

01;05

Применение фракталов к анализу процессов трения

© С.Ю. Тарасов, А.В. Колубаев, А.Г. Липницкий

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.

Сделана попытка оценить фрактальную размерность боковой поверхности стального образца, образовавшуюся в результате трения, из анализа изображения, полученного с помощью сканирующего электронного микроскопа.

При деформировании твердого тела (растяжении или сжатии) на поверхности образца образуется рельеф, вид которого отражает степень деформации внутри самого материала. Поскольку процесс деформации идет самосогласованно, возможно формирование рельефа поверхности, обладающего свойством скейлинга. Оценка верхней границы размеров скейлинговых структур позволяет судить о степени коррелированности процесса деформации в пространстве. Оценка же величины фрактальной размерности свидетельствует о фактической площади поверхности [1] и в некоторой степени о характере диссипации энергии при деформировании [2].

В условиях трения на формирование рельефа поверхности твердых тел кроме объемной деформации влияют другие факторы, обусловленные спецификой нагружения. В этом случае деформация изначально локализуется в поверхностном слое и затем распространяется в глубь материала. Причем при установившемся трении деформированный слой материала имеет фрагментированную структуру с размером фрагментов $\sim 0.01 \mu\text{m}$ [3]. Формирующиеся при трении и изнашивании рельефы как поверхности трения, так и боковой поверхности образца, обусловленные деформированием материала в зоне трения, весьма разнообразны и зависят от условий испытаний. Возникает естественное желание связать геометрические параметры поверхности (например, фрактальную размерность) с характером деформирования поверхностного слоя. При этом сканирующая электронная микроскопия позволяет легко определить фрактальную размерность шероховатой поверхности из анализа интенсивностей вторичных электронов [4]. В данной работе сделана

попытка оценить фрактальную размерность боковой поверхности легированной стали 36НХТЮ после трения в различных режимах из анализа изображений. Предварительно боковая поверхность была отполирована с высокой степенью. Такой косвенный способ изучения самоподобия структур трения связан с тем, что непосредственно сама поверхность трения сильно искажена в результате изнашивания и намазывания ранее отслоившихся частиц износа. Испытания на трение проводили на стандартной установке УМТ-1 без смазочного материала по схеме "палец-диск". Структуру изношенных образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе РЭМ-200. Ввод изображения в компьютер осуществлялся через интерфейсную карту.

Для количественной характеристики фрактальных свойств поверхности образца проводилась численная обработка "РЭМ"-изображений по методике, в которой предполагается, что линия раstra может рассматриваться как профиль исследуемой поверхности вдоль линии сканирования, если учесть поправку, связанную с яркостью изображения в каждой точке данной линии [5]. При этом изменение яркости пропорционально наклону кривой в каждой точке рассматриваемой линии. Такой подход к интерпретации "РЭМ"-изображений позволяет вычислить фрактальную размерность (d_{sem}) исследуемой поверхности. В нашем случае d_{sem} определялась по линейной части графика зависимости $\log_{10}(|J - J'|)$ от $\log_{10}(x)$, где x — расстояние между двумя элементами сканируемой поверхности, J и J' — количество вторичных электронов, собранных на коллекторе от этих элементов, выраженное в яркости пикселя "РЭМ"-изображения. Угловые скобки означают усреднение по всем элементам поверхности, соответствующим данному расстоянию x . Наличие прямолинейных участков на логарифмическом графике означает то, что имеет место самоподобие рельефа поверхности в определенных масштабах. В работе [2] отмечено, что величина фрактальной размерности поверхности разрушения, рассчитанная по данной методике, отчетливо коррелирует с энергией разрушения. Исследование фрактальной размерности поверхности деформируемого твердого тела также показало согласованность вычисляемой из "РЭМ"-изображений фрактальной размерности и степени деформации твердого тела [5].

На рис. 1 показаны поверхность трения образца из стали 36НХТЮ (a) и боковые поверхности (b, c) того же образца после испытаний при разных режимах. На боковой поверхности ярко выражен рельеф, обусловленный пластической деформацией при трении. Причем с удалением от поверхности трения степень деформирования материала снижается.

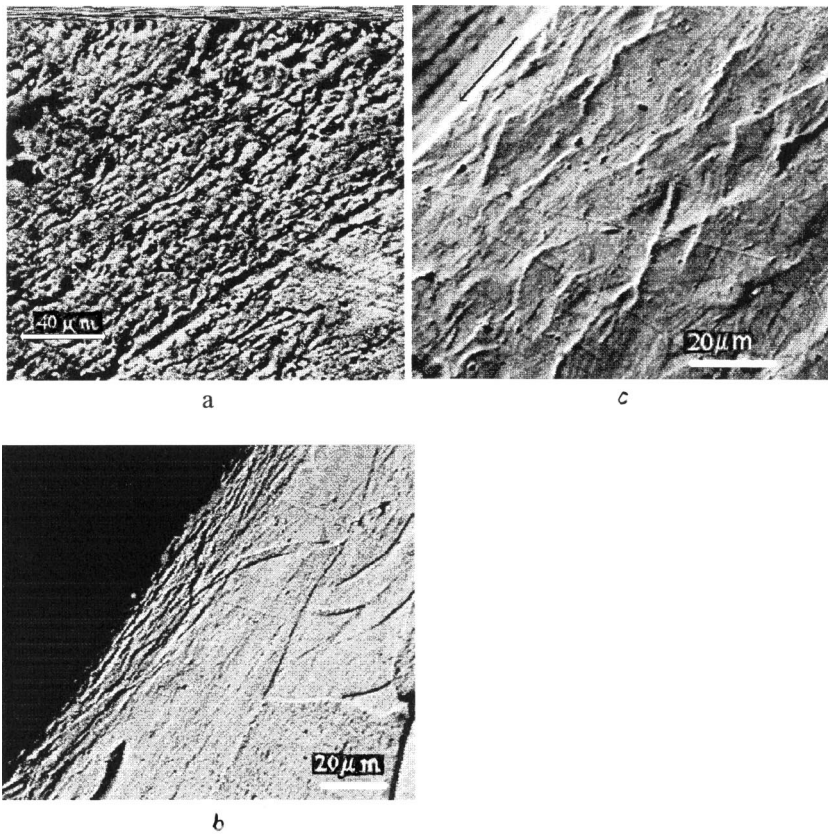


Рис. 1. Поверхность трения образца из стали 36НХТЮ (*a*) и боковые поверхности того же образца после испытаний с различной степенью нагружения (*b, c*).

Обработка электронных изображений боковой поверхности в зоне деформации по описанной выше методике дала результаты, показанные на рис. 2. Каждый рисунок соответствует различным режимам трения: *a* — окислительное изнашивание, когда износ носит равномерный стационарный характер; *b* — интенсивное адгезионное изнашивание с перемешиванием и переносом материала в зоне трения. Расчетные точки аппроксимированы прямыми, наклон которых к оси абсцисс дает

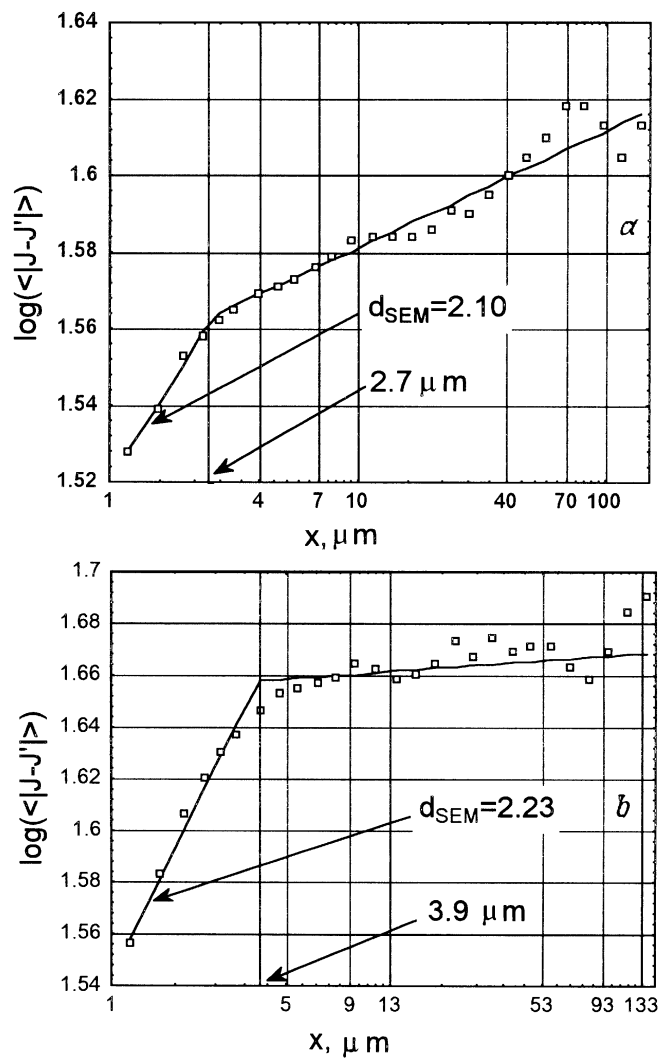


Рис. 2. Зависимости $\log_{10}(\langle |J - J'| \rangle)$ от x , полученные при сканировании "РЭМ"-изображений боковой поверхности: *a* — окислительное изнашивание, *b* — адгезионное изнашивание.

величину фрактальной размерности поверхности для данного масштаба "РЭМ"-изображений. На рисунках четко выделяется интервал на оси абсцисс, определяемый по линейным участкам, который указывает на область существования самоподобия рельефа поверхности. Вне данного интервала о самоподобии говорить нельзя. Этот результат свидетельствует, по-видимому, о том, что процесс трения в произвольный момент времени сопровождается деформацией, которая не охватывает всю поверхность трения, а локализована в областях, связанных с пятнами касания. В следующий момент времени деформированию подвергаются другие участки поверхности скольжения. И с течением времени весь поверхностный слой участвует в процессе деформирования. Однако эта деформация состоит из отдельных продеформированных областей, рельеф которых коррелирует между собой лишь в пределах, соответствующих размерам пятна касания. Такой характер деформации при трении может объяснить существование самоподобия рельефа в ограниченном интервале масштабов. Кроме этого, область существования скэйлинга дает представление о доминирующем структурном мезоуровне процесса пластической деформации поверхностного слоя при трении. В нашем случае элементарным структурным объемом, отвечающим за деформирование и формирование самоподобного рельефа поверхности, является фрагмент кристаллической структуры размером $0.01 \mu\text{m}$. Об этом свидетельствует нижняя граница существования скэйлинга. Верхняя граница самоподобия рельефа участков поверхности зависит от внешних факторов — нагрузки и скорости и определяется, по-видимому, размером деформируемой области, связанной с пятном касания.

Из анализа экспериментальных результатов было установлено, что в пределах действия одного доминирующего механизма изнашивания имеет место относительное постоянство рельефа поверхности и его характеристик, тогда как износ изменяется пропорционально давлению и скорости. Это свидетельствует о том, что интенсивность изнашивания не может быть охарактеризована фрактальными свойствами поверхности. Изменение режима трения, например переход от окислительного изнашивания к адгезионному, сопровождается изменением фрактальных свойств как поверхности трения, так и боковой поверхности образца. В данном случае изнашивание характеризуется значительной толщиной фрагментированного слоя (до $30\text{--}40 \mu\text{m}$ [3]) и высокой активностью процессов переноса, окисления и динамической рекристаллизации в условиях повышенной температуры. Насыщенность дефектами и структурными элементами малых размеров, по нашему мнению, способствует

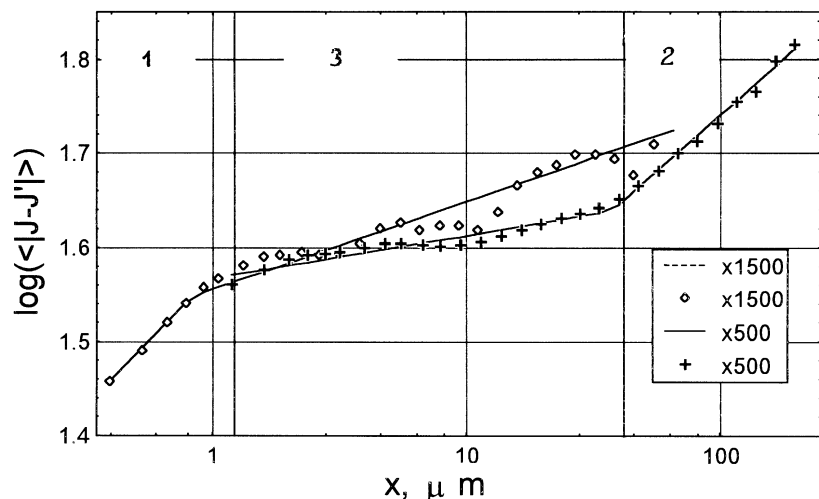


Рис. 3. Результаты расчетов "РЭМ"-изображений по двум увеличениям: 1 — первый мезоуровень, 2 — второй мезоуровень, 3 — область отсутствия корреляции.

этим процессам. Возможность слоя диссипировать энергию путем образования новых поверхностей ведет к изменению фрактальных характеристик. С возрастанием "РЭМ"-фрактальной размерности поверхности трения при этом режиме можно сопоставить увеличение степени диссипации энергии разрушения, подобно тому как это делается при исследовании поверхностей разрушения. Изменение масштаба скейлинговой коррелированности участков поверхности соответствует увеличению структурного уровня, обуславливающего диссипацию энергии.

На рис. 3 представлены результаты расчетов "РЭМ"-фрактальной размерности боковой поверхности, полученные при разных увеличениях. При сопоставлении экспериментальных точек и аппроксимирующих их прямых линий, рассчитанных при различных увеличениях, выявляются два масштаба структур с коррелирующими по степенному закону интенсивностями. При увеличении 1500 наблюдается скейлинговое поведение рельефа боковой поверхности при размере участков изображения от $1 \mu m$ и менее. (Об этом было сказано выше). В пределах от 1 до $\sim 40 \mu m$

скейлинговое поведение не обнаруживается. Начиная с $40 \mu\text{m}$ наблюдается (по обеим кривым!) корреляция интенсивностей. Этот факт может говорить о том, что на поверхности сформировался самоподобный рельеф, размер минимального структурного элемента которого равен $40 \mu\text{m}$. Совпадение данного масштаба с толщиной фрагментированного слоя поразительно. Видимо, появление данного масштаба обусловлено развитием деформации на более высоком мезоскопическом уровне, связанном с движением элементов поверхностного слоя как целого. Этому движению соответствуют вихревые структуры, которые наблюдаются при деформации данного слоя, а также крупные частицы износа, размер которых сравним с толщиной фрагментированного слоя. Добавим также, что деформация на этом мезоскопическом уровне распространяется на большую глубину, достигая 100 и более микрометров.

Таким образом, применение вышеописанной методики для изучения деформации поверхностных слоев материалов при трении представляется весьма интересным, поскольку дает информацию о кинетике массопереноса. Кроме того, может быть установлена взаимосвязь между рельефом деформированной поверхности и режимами трения. В этой связи прежде всего отметим, что деформирование при трении осуществляется на различных масштабных уровнях, которые могут быть выявлены из измерений областей существования самоподобных структур. Нами установлено, что переход в режим интенсивного адгезионного изнашивания сопровождается появлением более высокого мезомасштабного уровня, для которого размер структурного элемента деформации совпадает с толщиной фрагментированного слоя.

Список литературы

- [1] Олемской А.И., Флат А.Я. УФН. 1993. Т. 163. В. 12. С. 1–50
- [2] Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [3] Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. // Изв. вузов. Физика. 1991. В. 8. С. 9–12.
- [4] Huang Z.H., Tian J.F., Wang Z.G. // Materials Science and Engineering. 1989. V. A118. P. 19–24.
- [5] Панин В.Е., Кузнецов П.В., Дерюгин Е.Е., Панин С.В., Епсукова Т.Ф. // ФММ. 1997. Т. 84. № 2. С. 189–192.