

**УДК 539.25**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS<sub>2</sub> ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ВАКУУМЕ**

Рамазан Ришатович Ханнанов<sup>(1)</sup>, Орхан Эльдар оглы Алиханов<sup>(2)</sup>, Сергей Алексеевич Швейкин<sup>(3)</sup>

*Студент 3 курса<sup>(1)</sup>, магистр 1 года<sup>(2)</sup>, студент 4 курса<sup>(3)</sup>  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: А.И. Беликов,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Твердосмазочные покрытия дисульфида молибдена (MoS<sub>2</sub>) широко применяются в различных отраслях: машиностроительной, космической, нефтегазовой. Они используются в узлах с динамическими нагрузками, не только при нормальных условиях эксплуатации, но и при экстремальных: в различных винтовых парах, в направляющих скольжения, в узлах космических аппаратов и т.д. Такие покрытия имеют ряд преимуществ: стойкость к разрушению при высоких нагрузках, низкое сопротивление сдвигу, сохраняют антифрикционные свойства при отрицательных и повышенных температурах, обладают высокой стабильностью свойств на протяжении длительного времени. Тонкие пленки MoS<sub>2</sub> благодаря своей слоистой структуре, в которой атомы в плоскости связаны сильными ковалентными связями Mo-S, а между слоями действуют слабые Ван-дер-Ваальсовы силы S-S [1], обладают низким коэффициентом трения, что является самым важным параметром для антифрикционных твердосмазочных покрытий. К таким покрытиям предъявляются высокие требования. Они должны иметь минимальный коэффициент трения, хорошую прирабатываемость, повышенную стойкость к износу, достаточную вязкость, а также проявлять свойства антисхватывания [2].

Основной целью представляемой работы являлась оценка характеристик тонкопленочных покрытий в экстремальных условиях эксплуатации. Для этих целей были проведены исследования трибологических характеристик тонких пленок MoS<sub>2</sub> в вакууме и при повышенных температурах, определялся коэффициент трения скольжения и оценивался износ поверхности, а также долговечность функционирования в экстремальных условиях. В качестве подложек использовались бронзовые пластины, поверхности которых были обработаны ионами аргона из ионного источника перед нанесением тонкой пленки MoS<sub>2</sub>. Тонкие пленки получали методом магнетронного распыления прессованной из порошка MoS<sub>2</sub> мишени. Испытания проводили на специальной трибологической установке в высоком вакууме при давлениях от  $3,2 \cdot 10^{-4}$  до  $9,6 \cdot 10^{-4}$  Па и температуре образцов 250°C. Измерения коэффициента трения осуществляли путем регистрации силы трения, возникающей на фрикционном контакте поверхности тонкой пленки со стальным контртелом–сферой диаметром 3 мм. В результате скольжения контртела по поверхности образца возникает сила трения, которая деформирует гибкие упругие пластины с высокотемпературными тензодатчиками. При нормировании электрического сигнала тензодатчиков осуществлялся пересчет значения силы трения в коэффициент трения с помощью измерительной программы. На рисунке 1 приведен пример полученного графика зависимости коэффициента трения от времени испытаний.

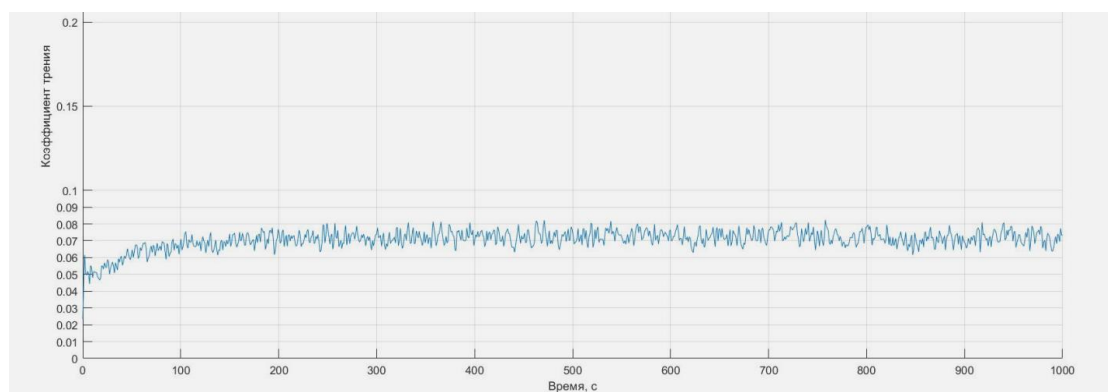


Рис. 1. График зависимости коэффициента трения от времени

Особенности разрушения и износа поверхности тонких пленок оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рисунке 2а при 500х увеличении показан внешний вид поверхности пленки на бронзовой пластине и след износа от контртела. Под контртелом поверхность пленки стала выглаженной, площадь контакта значительно увеличилась за счет смещения слоев в процессе скольжения, видны борозды от выступов контртела с характерными для  $\text{MoS}_2$  вязкими изломами. Поверхность, не подверженная механическому воздействию – рельефная, вследствие наличия микрорельефа исходной поверхности подложки, и многослойная. На снимке с увеличением 5000х (рисунок 2б) наблюдается локальное разрушение с характерными частицами тонкой пленки. Около границы на выглаженном слое заметен небольшой скол. Справа от границы разрушения видна характерная рельефность и слоистость.

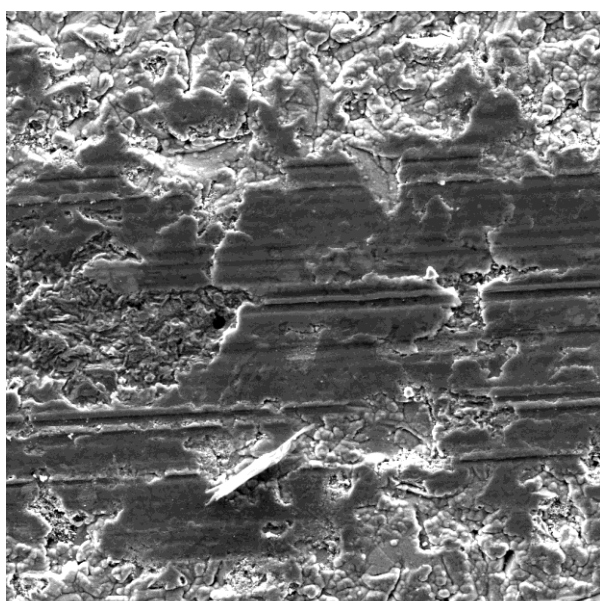


Рис 2а. След износа на поверхности пленки

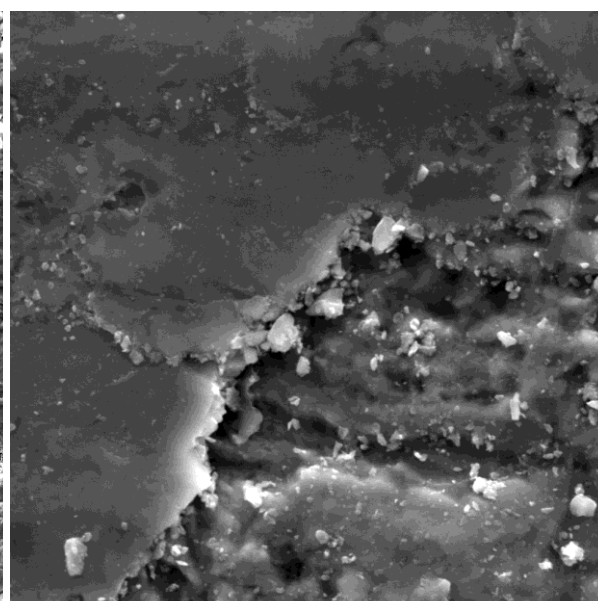


Рис 2б. Граница слоев пленки

Проведенные эксперименты показали, что после 760 циклов возвратно-поступательного перемещения контртела по тонкой пленке образовались небольшие следы износа и свойства пленки сохранились, требования к твердым антифрикционным покрытиям соблюдаются, обеспечивается стабильность коэффициента трения.

По результатам испытаний образцов было выявлено, что полученные тонкие пленки MoS<sub>2</sub> выдержали испытание на износостойкость, критического разрушения не наблюдалось, существенные дефекты не были обнаружены. Поверхность сохранила шероховатость, даже в области сглаживания наблюдается наличие впадин с пленкой. Отдельные эксперименты на долговечность показали, что при контактных давлениях в трибопаре, на уровне 1 ГПа, вплоть до 30 тысяч циклов возвратно-поступательных движений контртела тонкая пленка MoS<sub>2</sub> сохраняет свои антифрикционные свойства, что является хорошим результатом.

### Литература

1. *Vazirisereshk M. R., Martini, A., Strubbe, D. A., & Baykara, M. Z. (2019). Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub>: A Review. Lubricants, 7(7), 57. doi:10.3390/lubricants7070057, 5-7;*
2. *Александров В.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов// Учебное пособие. Часть 1 – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.*