ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/272

ФУРЬЕ-, ВЕЙВЛЕТ- И ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Al-N В ПРОЦЕССЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Шугуров А.Р., Кузьминов Е.Д.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Твердые керамические покрытия широко применяются для защиты от износа и коррозии деталей и механизмов в обрабатывающей, авиакосмической, автомобильной, медицинской и других отраслях промышленности. Для прогнозирования надежности и долговечности покрытий в условиях высоких фрикционных нагрузок необходимо исследование характера их изнашивания, а также аттестация динамики накопления повреждений. Однако большинство традиционно используемых методик оценки износа покрытий не позволяют получить подобной информации. Перспективным способом решения данной проблемы является развитие методов обработки и анализа изображений поверхностей трения, которые позволяют проводить детальное изучение изменений их топографии под влиянием фрикционных нагрузок, а также дают возможность количественно оценить степень их поврежденности. Целью данной работы являлось тестирование и сравнение эффективности методик численного анализа изображений поверхностей трения тонких керамических покрытий на основе системы Ti-Al-N для количественной оценки эволюции поврежденности их поверхностей.

Нанесение покрытий Ti-Al-N и Ti-Al-Ta-N осуществляли методом реактивного магнетронного распыления на подложки из стали и ситалла. Толщина покрытий составила 3,0 мкм. Методом наноиндентирования были исследованы механические характеристики полученных покрытий. Трибологические испытания выполняли по схеме «шар-по-диск» в условиях сухого трения. Для оценки износа покрытий проводили анализ профилей поперечного сечения дорожек трения методом интерференционной профилометрии. Морфологию поверхностей трения исследовали с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Для количественной аттестации изменений топографии поверхностей трения покрытий в процессе трибологических испытаний были использованы фрактальный анализ, Фурье- и вейвлет-анализ изображений. Фрактальную размерность D_f определяли методом триангуляции поверхности. Фурье-анализ изображений проводили путем расчета дискретного Фурье-образа и вычисления дискретного значения спектральной плотности мощности (СПМ). Вейвлет-анализ поверхностей трения выполняли по алгоритму Малла с использованием фильтра Добеши второго порядка. Для каждого изображения были определены дискретные значения средней энергии и меры локальной перемежаемости $S_{\text{мху}}$.

Установлено, что наиболее высокими значениями твердости H (30,4 ГПа) и приведенного модуля упругости E^* (308 ГПа) обладают покрытия Ti-Al-N на стальной подложке. Самые низкие механические характеристики ($H = 23,4$ ГПа и $E^* = 279$ ГПа) имеют покрытия Ti-Al-N на ситалловой подложке. Показано, что изнашивание всех исследованных покрытий носит преимущественно абразивный характер. На начальной стадии испытаний это обусловлено контактным взаимодействием между микровыступами на поверхностях контртела и покрытия с образованием мелких частиц износа. В процессе дальнейших испытаний происходит либо вынос этих частиц за пределы дорожки трения и накопление их по ее краям, либо перенос частиц в зоне контакта и существенное усиление абразивного воздействия. Покрытия Ti-Al-N на ситалловой подложке отслаиваются после 12500 циклов испытаний практически на всей поверхности триботрека. В результате обнажается гладкая поверхность подложки, которая обеспечивает однородный контраст на микроскопических изображениях. В случае покрытий на стальной подложке характер износа не изменяется и после того, как на отдельных участках покрытие полностью изнашивается. Поскольку износ подложки также сопровождается вырыванием частиц, их окислением и размазыванием по

Секция 7. Тонкие пленки и многослойные покрытия как иерархически организованные структуры

поверхности трения, то остается примерно постоянной и ее топография. Согласно полученным результатам, наиболее высокой износостойкостью обладают покрытия Ti-Al-Ta-N на стальной подложке, которые изнашиваются через 17500 циклов трибологических испытаний. Показано, что отношение твердости покрытий к приведенному модулю Юнга (H/E^*) позволяет прогнозировать их сопротивление износу.

Установлено, что величина фрактальной размерности демонстрирует резкий рост на начальной стадии изнашивания всех покрытий, что обусловлено увеличением как шероховатости триботрека, так и его относительной площади на изображении. При дальнейших испытаниях покрытий на стальной подложке фрактальная размерность остается практически постоянной вплоть до полного изнашивания локальных участков покрытия, что обусловлено отсутствием изменений топографии поверхностей трения. В то же время в случае ситалловой подложки отслоение покрытия сопровождается резким снижением D_f , что связано с низкой шероховатостью поверхности подложки. Таким образом, фрактальный анализ обеспечивает диагностику предразрушения только для покрытий на ситалловой подложке.

Спектральная плотность мощности, определяемая с помощью Фурье-анализа, как и фрактальная размерность, позволяет диагностировать наступление стадии предразрушения только у покрытий на ситалловой подложке. Однако в отличие от фрактальной размерности анализ спектральной плотности мощности Фурье-спектра позволяет количественно аттестовать скорость накопления повреждений и разрушения покрытий на стадии установившегося износа.

Аналогично Фурье-анализу, вейвлет-анализ оптических изображений позволяет диагностировать наступление стадии предразрушения у покрытий на ситалловой подложке, а также количественно аттестовать скорость накопления повреждений в покрытиях на стадии установившегося износа. В то же время вейвлет-анализ изображений поверхностей трения покрытий на основе Ti-Al-N, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, позволил не только количественно описать накопление повреждений на стадии установившегося износа, но и диагностировать наступление стадии предразрушения покрытий. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что комбинированный вейвлет-анализ оптических и электронно-микроскопических изображений поверхностей трения тонких пленок и покрытий является наиболее эффективным для количественной оценки степени накопления в них повреждений в процессе трибологических испытаний и диагностики стадии предразрушения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.1.3, а также при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области (проект № 18-48-700009).