УДК 531.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСЕЛЕНИДОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Е.А.Марченко [1], Т.А.Лобова [2]

10 марта 2008 года исполнилось сто лет со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Игоря Викторовича Крагельского. В 1939 г. в Институте машиноведения он организовал лабораторию общей теории трения, которой руководил 45 лет. Создание твердосмазочных материалов для узлов трения, работающих в экстремальных условиях, прежде всего в космическом пространстве, – одно из направлений работы лаборатории, которое началось по правительственным постановлениям под руководством И.В. Крагельского и совместно с Институтом стали и сплавов продолжается до настоящего времени с учетом современных тенденций в разработке покрытий нового поколения.

Потребность в таких материалах возникла в конце 70-х годов прошлого века в связи с осуществлением программы исследования космического пространства и планет солнечной системы с помощью долгоживущих (5 и более лет) автоматических станций. Новые материалы должны были обеспечивать надежность и долговечность узлов трения при одновременном снижении их энергоемкости и веса. Особенно важным требованием являлось обеспечение стабильности фрикционных характеристик (стабильности момента трения при низком значении коэффициента трения) при многократном изменении внешних условий по составу среды и температуре (вакуум 10^{-3} – 10^{-12} Па, температура от -150°С до +450°С, воздействие различных видов излучений). В качестве материалов для исследования были выбраны диселениды тугоплавких металлов. В табл.1. приведены их характеристики в сравнении с дисульфидом молибдена, который до настоящего времени широко используется в качестве смазочного материала в узлах трения, однако не может удовлетворить все возрастающие требования из-за нестабильности триботехнических характеристик при изменении условий эксплуатации [1-3].

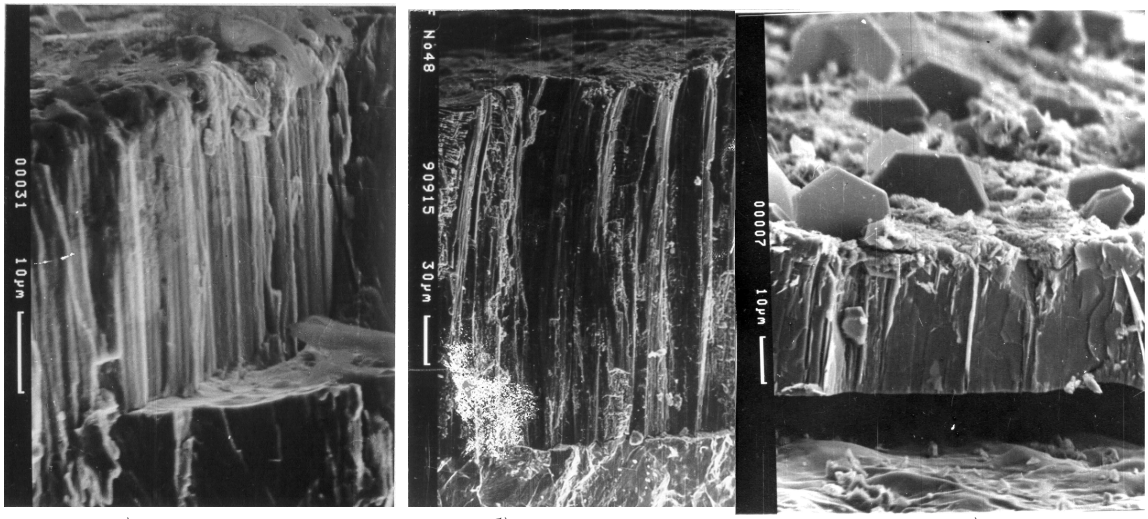
Таблица 1. Характеристики некоторых диселенидов тугоплавких металлов [4]

Соединение	Структурный тип	Термостабильнось, °С		Коэффициент трения
		Воздух	вакуум	
MoS_2	2H-MoS_2	200-350	900	0,02-0,30
$MoSe_2$	2H-MoS_2	400	1350	0,02-0,22
WSe_2	2H-MoS_2	350	1350	0,02-0,185
$NbSe_2$	2H-MoS_2 +политипы	350	1350	0,06-0,17

В результате проведенных исследований к настоящему времени создан новый класс самосмазывающихся материалов с широким спектром применения - покрытия из диселенидов тугоплавких металлов, формирующиеся в процессе химико-

термической обработки металла в парах селена. Этот метод дает возможность получения слоя большой толщины (до 60 мкм) с высокой адгезией на деталях сложной конфигурации [5].

Особенность покрытий из диселенидов тугоплавких металлов (Mo, W, Nb) заключается в их склонности к ориентированному росту, так что в процессе формирования они могут приобретать собственную текстуру. Оптимальные трибологические свойства имеют покрытия, ориентированные плоскостью (110) параллельно поверхности. Такой ориентации соответствует столбчатая структура (рис1 а-в). Однако если у покрытий диселенидов молибдена и вольфрама она образуется по всему сечению (рис. 1 а-б),



а) *б)* *в)*

Рис.1. Микроструктура изломов покрытий $MoSe_2$ (а), WSe_2 (б) и $NbSe_2$ (в).

то у покрытия диселенида ниобия текстура неоднородна: верхние слои имеют смешанную ориентацию по плоскостям (002) и (110) $NbSe_2$, которая постепенно переходит в ориентацию плоскостью (110) $NbSe_2$ параллельно поверхности (рис.1 в).

Технология получения покрытий с заданными трибологическим свойствами наиболее детально была отработана на покрытиях из диселенида молибдена на компактном молибдене, которые предназначались для узлов трения космических аппаратов. Были опробованы различные сочетания температуры и давления паров селена, исследовалось влияние состояния молибденовой основы (шероховатости поверхности, микронапряжений, размера зерна, собственной текстуры) на их структуру и свойства [6]. Достоинство разработанных покрытий заключается в стабильности их свойств. Пусковой момент на воздухе в зависимости от длительности неподвижного контакта остается стабильно низким, в то время, как у дисульфида молибдена он увеличивается почти в три раза (рис.2 а). Влияние среды и температуры испытаний на пусковой момент также незначительно (рис.2б).О высокой стабильности их трибохарактеристик свидетельствуют испытания на воздухе и в вакууме в паре с различными материалами [3].

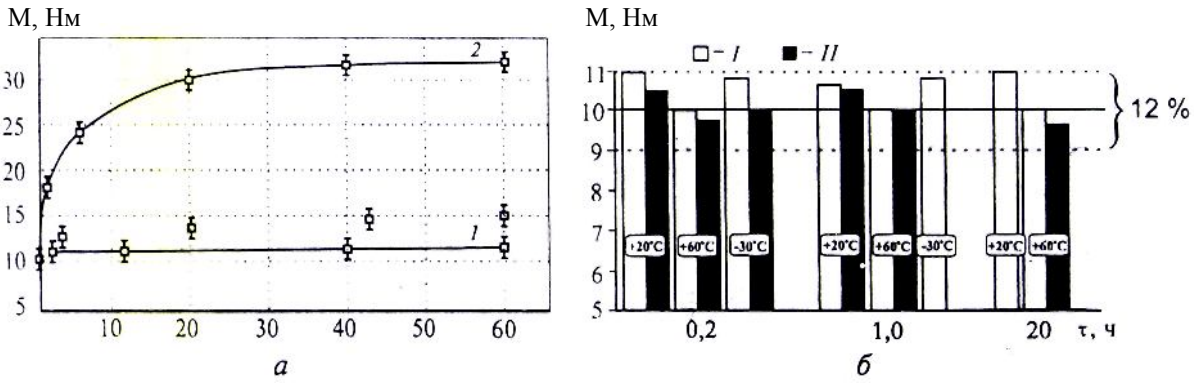
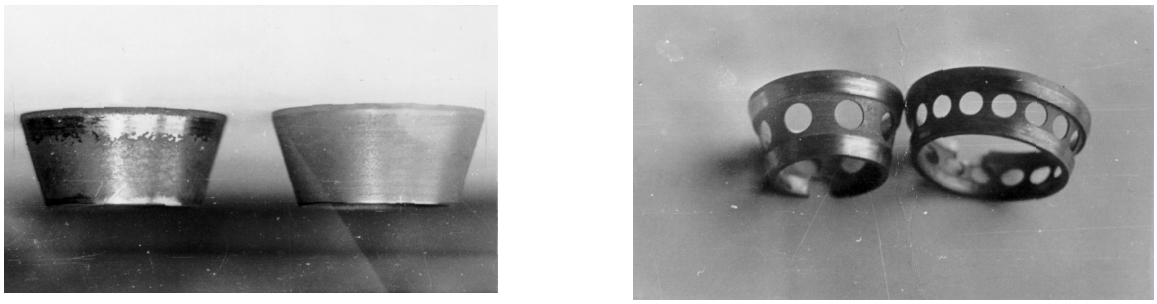


Рис.2. Зависимость пускового момента покрытий $MoSe_2$ (1) и MoS_2 (2) от продолжительности неподвижного контакта (а) и $MoSe_2$ от условий контактного взаимодействия (б): 1- воздух; 2 – вакуум.

Разработанные покрытия диселенида молибдена нашли применение в некоторых узлах трения космических аппаратов, в частности, предохранительной муфте электромеханического привода системы ориентации солнечных батарей, работающей в вакууме 10^{-1}-10^{-5}, при температуре от -50 до +70° С, давлении 15 МПа в течение 5 лет. На рис.3 представлен внешний вид образцов вкладышей предохранительной муфты до и после испытаний (17 включений) на имитаторе трения (а) и реальных деталей (б).



а) *б)*

Рис.3. Образцы для испытаний на имитаторе трения (а) и реальные компоненты предохранительной муфты (б).

Особенностью покрытий диселенидов тугоплавких металлов, полученных химико-термической обработкой металла в парах селена, является их неоднородность по глубине, обусловленная усилением текстуры и увеличением связанной с ней микротвердости. Такая неоднородность оказывает положительное влияние на трибохарактеристики, так как по мере износа интенсивность изнашивания уменьшается. У однофазных покрытий со структурой типа 2H-MoS_2 (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) между микротвердостью и интенсивностью изнашивания существует линейная связь, наличие смешанной текстуры поверхностных слоев и политипов у $NbSe_2$ делает ее более сложной (рис.4). В процессе изнашивания покрытий коэффициент трения остается практически неизменным, поскольку на обеих контактирующих поверхностях формируются одно именные пленки твердой смазки, что способствует стабильности работы узла трения в течение всего срока службы. Однако для особо ответственных случаев более предпочтительны однофазные покрытия с преимущественной ориентацией по плоскости (110) параллельно поверхности.

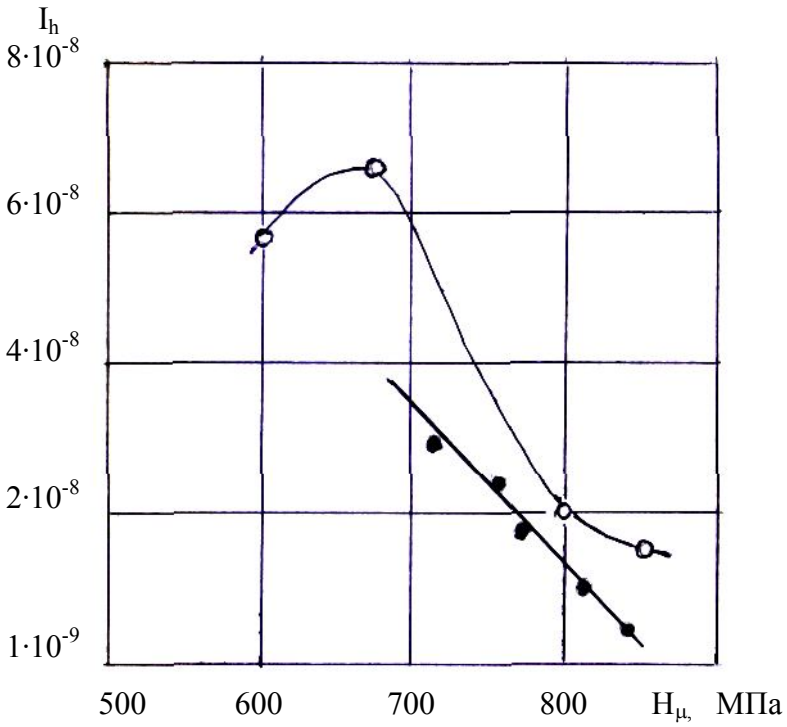


Рис.4. Зависимость интенсивности изнашивания от микротвердости покрытий:
●- $MoSe_2$ ○ – $NbSe_2$

Анализ современных тенденций получения износостойких твердосмазочных покрытий на основе соединений структурного типа 2H-MoS_2 нового поколения показывает, что наиболее перспективными являются функциональные градиентные материалы в виде композитов или послойных материалов. Для нанесения таких материалов в виде пленок толщиной 1-2 мкм используются физические (PVD), химические (CVD) или комбинированные методы [7]. Исследования последних лет показали, что модифицирование металлами (Ti, Zr, Cr W, Ni, Au, Ga, In) существенно улучшает трибохарактеристики дихалькогенидов тугоплавких металлов. Большинство работ проведено при нанесении пленок MoS_2 на поверхность образца путем одновременного или последовательного вакуумного осаждения (PVD-методами) из различных мишеней мультислоев дихалькогенид-металл. В результате получено улучшение трибологических характеристик дисульфида молибдена во влажном воздухе. В зависимости от природы добавок и их концентрации в пленках MoS_2 установлены области стабильного низкого коэффициента трения при повышении долговечности в 6-10 раз по сравнению с чистым диселенидом молибдена [8].

Расширение границ применимости и улучшение трибохарактеристик покрытий со структурой 2H-MoS_2, имеющих толщину 5-60 мкм, может быть достигнуто за счет ведения в их состав веществ, активно влияющих на ход механохимических процессов на поверхности трения. Наиболее эффективными из них являются добавки Sb_2O_3, Ga и др. Легирование галлием или его сплавами с оловом, висмутом, индием повышает стойкость к окислению диселенидов и дисульфидов молибдена и вольфрама до 700° С, при этом улучшаются и прочностные свойства композитов. Так покрытие WSe_2-15% Ga/In имеет практически одинаковую интенсивность изнашивания при температурах 20 и 500° С, в то время, как интенсивность изнашивания чистого диселенида вольфрама при 500° С почти на порядок выше. Повышение износостойкости модифицированных покрытий обуслов-

лено образованием тонкодисперсного порошка чистого вольфрама в процессе термообработки композиции WSe_2 -Ga/In при температуре 500°С. Введение в состав покрытий диселенида молибдена сплава галлия с индием также существенно повышает его износостойкость, особенно при повышенных температурах.

Антиокислительные добавки способствуют стабилизации коэффициента трения в более широком температурном интервале. Подшипники скольжения из титанового сплава ВТ-6 с покрытием WSe_2-Ga/In прошли испытания в среде углекислого газа в паре с валом из титанового сплава ВТ-4. В интервале температур 20-300° С коэффициент трения равнялся 0,16-0,18, поэтому материал рекомендован в качестве перспективного для применения в узлах трения, работающих в углекислой среде при повышенных температурах [9].

Разработанная технология получения диселенидов молибдена и вольфрама в парах селена позволяет синтезировать не только покрытия, но и порошки стехиометрического состава. Совершенство кристаллической структуры порошка диселенида вольфрама обеспечивает его уникальную коррозионную стойкость в основном компоненте жидких ракетных топлив (амиле). Использование порошка диселенида вольфрама в качестве добавок к стандартным жидким маслам позволило в два раза повысить их противопиттинговые свойства по сравнению с аналогичными добавками диселенида молибдена. Порошок диселенида вольфрама абсолютно инертен к другим стандартным присадкам, что улучшает характеристики стандартных масел не снижая эффективности присутствующих в них других добавок. Смазочные композиции с добавками порошка диселенида вольфрама можно использовать в узлах трения дорожно-строительной техники и техники большой грузоподъемности, работающей в тяжелых условиях эксплуатации [10].

В результате комплексного исследования структуры и свойств диселенидов молибдена и вольфрама, полученных обработкой металла в парах селена, выявлены их существенные преимущества перед дисульфидом молибдена: высокая коррозионная стойкость в воде, неорганических кислотах, в газообразных и жидких окислительных средах; высокая стабильность момента трения (отсутствует «стоп-эффект» - всплеск момента страгивания после длительного неподвижного контакта); высокая несущая способность. Стабильность трибохарактеристик в широком интервале внешних воздействий позволяет рекомендовать эти материалы как в виде покрытий, так и в качестве порошковых добавок к стандартным смазочным материалам для узлов трения объектов самого различного назначения, от космических аппаратов до дорожно-строительных машин.

Литература

1. Дроздов Ю.Н., Сеок-Сам-Ким. Трибологические особенности эксплуатации механических систем в открытом космосе //Трение и износ.1998. Т.19. №1. С.12-19.

2.Дроздов Ю.Н., Сеок-Сам-Ким. Надежность и ресурс узлов трения космических технических систем // Трение и износ. 2000. Т.21. №2. С.134-140.

3. Лобова Т.А., Марченко Е.А. Использование нового класса самосмазывающихся материалов для обеспечения надежности функционирования узлов трения космических аппаратов // Трение и износ. 2005. Т.26. №3. С. 290-294.

4. Марченко Е.А., Сергеева Л.М. Некоторые пути улучшения свойств твердосмазочных материалов на основе дихалькогенидов тугоплавких металлов // Трение и износ. 1982. Т.3. №4. С.661-667.

5. Зеликман А.Н., Лобова Т.А., Колчин Ю.О., Крагельский И.В., Марченко Е.А. и др. Способ получения селеновых покрытий на деталях из молибдена // Авторское свидетельство №714803. М.: Госкомитет по делам изобретений и открытий. 1979.

6. Лобова Т.А., Марченко Е.А.Самосмазывающиеся покрытия для узлов трения космических аппаратов // Вестник машиностроения. 2004. №11. С.35-38.

7. Donnet C., Erdemir A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings // Surface and Coatings Technology. 2004. №.180-181.P.76-84.

8. Simmonds M.C., Savan A., Pfluger E., Van Swygenhoven H. Mechanical and tribological performance of MoS_2 co-sputtered composites // Surface and Coatings Technology. 2000.V.126. P.15-24.

9. Лобова Т.А., Марченко Е.А. Трибологические свойства покрытий W(Mo)Se_2-Ga/In //Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. №11.С.27-31

10. Лобова Т.А., Лобанов М.В., Чулков И.П., Саяпин О.А. Новые смазочные композиции с добавками порошков молибдена и вольфрама. // Вестник машиностроения. 2004. №7. С.40-44

[1)] Институт машиноведения РАН, Россия, Москва
[2)]Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Россия, Москва

Поступила: 02.04.09.