

05;11

Фрактальный анализ эволюции поверхности трения гальванических покрытий AuNi

© А.Р. Шугуров, А.В. Панин, А.О. Лязгин, Е.В. Шестериков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
НПФ „Микран“, Томск
E-mail: shugurov@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 21 ноября 2011 г.

Методом атомно-силовой микроскопии исследовано изменение морфологии поверхности гальванических покрытий AuNi при трибологических испытаниях в условиях сухого трения. Показано, что фрактальный анализ позволяет численно охарактеризовать эволюцию рельефа поверхности трения покрытий на различных стадиях испытаний.

Гальванические покрытия на основе золота широко используются для обеспечения стабильно низкого контактного сопротивления, а также высокой коррозионной и температурной стойкости наружных и внутренних проводников радиочастотных соединителей [1]. Поскольку в процессе эксплуатации соединители испытывают многократные циклы соединения-рассоединения, то одной из важнейших характеристик гальванических покрытий является их износостойкость. Анализ морфологии поверхности трения, непрерывно изменяющейся в процессе трибологических испытаний, позволяет детально исследовать механизмы изнашивания гальванических покрытий и выработать рекомендации по увеличению их износостойкости. Однако при выработке количественных критериев износостойкости возникают значительные трудности, поскольку традиционно применяемые характеристики морфологии поверхности зависят от масштаба проводимых измерений и разрешающей способности микроскопа.

В последние годы для триботехнического анализа было предложено использовать фрактальный подход, который является инвариантным по отношению к изменению масштаба [2–4]. Данный подход основан на измерении фрактальной размерности, которая в отличие от других

характеристик шероховатости позволяет количественно описать изменения рельефа поверхности материала одновременно на различных масштабных уровнях [5,6]. Для фрактального анализа поверхностей трения традиционно используются изображения, полученные с помощью оптической [2] и растровой электронной микроскопии [3]. Однако поскольку принцип получения изображений в данных методах базируется на сложных электромагнитных и дифракционных эффектах, то часто возникают затруднения при определении того, является ли некоторый элемент микрорельефа поверхности выступом или впадиной. Кроме того, чередование отражающих и поглощающих участков на поверхности образца может вызывать искусственные изменения контрастности на изображениях. Исходя из этого, наиболее оптимальным методом для корректного исследования морфологии поверхностей трения является атомно-силовая микроскопия (АСМ). Атомно-силовой микроскоп не чувствителен к изменениям оптических или электронных свойств и дает информацию об истинной топографии поверхности, позволяя с высоким разрешением определить реальные размеры деталей рельефа в трех измерениях. В сочетании с атомно-силовой микроскопией фрактальный анализ может обеспечить надежную оценку изменения состояния поверхностей твердых тел в процессе изнашивания. Целью данной работы является исследование возможности применения фрактального анализа АСМ-изображений для численного описания изменений морфологии поверхностей трения гальванических покрытий AuNi.

Гальванические покрытия AuNi (Au — 95, Ni — 5 wt.%) толщиной 3 мкм получали методом электролитического осаждения на подложки из бериллиевой бронзы БрБ2 с промежуточным подслоем NiV толщиной 5 мкм. Испытания на износ проводили на машине трения УМТ-1 по схеме „палец-диск“ при нагрузке 1.85 N и скорости скольжения 0.5 m/s. В качестве контртела использовали шарики диаметром 3 mm из закаленной стали ШХ15. Износ покрытий AuNi определяли посредством измерения ширины дорожек трения d на их поверхности с помощью компьютерной системы получения и анализа оптических изображений, включающей в себя оптический микроскоп Axiovert 40 MAT. Поверхности трения покрытий изучали с помощью атомно-силового микроскопа Solver HV в контактном режиме. Для численной оценки эволюции их рельефа в процессе трибологических испытаний определяли среднеквадратичную шероховатость R_q и фрактальную размерность D_f АСМ-изображений. Вычисление значений данных характеристик проводили путем усреднения по пяти изображениям определенного размера. Размер АСМ-

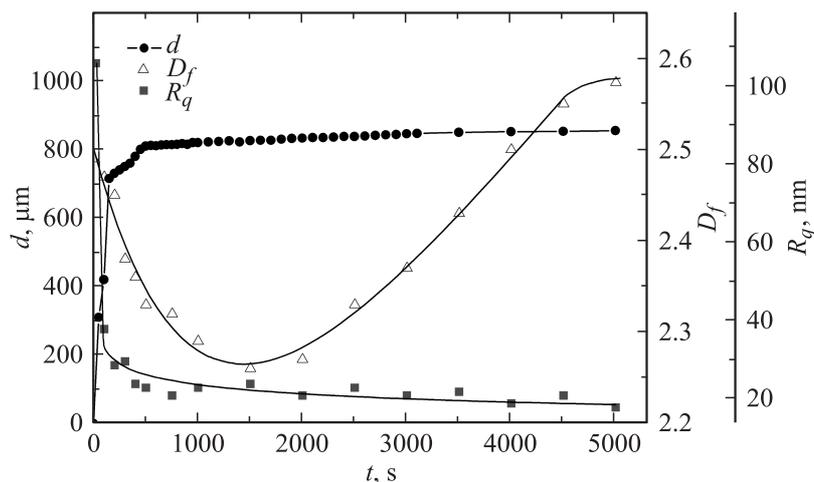


Рис. 1. Зависимости ширины дорожки трения (d) на поверхности покрытия AuNi, а также ее фрактальной размерности и среднеквадратичной шероховатости от длительности испытаний. Значения D_f и R_q получены из анализа АСМ-изображений размером $30 \times 30 \mu\text{m}$.

изображений варьировали от 3×3 до $30 \times 30 \mu\text{m}$. Фрактальный анализ проводили методом триангуляции поверхности [6–8].

Проведенные исследования показали, что на стадии приработки ширина дорожки трения резко возрастает в течение первых 150 s испытаний, после чего следует ее более плавный рост (рис. 1). Примерно через 500 s трибологического контакта наступает стадия установившегося износа, на которой ширина дорожки трения увеличивается очень слабо.

По данным АСМ-исследований, исходные покрытия AuNi характеризуются наличием агломератов зерен с латеральными размерами $3\text{--}5 \mu\text{m}$ и высотой до 500 nm (рис. 2, *a*). Средний латеральный размер зерен составляет 60 nm. В процессе трибологических испытаний на поверхности трения зернистый рельеф постепенно сглаживается, и формируется регулярный бороздчатый рельеф с незначительными вкраплениями частиц износа (рис. 2, *b*). Это свидетельствует об абразивном характере изнашивания покрытий путем микрорезания. Абразивными частицами служат продукты износа трущихся пар. Размеры частиц на

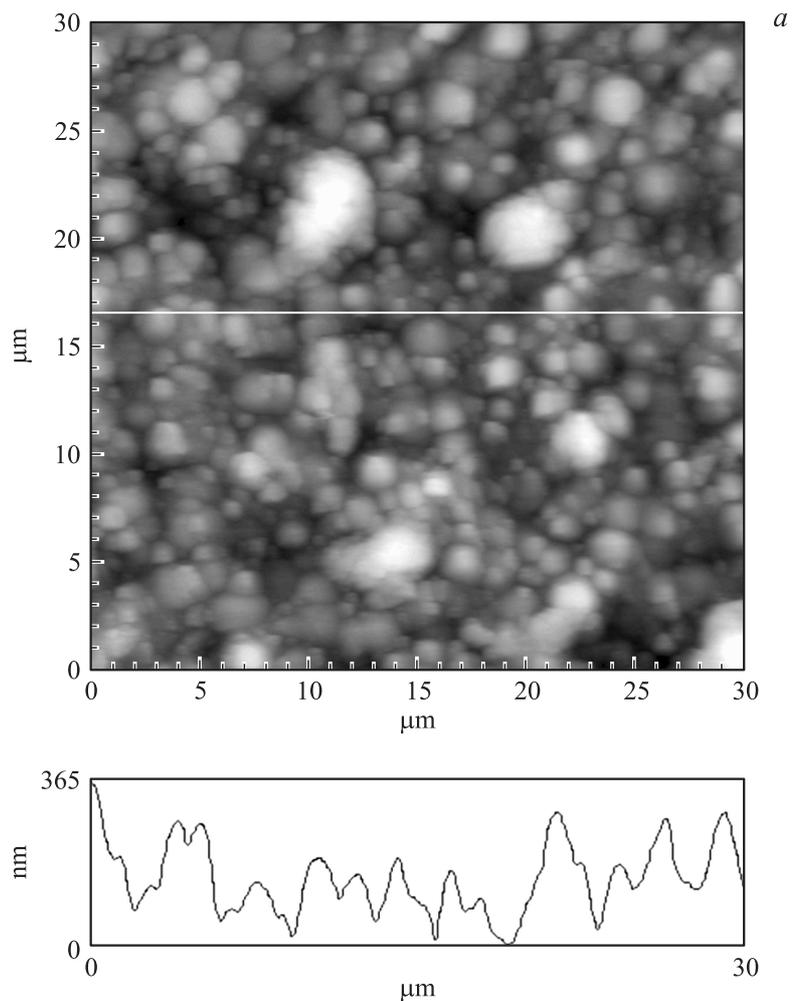


Рис. 2. АСМ-изображения и профили поверхности покрытий AuNi до (a) и после трибологических испытаний в течение 1 500 (b) и 5 000 s (c).

начальной стадии изнашивания достигают десятков микрометров, а к окончанию испытаний уменьшаются до сотен нанометров. В результате бороздчатый рельеф сохраняется вплоть до конца испытаний, однако в

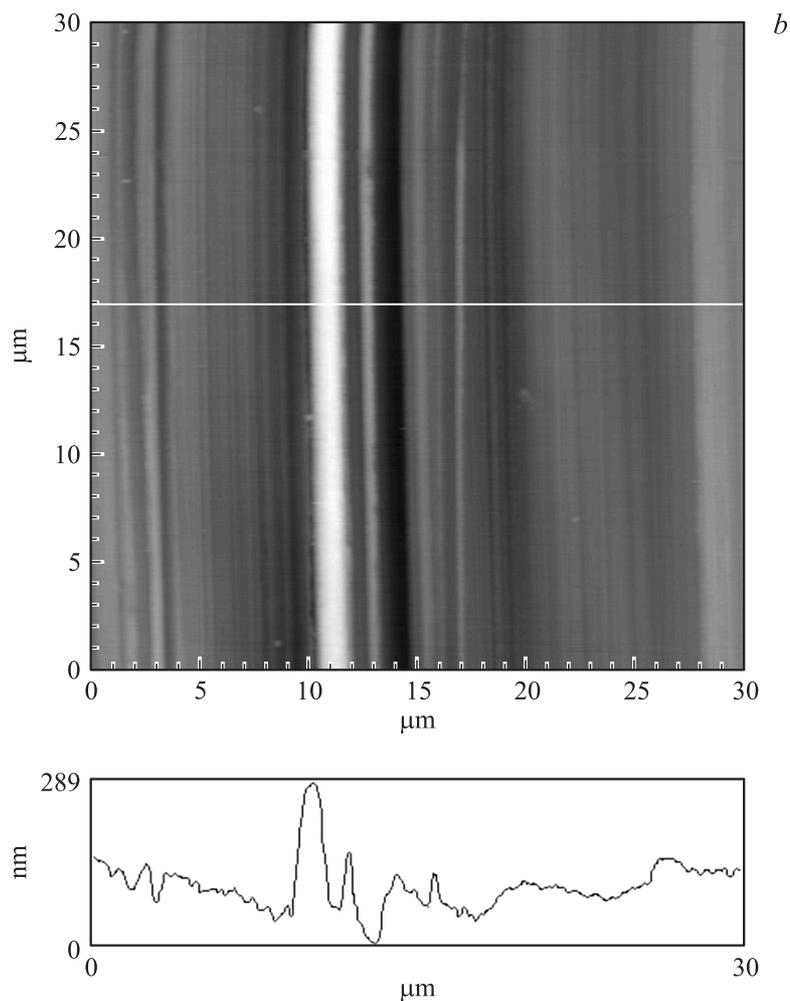


Рис. 2 (продолжение).

процессе трибологического контакта наблюдается существенное уменьшение ширины и глубины бороздок (рис. 2, с).

Зависимость среднеквадратичной шероховатости поверхностей трения покрытий AuNi от длительности трибологических испытаний

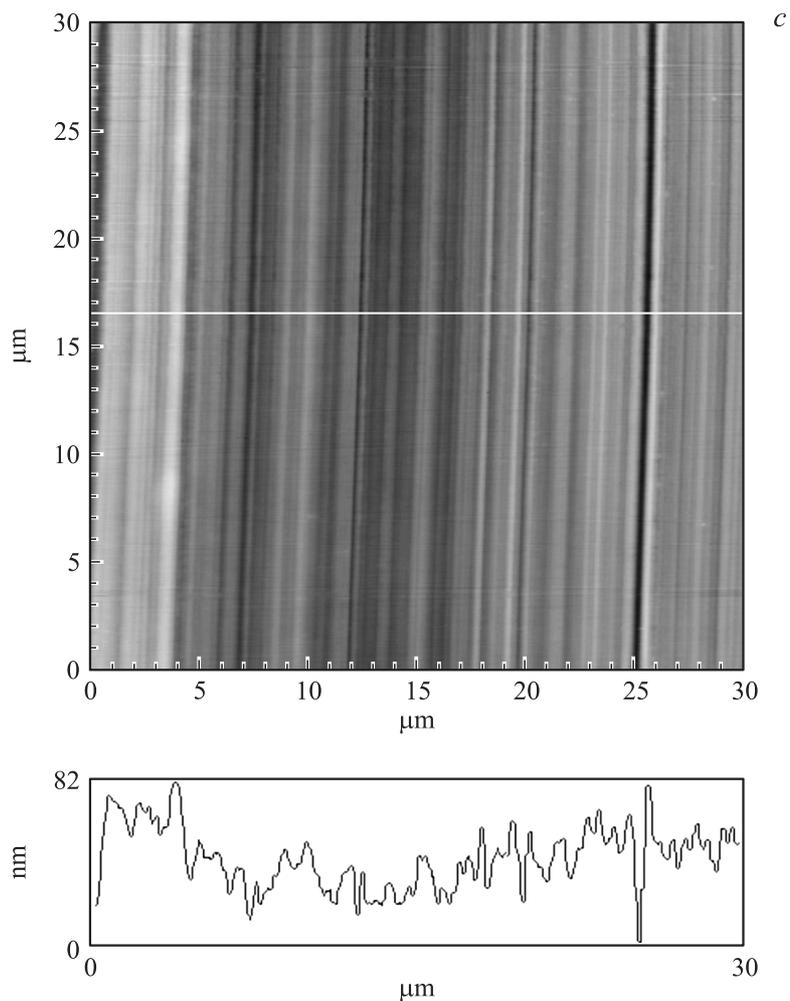


Рис. 2 (продолжение).

обнаруживает корреляцию с изменением ширины дорожки трения. Величина R_q резко падает на стадии приработки, в то время как на стадии установившегося износа наблюдается ее слабое уменьшение (рис. 1). Однако данная характеристика демонстрирует сильную

зависимость от масштаба изображения. Так, для исходных покрытий AuNi среднеквадратичная шероховатость составляет 34 nm для АСМ-изображений размером $3 \times 3 \mu\text{m}$ и увеличивается до 108 nm для изображений размером $30 \times 30 \mu\text{m}$.

В отличие от среднеквадратичной шероховатости фрактальная размерность поверхности гальванических покрытий демонстрирует масштабную инвариантность в исследованном диапазоне размеров АСМ-изображений. При этом фрактальная размерность поверхности исходных покрытий AuNi составляет 2.49 ± 0.02 , что соответствует фрактальным поверхностям, формирующимся посредством осаждения или эрозии. Близкие значения фрактальной размерности были получены для поверхностей пленок Au, нанесенных посредством электролитического осаждения [9], и пленок Ag, напыленных при низкой температуре [10].

Приработка трущихся поверхностей сопровождается снижением фрактальной размерности (рис. 1). На этой стадии имеет место истирание исходной шероховатости поверхности, обусловленной наличием крупных агломератов зерен. При этом трибологический контакт между покрытием и контртелом имеет место только на дискретных площадках касания. Возникающие в результате этого сильные градиенты давления и температуры приводят к тому, что термодинамические процессы, протекающие в области дорожки трения, являются высоконервновесными и имеют локальный характер. Как следствие, морфология поверхности трения становится неоднородной, обуславливая деградацию ее фрактальных свойств.

Более плавное снижение фрактальной размерности продолжается и после начала стадии установившегося износа, когда на поверхности гальванических покрытий развивается рельеф, характеризующийся наличием крупных частиц износа, а также глубоких и широких борозд. Оно связано с тем, что в исследуемом масштабном диапазоне основной вклад в измеряемую величину фрактальной размерности вносят флуктуации глубины отдельных борозд, а не шероховатость их поверхности. Минимальное значение фрактальной размерности достигается спустя 1 500 с трибологических испытаний и составляет $D_f = 2.26$.

При дальнейших испытаниях измельчение частиц износа и сглаживание наиболее глубоких борозд приводят к тому, что шероховатость поверхности мелких бороздок становится сравнима с флуктуациями их высоты. Формирование статистически однородной морфологии поверхности трения с одновременным уменьшением линейных размеров

отдельных неровностей обуславливают рост фрактальной размерности поверхности трения, который продолжается вплоть до окончания эксперимента.

Следует отметить, что близкие значения фрактальной размерности и одинаковый характер зависимости D_f от длительности испытаний наблюдаются только при анализе АСМ-изображений в диапазоне от 3×3 до $30 \times 30 \mu\text{m}$. Это связано с тем, что латеральный размер неровностей и частиц износа существенно больше их высоты. Поэтому исследуемая поверхность дорожек трения является не самоподобной, а самоаффинной и может иметь лишь локальную фрактальную размерность [6]. В этих условиях определение величины ФР возможно только при исследовании структуры самоаффинной поверхности в локальном пределе, т.е. с таким разрешением, чтобы шаг сканирования был соизмерим с вертикальным размером шероховатости поверхности.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что фрактальная размерность АСМ-изображений поверхности трения гальванических покрытий AuNi может являться мерой для численной оценки эволюции ее морфологии в процессе трибологических испытаний. В отличие от среднеквадратичной шероховатости, снижение которой отражает лишь изменения рельефа, связанные с истиранием исходной шероховатости поверхности, фрактальная размерность позволяет разделить стадии образования крупных частиц износа и их постепенного измельчения и выноса. Поскольку морфологическая структура поверхностей трения оказывает существенное влияние на их триботехнические характеристики, то величина фрактальной размерности может использоваться для количественного описания их изменений в процессе изнашивания. Таким образом, фрактальный анализ поверхностей трения открывает широкие перспективы получения количественного критерия износостойкости покрытий.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проект III.20.1.1) и РФФИ (грант № 10-08-01213-а).

Список литературы

- [1] Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
- [2] Zhang J., Regtien P., Korsten M. // *Metrol. Meas. Syst.* 2005. V. 12. P. 111.
- [3] Кульков С.Н. // *Трение и износ.* 1997. Т. 18. С. 761.

- [4] *Киселевский О.С., Казаченко В.П.* // Трение и износ. 2006. Т. 27. С. 304.
- [5] *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. N.Y.: Freeman, 1983. 480 p.
- [6] *Feder J.* Fractals. N.Y.: Plenum Press, 1989. 283 p.
- [7] *Talibuddin S., Runt J.P.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. P. 5070.
- [8] *Панин А.В., Шугуров А.Р.* // Поверхность. 2003. № 6. С. 64–71.
- [9] *Vazquez L., Salvarezza R.C., Ocon P., Herrasti P., Vara J.M., Arvia A.J.* // Phys. Rev. E. 1994. V. 49. P. 1507.
- [10] *Douketis C., Wang Z., Haslett T.L., Moskovits M.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 11 022.