

РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОГО ТРИБОМЕТРИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ MoS₂-ПОКРЫТИЙ

DEVELOPMENT OF A VACUUM TRIBOMETRIC STAND FOR HIGH- TEMPERATURE TESTING AND RESEARCH OF SOLID-LUBRICATING MoS₂ COATINGS

А.И.Беликов¹, Л.Л.Колесник², О.Э.Алиханов¹, В.Е.Бражников¹

A.I.Belikov, L.L.Kolesnik, O.E.Alikhanov, V.E.Brazhnikov

¹ МГТУ имени Н.Э.Баумана, Москва

² ООО «Электровакуумные технологии», Москва

Представлены результаты разработки вакуумного трибометрического стенда для высокотемпературных трибологических испытаний материалов и покрытий в условиях высокого вакуума при температурах до 300 °С. В стенде реализован стандартный метод трибологических испытаний при возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости (ASTM G133-05). Приведены результаты ресурсных испытаний твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена, осажденных методом магнетронного распыления MoS₂-мишени при различных режимах.

The development results of a vacuum tribometric stand for high-temperature tribological tests of materials and coatings under high vacuum conditions at temperatures up to 300 °C are presented. The stand implements the standard method of tribological tests for reciprocating sliding of the ball along the plane (ASTM G133-05). The molybdenum disulfide solid-lubricant coatings deposited by magnetron sputtering of a MoS₂ target at a various modes resource tests results are presented.

Ключевые слова: трибометрический стенд, высокотемпературные испытания, вакуумные механизмы, твердосмазочные покрытия, антифрикционные покрытия, MoS₂, дисульфид молибдена, коэффициент трения, износостойкость.

Keywords: tribometric stand, high-temperature tests, solid-lubricant coatings, molybdenum disulfide, wear resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Решения задач разработки твердосмазочных материалов и покрытий для экстремальных условий эксплуатации (в условиях вакуума и высоких температур) связаны с отработкой технологических процессов, в ходе которых необходимо проводить трибологические испытания образцов в соответствующих условиях. Для узлов трения вакуумного оборудования, функционирующих в условиях вакуума, повышенных температур и радиации недопустимо использование традиционных жидких и консистентных смазок, применяются твердосмазочные материалы и покрытия, среди которых наиболее распространены покрытия на основе дисульфида молибдена (MoS₂). В этой связи, в рамках поставленных задач, специалистами ООО «Электровакуумные технологии» проводилась разработка и изготовление специализированного высоковакуумного трибометрического стенда для высокотемпературных испытаний, а также разработка и исследование тонкопленочных твердосмазочных MoS₂-покрытий, формируемых методом магнетронного нанесения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

При разработке стенда в основу конструкции была заложена схема, обеспечивающая реализацию стандартного метода трибологических испытаний при возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости (ASTM G133-05).

Трибометрический стенд (рис. 1) собран на каркасной раме (4) и включает цилиндрическую вакуумную камеру (1), с расположенным внутри испытательным блоком трибометрической системы для испытания образцов. К фланцам камеры присоединены патрубки и угловой клапан-затвор (7) вакуумной системы, а также вакуумный ввод с механизмом передачи возвратно-поступательного движения (2) на предметный столик испытательного блока с помощью привода на основе шагового двигателя и редуктора (3) с кривошипно-шатунным механизмом. Камера содержит две двери: на фронтальной стороне стенда (со смотровым окном) и на тыльной – для обеспечения доступа к испытательному блоку при монтаже исследуемых образцов, а также проведения операции тарировки измерительной системы. Вакуумная система стенда собрана на базе спирального насоса (5) НВСП-35 (АО «Вакууммаш») и турбомолекулярного насоса (6) ВГТН-150 (ВЦМО). Для коммутации магистралей вакуумной системы использованы электропневматические клапаны (7,8). Для контроля давления в вакуумной системе используются вакуумметры с манометрическими преобразователями (10-12) отечественного производства.

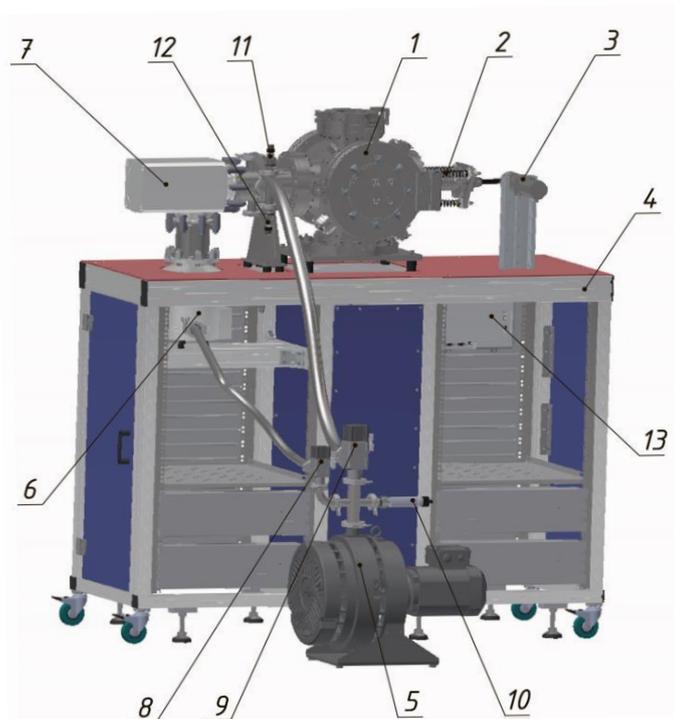


Рис. 1. Общий вид трибометрического стенда. 1 – вакуумная камера; 2 – механизм возвратно-поступательного движения с вводом в вакуум; 3 – двигатель и редуктор привода кривошипно-шатунного механизма; 4 – рама; 5 – форвакуумный спиральный насос; 6 – высоковакуумный турбомолекулярный насос; 7, 8, 9 – клапаны вакуумной системы; 10, 11, 12 – вакуумметрические преобразователи; 13 – блок управления.

Для передачи возвратно-поступательного движения на предметный столик, расположенный внутри вакуумной камеры, был разработан вакуумный ввод движения на основе сифона (рис. 2). Сифон (1) соединяется с вакуумной камерой при помощи фланца (2). Возвратно-поступательное перемещение обеспечивается приводом на основе

шагового двигателя с редуктором и кривошипно-шатунного механизма, шток которого присоединяется к подвижному фланцу (3), который на подшипниках скольжения (5) перемещается по направляющим (4), которые закреплены в фиксаторах (6).

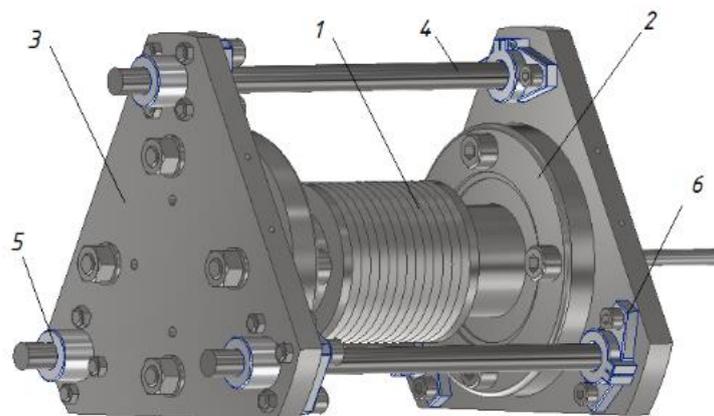


Рис. 2. Механизм линейного перемещения с вводом в вакуум. 1 – сильфон; 2 – фланец крепления к вакуумной камере; 3 – фланец крепления привода кривошипно-шатунного механизма; 4 – направляющие; 5 – подшипники скольжения; 6 – фиксаторы крепления направляющих.

Трибومترическая система стенда (рисунок 3) располагается в центре вакуумной камеры на постаменте, закрепленном на нижнем фланце. Предметный столик (1) с закрепленным на нем исследуемым образцом (2), установлен на подвижной платформе (3), которая опирается на корпус с втулками (13), скользящими по цилиндрическим направляющим (12). Измерительная система включает измерительную стойку (4). На конце измерительной балки (5) крепится стержень (6), в его отверстие вставляется контртело, которое приводится в контакт с исследуемым образцом. На стержень нанизывается груз (9) для создания нормальной силы и необходимых контактных напряжений в контакте «шар-плоскость». Равновесие ненагруженной балки обеспечивается грузами-противовесами (7), закрепленными на противоположной от стержня стороне. Сила трения, возникающая на контакте при перемещении столика с образцом относительно неподвижного контртела направлена перпендикулярно балке и вызывает деформацию присоединенных к балке тензопластин (8) с приваренными к ним высокотемпературными тензорезисторами, соединенными в мостовую схему. Измерительный тензомост подключается к измерительному контроллеру ZET 058 (ООО «ЭТМС»). Подогрев предметного столика осуществляется патронными нагревателями, размещенными в отверстиях (10) столика. Тепловая развязка между столиком (1) и подвижной платформой (3) обеспечивается керамическими брусками (11). К платформе (3) крепится размещенный в опоре (14) шток (15) для передачи возвратно-поступательного движения от вакуумного ввода движения. В конструкции стенда предусмотрены тепловые развязки и элементы виброизоляции, снижающие величину проходящих внешних колебаний к столику и измерительным стойкам.

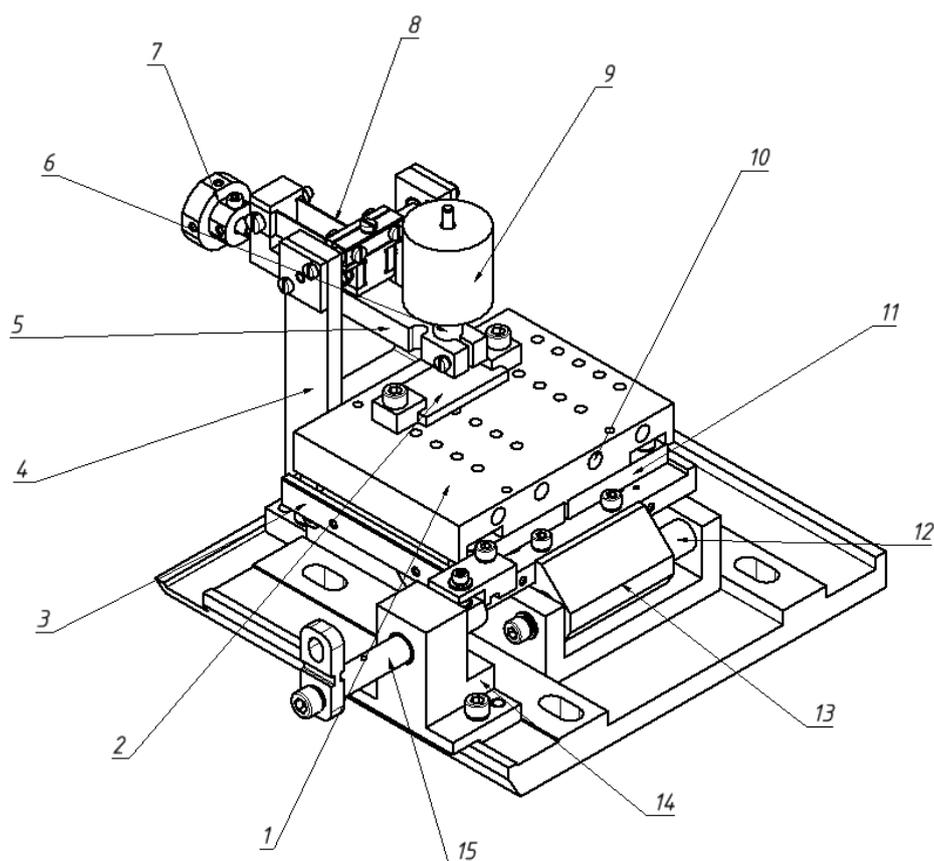


Рис. 3. Конструкция трибومترической системы станда. 1 – предметный столик; 2 – исследуемый образец; 3 – подвижная платформа; 4 – измерительная стойка; 5 – балка для крепления контртела; 6 – стержень, 7 – грузы-противовесы, 8 – тензопластины, 9 – груз для создания нормальной силы, 10 – патронные нагреватели, 11 – керамические бруски, 12 – направляющие, 13 – корпус с втулками, 14 – опора штока, 15 – шток.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для нанесения твердосмазочных MoS_2 -покрытий использовалась вакуумная технологическая установка, обеспечивающая откачку рабочей камеры до остаточного давления 10^{-3} Па. Покрытия наносили методом магнетронного распыления MoS_2 -мишени диаметром 75 мм и чистотой 99.72%, в режиме постоянного тока. В качестве рабочего газа использовался аргон 99.9995% чистоты. В качестве подложек использовали бронзовые пластины для трибологических испытаний и кремниевые пластины-свидетели с шероховатостью поверхности около 3 нм для измерения толщины полученных покрытий по профилю ступеньки с использованием профилометра-измерителя шероховатости TR220 (Фирма TIME GROUP INC., КНР). Для подготовки ступеньки на поверхность кремниевых пластин накладывалась маска, после нанесения покрытия маска удалялась.

Перед нанесением MoS_2 -покрытий предварительно выполнялась подготовка поверхности подложек методами жидкостной очистки в щелочных растворах в ультразвуковой ванне, с промывкой и осушкой. Непосредственно перед нанесением покрытия поверхности образцов обрабатывались ионным пучком с помощью автономного источника ионов. Были получены образцы покрытий с использованием подогрева (250°C) и без подогрева (температура подложки составляла около 50°C). Расстояние между мишенью и подложкой составляло 95 мм. Режимы осаждения покрытий для подготовленных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы магнетронного нанесения твердосмазочных покрытий MoS₂

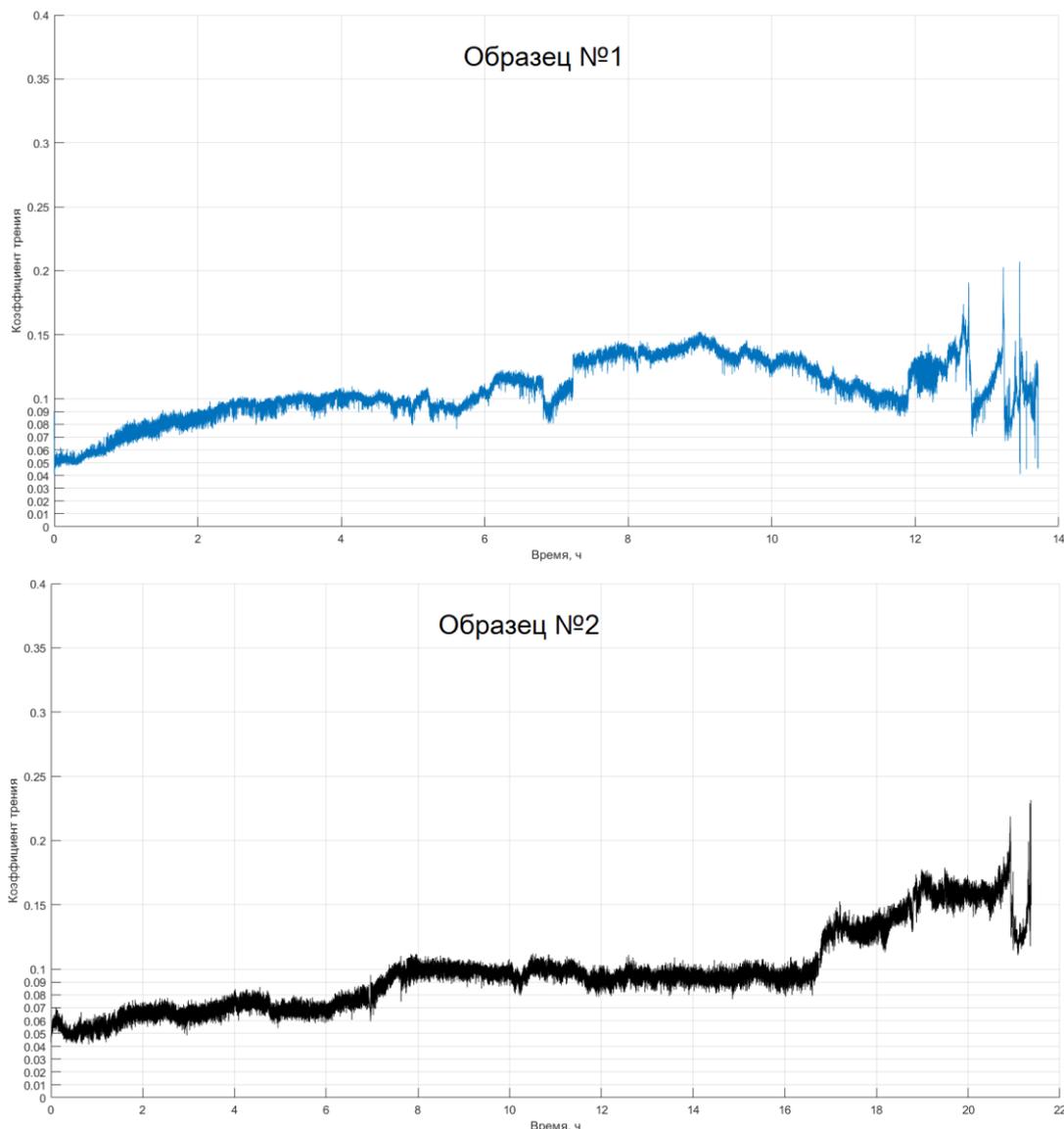
№ образца	Время осаждения, мин	Температура подложки, °С	Ток разряда, А	Напряжение, В	Давление аргона, Па	Толщина покрытия, мкм
1	360	250	0.06	430	5.82×10^{-1}	4.45
2	360	50	0.05	439	7.34×10^{-1}	4.48

Трибологические испытания проводили при нагреве бронзовых образцов с покрытиями до 250 °С. На протяжении испытаний значение температуры находилось в диапазоне 247 - 255 °С. Датчик температуры (Pt100) крепился непосредственно на исследуемой поверхности образца. Давление в камере поддерживалось на уровне ниже 10^{-2} Па. Возвратно-поступательное перемещение столика осуществлялось на частоте 0.5 Гц, средняя скорость линейного перемещения образца относительно контртела – 5 мм/с. В качестве материала контртела выступали стержни из стали 316L с полусферой диаметром 3 мм на конце. Нагрузка на контртело обеспечивала максимальную величину напряжений по Герцу на контакте около 1.04 ГПа (расчетное значение, расчеты проводили по формулам, приведенным в [1]). В расчетах использовали модули упругости материалов для температуры 250 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные образцы с покрытиями испытывали на указанных выше режимах до полного износа, который определяли по росту коэффициента трения до значений, характерных для бронзы без покрытия. После испытаний на дорожках трения была видна бронза. Испытания каждого образца проводили в течение трех рабочих дней (6-8 часов в день – время испытания), с остановками, при этом до следующего испытания образцы оставались в камере, в условиях вакуума. На рисунке 4 приведены сводные графики изменения коэффициента трения MoS₂-покрытий на образцах №№ 1 и 2 на протяжении полного цикла испытаний.

Результаты свидетельствуют о более высоких трибологических характеристиках образца №2 с MoS₂-покрытием, нанесенным без подогрева подложки. На протяжении 7 часов для образца №2 коэффициент трения не превышал значения 0.08, а далее, в течение еще 10 часов его значение составляло около 0.1, время до полного износа – более 20 часов. В отношении образца №1 можно отметить более низкую стабильность трения, коэффициент трения в течение 3-х часов вырос до 0.1, с ростом от 0.1 до 0.15 на участке с 6-го по 12-й час. Ресурс покрытия на образце №1 составил менее 13 часов.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о работоспособности принятых при проектировании стенда решений. Вакуумная система стенда обеспечивает вакуум в камере до 10^{-5} Па. Существующая система нагрева образцов обеспечивает их подогрев до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях вакуума, и это ограничение связано с конструкцией используемых патронных нагревателей малого диаметра (6 мм). При замене нагревателей на более высокотемпературные возможно обеспечить нагрев образцов до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты трибологических исследований образцов с покрытиями свидетельствуют о более высоких характеристиках и ресурсе покрытия №2, нанесенного без подогрева подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peter J. Blau. Friction Science And Technology From Concepts To Applications. - CRC Press, 2008, 420 с.