

3. M.A. Bubenchikov, A.I. Potekaev, A.M. Bubenchikov, Three fundamental problems of molecular Statistics, Russian physics journal. 2013. – V. 56 (3). – P. 341–348.

4. M.A. Bubenchikov, A.I. Potekaev, A.M. Bubenchikov, Thermophoresis of ultrafine and nanosized Particles, Russian physics journal. 2013. – V. 56 (7). – P. 785–790.

5. M.A. Bubenchikov, A.I. Potekaev, A.M. Bubenchikov, A scheme for hydrogen evolution from natural gas, Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 525–528.

6. M.A. Bubenchikov, A.I. Potekaev, A.M. Bubenchikov, Migration of nanoparticles in operating media of heat exchange systems, Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698. – P. 627–630.

### **ИМПУЛЬСНОЕ МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ CU–MO–S**

*С.Ю. Жарков<sup>2</sup>, аспирант,  
М.П. Калашиков<sup>1,2</sup>, ведущий инженер,  
А.Р. Сунгатулин<sup>2</sup>, ведущий технолог,  
В.П. Сергеев<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина, 30,

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

634021, г.Томск, пр. Академический 2/4,

E-mail: retc@ispms.tsc.ru

Эксплуатация в открытом космосе спутниковых антенн, которые в условиях непрерывного вращения принимают слабые электромагнитные сигналы, требует создания электроконтактных пар трения (ЭКПТ), имеющих высокую электропроводность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость в отсутствии смазки [1]. Для изготовления щеток и контактных колец ЭКПТ применяются медные и серебряные сплавы, легированные различными элементами для снижения коэффициента трения, однако их износостойкость недостаточна. Актуальной задачей является поиск методов повышения срока эксплуатации ЭКПТ для перспективных космических аппаратов.

Твердосмазочные покрытия на основе дихалькогенидов тугоплавких металлов хорошо зарекомендовали себя в качестве антифрикционных систем в различных отраслях промышленности [2]. Этому способствует низкий коэффициент трения (аномально низкий в условиях вакуума), достаточно высокая термическая стабильность и хорошая воспроизводимость. Наиболее широкое распространение благодаря своим свойствам получил дисульфид молибдена [2-5]. Однако использование покрытий из чистого дисульфида молибдена в качестве смазки ЭКПТ проблематично из-за его относительно низкой электропроводности. Одним из возможных путей решения этой задачи представляется осаждение композитных покрытий на основе системы Cu–Mo–S, обладающих низким коэффициентом трения и высокой электропроводностью.

Данная работа посвящена изучению антифрикционных покрытий на основе системы Cu–Mo–S, осажденных методом импульсного магнетронного распыления.

В качестве экспериментальных образцов использовались параллелепипеды из меди марки М1. Контртела в виде дисков диаметром 40 мм изготавливались из того же материала. Их рабочая поверхность механически шлифовалась и полировалась до величины шероховатости не хуже  $R_a = 0,63$  мкм.

Покрyтия на основе системы Cu–Mo–S осаждались в вакуумной установке УВН-05МД «Квант» при давлении аргона 0,3 Па. На магнетрон, оснащенный композиционной мишенью специальной конструкции, подавалось питание мощностью 0,4 кВт от импульсного биполярного источника с частотой повторения импульсов 50 кГц. Осаждение длилось в течение двух часов, в результате чего толщина покрытий достигала ~20 мкм.

Образцы испытывались на износ в оригинальной машине трения в атмосфере аргона по схеме «колодка–диск». Образец с покрытием прижимался к вращающемуся со скоростью 240 об/мин контртелу с нагрузкой 40 г. Испытания продолжались до тех пор, пока покрытие не разрушалось, и не начинали появляться медные частицы износа подложки. Износостойкость покрытия рассчитывалась как отношение времени износа к убыли массы покрытия. Коэффициент трения покрытия замерялся на машине для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 на воздухе по схеме «колодка–диск».

Структурно-фазовое состояние образцов исследовалось методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100 и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO EVO 50XVP, оба микроскопа оснащены спектрометрами INCAx-акта. С помощью этих спектрометров методами микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) изучался элементный состав покрытий.

Исследование морфологии поверхности осажденных покрытий на основе системы Cu–Mo–S методом РЭМ показали, что покрытия имеют сложно-переплетенную волокнистую структуру, у которой в промежутках между волокнами расположены глобулярные выделения материала (рис.1).

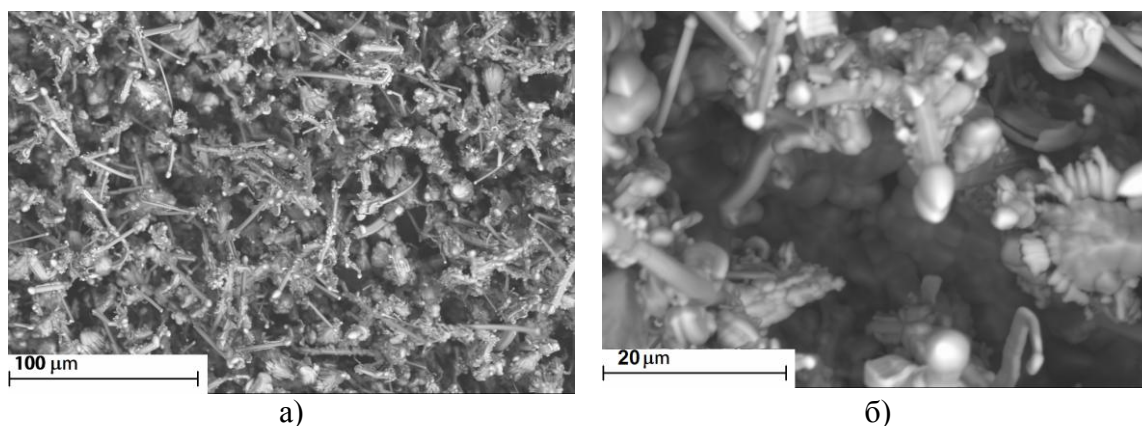


Рис.1. РЭМ-изображения композитного покрытия системы Cu–Mo–S, осажденных с помощью импульсного магнетронного распыления: а – изображение волокон, б – изображения глобул между волокнами.

Исследование методом ПЭМ поперечного сечения полученных покрытий показало, что обнаруженные глобулы состоят из смеси медных кристаллитов в форме квазикубоидов (рис.2а, светлые включения), со средним поперечным

размером ~60 нм и сульфидных наночастиц  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$  (рис. 2б, светлые включения) со средним размером ~8 нм. Каждая глобула заполнена наночастицами  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ , в объеме которой расположены медные квазикубоиды. Наблюдаемые методом ПЭМ волокна имеют нанокристаллическую структуру и состоят из тех же сульфидных нанозерен, которые присутствуют в виде включений в глобулах. Химический состав волокон композитного покрытия  $\text{Cu-Mo-S}$ , определенный методом МРСА с помощью ПЭМ, включает 52 ат.% (Cu) + 19 ат.% (Mo) + 29 ат.% (S), тогда как химический состав глобул – 99,1 ат.% (Cu) + 0,17 ат.% (Mo) + 0,73 ат.% (S).

Время износа медных образцов с покрытием на основе системы  $\text{Cu-Mo-S}$  в среде аргона в паре с медным контртелом до разрушения покрытия составило 115 часов. При этом убыль массы составила 5,5 мг, так что износостойкость системы увеличилась в ~71,7 раз по сравнению с аналогичными испытаниями образцов без покрытия. В качестве механизма такого повышения износостойкости из обсуждаемых в литературе может быть предложен следующий. В [2,4] сообщается, что при испытании на трение и износ твердосмазочных покрытий от них на контртело может переноситься тонкая слоистая пленка со слабым сопротивлением на сдвиг между слоями. Такая пленка была нами обнаружена методом РЭМ на рабочей поверхности контртела. Поскольку наши испытания проводились в условиях замкнутого контура трения, то эта пленка могла многократно переноситься с образца на контртело, тем самым облегчая процесс трения скольжения.

Средний коэффициент трения пары «образец с покрытием – контртело» на воздухе при испытании на машине 2070 СМТ-1 имеет величину ~0,27, в то время как коэффициент трения пары «медный образец без покрытия – контртело» составляет ~0,59 при тех же условиях, т.е. покрытие на основе системы  $\text{Cu-Mo-S}$  понижает коэффициент трения медной пары в два раза. В работах [2-4] сообщается, что в атмосфере вакуума или инертного газа коэффициент трения покрытия на основе  $\text{MoS}_2$  на порядок ниже, чем при работе в атмосфере влажного воздуха. И действительно, при испытаниях на воздухе мы наблюдали более низкий эффект повышения износостойкости пары трения «образец с покрытием – контртело» – в ~7,9 раз.

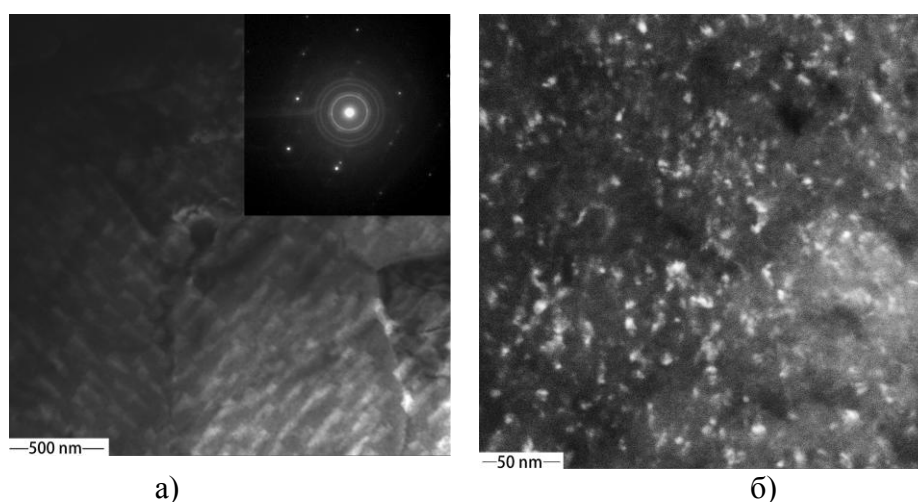


Рис.2. ПЭМ-изображения поперечного сечения глобул композитного покрытия на основе системы  $\text{Cu-Mo-S}$ : а–темнопольное изображение с микродифракционной картиной, б–темнопольное изображение с большим увеличением.

Таким образом, установлено, что при импульсном магнетронном осаждении композитных покрытий на основе системы Cu–Mo–S формируется сложная волокнисто-глобулярная структура. Глобулы этой структуры заполнены наночастицами  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ , в объеме которых расположены медные квазикубоиды, а волокна состоят из тех же наночастиц  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ . Испытания на износ показали многократное повышение износостойкости в результате образования смазывающей пленки на рабочих поверхностях образца и контртела.

### Список литературы:

1. Авербух В.Я., Гамыгин К.А., Глушкин Я.А. и др. Ферромагнитные электроконтактные материалы для многоканальных вращающихся контактных устройств//Электрические контакты. – Санкт-Петербург: С-ПБГПУ, 2002. – С. 148–150.
2. Baker C.C., Chromik R.R., Wahl K.J., Hu J.J., Voevodin A.A. Preparation of chameleon coatings for space and ambient environments//Thin Solid Films – 2007. – V. 515. – P. 6737–6743.
3. Chen Shu-xian, Feng Yi, Li Shu, Xie Yu-juan. Influence of  $\text{MoS}_2$  contents on sintering process and properties of Cu- $\text{MoS}_2$  composites //Journal of Materials Science and Engineering. – 2008. – V. 2.– №12. – С. 7–12.
4. Chromik R.R., Baker C.C., Voevodin A.A., Wahl K.J. In situ tribometry of solid lubricant nanocomposite coatings // Wear. – 2007. – V. 262. – P. 1239–1252.
5. Сергеев В.П., Воронов А.В., Сергеев О.В., Пушкарева Г.В. Трибологические свойства подшипниковой стали ШХ-15 с покрытием  $\text{MoS}_x$  после обработки пучком ионов молибдена // ФиХОМ. – 2005. – №6. – С. 38–42.

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОТВЕРДОСТИ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМ-НИКЕЛЬ-МОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ПРОКАТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Т.А. Козлова<sup>1</sup>, студент гр. 4БМ32,*

*Е.В. Мельников<sup>2</sup>, аспирант*

*Е.Г. Астафурова<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., доцент*

<sup>1</sup>*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина, 30,*

<sup>2</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055,*

*г.Томск, пр.Академический, 2/4*

*тел. (952)-889-30-05*

*E-mail: Tati21@inbox.ru*

**Введение.** Аустенитная нержавеющая сталь является основным материалом, используемым в различных областях человеческой жизни. Некоторые современные материалы имеют преимущества по сравнению со сталью, но, несмотря на это, стали остаются одним из основных материалов для машиностроения, металлургии, авиации, буровых установок и др.[1-2] Таким образом, вопрос о модернизации механических, физических и технологических свойств сталей является, по-