

УДК 621.793.182, 621.893

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ТИПА MoS_2/C

Червова В.Е.⁽¹⁾, Ли Чунцун⁽²⁾

Студент 3 курса⁽¹⁾, аспирант 3 курса⁽²⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Беликов,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Традиционные твердосмазочные покрытия, широко применяемые в машиностроении, более не отвечают возросшим требованиям к современным антифрикционным материалам. Особую остроту эта проблема приобретает в космической отрасли (например, подшипники гироскопов, антенные устройства, механизмы развертывания солнечных батарей). Смазочные материалы на масляной основе подвержены испарению, разложению, что затрудняет их использование для смазки узлов космического оборудования. Для обеспечения высокой точности, стабильности, минимальных вибраций и эффективности работы новых поколений космических механизмов требуются твердотельные сверхсмазочные материалы. Ключевые требования к ним — сверхнизкий коэффициентом трения (10^{-3}) и длительный ресурс ($>10^7$ циклов) [1].

В связи с этим возникла острая необходимость в разработке новых материалов и технологий. Уникальная слоистая структура дисульфида молибдена (MoS_2) обеспечивает ему выдающиеся смазочные характеристики в условиях глубокого вакуума. Однако его главный недостаток — деградация свойств в кислородсодержащей среде, что ведет к потере трибологических характеристик на воздухе [1, 2]. В противоположность этому, углеродные алмазоподобные пленки (DLC) обладают сверхнизким трением и высокой износостойкостью в атмосферной среде, но демонстрируют ухудшение и нестабильность свойств в вакууме. Актуальность разработки композиционных покрытий такого типа, как MoS_2/C , определяется возможностью их использования в экстремальных условиях вакуума и атмосферы при повышенных и низких температурах, что важно и применимо для вакуумного и энергетического оборудования, космической и авиационной техники.

Метод магнетронного распыления является одним из ключевых и наиболее распространенных для осаждения многокомпонентных покрытий состава MoS_2/C благодаря высокой скорости осаждения и контролируемости. Процесс представляет собой сложную многостадийную технологическую последовательность, начинающуюся с подготовки подложек и заканчивающуюся осаждением функционального композиционного слоя. Первым этапом подготовки подложек является механическая полировка до низкой шероховатости, после чего проводится ультразвуковая очистка в органических растворителях для удаления загрязнений [2]. После загрузки в вакуумную камеру и откачки до высокого вакуума выполняется ионное травление поверхности ионами аргона для удаления оксидного слоя и активации поверхности, что критически важно для обеспечения высокой адгезии. Для улучшения сцепления покрытия с металлической подложкой и релаксации внутренних напряжений осаждается адгезионный титановый или хромовый подслои. Титан образует прочные химические

связи как с подложкой, так и с последующим покрытием, что особенно важно для работы в условиях термоциклирования и высоких нагрузок. Толщина подслоя составляет от 150 до 300 нм [4]. Формирование функционального слоя MoS_2/C может осуществляться методом магнетронного распыления с использованием отдельных мишеней. Типичная схема включает две мишени: графитовую (С) и мишень из дисульфида молибдена (MoS_2). Графитовая мишень (С) распыляется источником постоянного или высокочастотного тока. Мишень из MoS_2 , обладающая низкой электропроводностью, эффективно распыляется высокочастотным током [1]. Изменяя соотношение мощности на мишенях, можно менять содержание углерода в покрытии.

Процесс осаждения ведется в атмосфере аргона. Для уплотнения структуры и подавления роста столбчатых кристаллов на подложку подается отрицательное напряжение смещения [5]. Расстояние "мишень-подложка" является важным параметром, влияющим на стехиометрию состава. Температура подложки в процессе осаждения обычно не требует дополнительного нагрева. Время осаждения подбирается таким образом, чтобы получить покрытия необходимой толщины [2]. В результате осаждения формируется нанокompозитное покрытие, представляющее собой нанокристаллы MoS_2 размером 2–10 нм, равномерно распределенные в аморфной углеродной матрице [6, 7]. Введение углерода подавляет рост характерной для чистого MoS_2 столбчатой структуры, что приводит к значительному уплотнению материала и повышению его механических характеристик. Такие покрытия способны адаптироваться к смене условий эксплуатации, реализуя концепцию «хамелеон»-покрытий. В вакууме под действием сдвиговых напряжений происходит перекристаллизация аморфного MoS_2 с образованием высокоориентированных базальных плоскостей, параллельных направлению скольжения, что обеспечивает сверхнизкое трение [3, 6]. Во влажной атмосфере доминирующую роль начинает играть углеродная фаза: происходит графитизация аморфного углерода, и формируется графитоподобная трибопленка, обеспечивающая низкое трение за счет интеркаляции плоскостей графита молекулами воды [7]. При циклической смене сред покрытие каждый раз формирует соответствующую трибопленку (MoS_2 -доминированную в вакууме и углерод-доминированную в атмосфере), демонстрируя обратимую адаптацию к условиям эксплуатации.

Трибометрические испытания в условиях, моделирующих космическое пространство, проводятся на вакуумных трибометрах при давлении порядка 10^{-3} – 10^{-6} Па [3]. Используется схема «шар-по-плоскости», в которой в качестве контртел применяются шарики из стали или керамики. В процессе испытаний регистрируется коэффициент трения в зависимости от времени или числа циклов [4].

На следующем этапе исследований, для понимания механизмов трения, проводится анализ поверхностей трения и продуктов износа методами сканирующей электронной микроскопии [3, 4]. Исследования показывают, что в вакууме при трении происходит перекристаллизация аморфного MoS_2 с образованием высокоориентированных базальных плоскостей, параллельных направлению скольжения, что обеспечивает низкое трение [3, 6]. При этом углерод преимущественно выводится из зоны контакта в составе продуктов износа. Коэффициент трения покрытий MoS_2/C в вакууме может достигать сверхнизких значений, причем для этого необходимо определенное соотношение компонентов [3].

Литература

1. Chai Liqiang, Zhang Xiaoqin, Xu Jiao et al. Preparation, Structure and Tribological Properties of MoS_2 Based Composite Films // Tribology. — 2016. — Vol. 36, No. 1. — P. 1–6.

2. *Кан Хао, Го Пэн, Цай Шэн и др.* Исследование трибологического поведения композитной пленки MoS₂/C в различных средах // Поверхностная технология. — 2019. — Т. 48, № 6. — С. 229–237.
 3. *Li Xuanyu, Ji Li, Liu Xiaohong et al.* Superlubricity Behavior and Mechanism of MoS₂-C Heterostructure Composite Films in Vacuum // Tribology. — 2023. — Vol. 43, No. 10. — P. 1140–1150.
 4. *Cai S., Guo P., Liu J. et al.* Friction and Wear Mechanism of MoS₂/C Composite Coatings Under Atmospheric Environment // Tribology Letters. — 2017. — Vol. 65. — 79.
 5. *Vuchkov T., Evaristo M., Yaqub T.B. et al.* Synthesis, microstructure and mechanical properties of W-S-C self-lubricant thin films deposited by magnetron sputtering // Tribology International. — 2020. — Vol. 150. — 106363.
 6. *Gu L., Ke P., Zou Y. et al.* Amorphous self-lubricant MoS₂-C sputtered coating with high hardness // Applied Surface Science. — 2015. — Vol. 331. — P. 66–71.
 7. *Polcar T., Cavaleiro A.* Review on self-lubricant transition metal dichalcogenide nanocomposite coatings alloyed with carbon // Surface and Coatings Technology. — 2011. — Vol. 206. — P. 686–695.
- .