этом случае мало отличаются от евклидоваго целого значения 1.

Таким образом, фрактальная размерность D , измеренная в разных точках периметра частицы износа, может дать важную информацию о механизмах процесса трещинообразования в микроскопических окрестностях точек наблюдения в моменты времени, непосредственно предшествующие отделению частицы. Кроме того, могут быть получены необходимые сведения, позволяющие реконструировать положение данной частицы на поверхности контакта по отношению к направлению силы трения в момент ее отделения.

Список литературы

- [1] Фадин Ю.А., Полевая О.В., Попов И.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 22. С. 62–65.
- [2] Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. // Nature. 1984. V. 308. N 5961. P. 721–722.
- [3] Suh N.P. // Wear. 1973. V. 25. N 1. P. 111–124.
- [4] Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
- [5] Podsiadlo P., Stachowiak G.W. // Wear. 1998. V. 217. N 1. P. 24–34.
- [6] Новиков И.И., Ермишкин В.А. Микромеханизмы разрушения металлов. М.: Наука, 1991. 367 с.