

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, И. Р. ЦИМБАЛ

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Исследовано влияние регулярного микрорельефа, образованного поверхностями трения с твердопленочным покрытием на основе дисульфида молибдена, на адгезию покрытия к подложке и коэффициент трения и износостойкость пар трения приборов, работающих в вакууме при высокой температуре. Показано, что вибронакатывание поверхностей трения с твердопленочным покрытием при образовании регулярного микрорельефа увеличивает адгезию покрытия к подложке в несколько раз и позволяет контролировать качество покрытия.

*Ключевые слова:* пара трения, регулярный микрорельеф, коэффициент трения, твердопленочное покрытие, адгезия, вакуум, температура.

Постоянная тенденция к совершенствованию техники и расширение круга решаемых ею функциональных задач вынуждают повышать показатели качества исполнительных механизмов приборов и устройств. Особенно это относится к механизмам используемых в особых (нередко в экстремальных) условиях приборов. Одним из важнейших узлов механических устройств являются пары трения, от работы которых в значительной степени зависят основные параметры качества механизма в целом. В условиях высокой температуры и вакуума для снижения коэффициента трения используют твердые смазки, которые наносят на трущиеся поверхности при изготовлении сопрягающихся деталей. При этом необходимо создавать такие поверхности, которые достаточно прочно удерживают

твердосмазочные покрытия и которые должны быть „несущеспособными“, не иметь отдельных иррегулярных выступов малого радиуса, а также их поверхности должны быть технологически воспроизводимыми.

До настоящего времени подготовка поверхностей деталей (работающих в условиях вакуума и высокой температуры) для покрытия (к примеру, покрытия, изготовленного на основе дисульфида молибдена) проводилась шлифованием с их последующей пескоструйной обработкой для создания определенного класса шероховатости [1]. Радиус выступов при этом обычно составлял порядка 10 мкм. Снижение высоты выступов микронеровностей поверхности (уменьшение шероховатости) приводит к отрицательным результатам – уменьшается адгезия покрытия к подложке. Необходимыми эксплуатационными свойствами может обладать только поверхность с регулярным микрорельефом, представляющим собой совокупность регулярных выступов, к примеру, радиусом 4000—10 000 мкм. Для исследования был выбран регулярный микрорельеф сетчатого типа как наиболее легко рассчитываемый и технологически воспроизводимый [2].

Для воспроизведения способа образования регулярного микрорельефа разработано устройство — виброголовка [3], позволяющая получать регулярный микрорельеф с расчетными параметрами. При определении режимов образования регулярного микрорельефа с заданными параметрами использовалась методика, которая описана в работах [4, 5].

Для проверки адгезии покрытия к подложке испытания проводились на вибростенде. Далее по результатам взвешивания образца до и после испытаний определялась величина „сыпаяемости“ покрытия, которая сравнивалась с подобной величиной у образцов, изготовленных по существующей технологии (с нанесением антифрикционного слоя на шлифованную и пескоструйно обработанную поверхность). Испытания показали, что „сыпаяемость“ покрытия у образцов с твердосмазочным покрытием, обладающих регулярным микрорельефом, уменьшилась в 25 раз по сравнению с остальными.

Для исследования влияния регулярного микрорельефа на коэффициент трения и износостойкость проводились фрикционные испытания на специальном стенде [6] при следующих режимах: вакуум —  $10^{-6}$  мм рт.ст., температура в камере стенда —  $+650$  °С, частота вращения шпинделя — 600 об/мин, осевая нагрузка — 0—2 Н, длительность испытаний — 1, 10, 20 часов. В качестве образцов были выбраны втулки с коэффициентом перекрытия 1,0. Контакт втулок по торцам дает самые „жесткие“ условия эксперимента и позволяет наиболее быстро оценить испытываемую пару трения.

С помощью регистрирующих приборов производилась запись момента трения, возникающего при вращении подвижного образца относительно неподвижного. После обработки записанной диаграммы момента трения можно получить зависимость коэффициента трения от времени.

Износ образцов определялся путем их взвешивания с точностью до  $5 \cdot 10^{-5}$  грамма по формуле:  $\Delta = P - P_k$ , где  $P$  и  $P_k$  — вес образца до и после испытаний (в граммах). При испытаниях наблюдался перенос материала с одного образца на другой.

Для сопоставления результатов по износостойкости материала, полученных при использовании различных схем испытаний, определялась такая характеристика, как „путь трения“:

$$L = \pi D n T,$$

где  $D$  — средний диаметр образца,  $n$  — скорость вращения подвижного образца,  $T$  — время испытаний (мин). Для данной установки:  $D = 0,024$  м,  $n = 1000$  об/мин, путь трения при испытаниях в течение одного часа —  $L = \pi \cdot 0,024 \cdot 1000 \cdot 60 = 4524$  м; десяти — 45 238 м; двадцати — 90 475 м.

Образцы в различных сочетаниях испытывали, нанося покрытие в разных вариантах с обработкой вибронакатыванием в два этапа в течение одного часа. На первом этапе испытанный контртелом служил образец без покрытия с поверхностью после шлифовки (с нерегулярной шероховатостью). На втором испытывались образцы с регулярной шероховатостью (вибронакатанные и с покрытием). Анализ результатов испытаний, проводившихся в течение 1 ч, позволил установить, что:

1) образцы с нерегулярным микрорельефом (только шлифованные), в вакууме работать не способны, так как коэффициент трения близок к 1,0;

2) образцы, упрочненные регулярным микрорельефом, способны работать в вакууме и при высокой температуре (коэффициент трения — 0,7—0,8);

3) создание регулярного микрорельефа на поверхности перед нанесением твердосмазочного покрытия обеспечивает оптимальную шероховатость для удержания покрытия, но коэффициент трения остается достаточно высоким — 0,38—0,58;

4) низкие значения коэффициента трения (0,06—0,08) наблюдаются при нанесении твердосмазочного покрытия, изготовленного на основе дисульфида молибдена, на обе рабочие поверхности и вибронакатывании одной из них с созданием регулярного микрорельефа.

По результатам испытаний были отобраны несколько пар, в дальнейшем испытания продолжались в течение 10 ч. За основу была взята пара, показавшая наименьший стабильный коэффициент трения при испытаниях в течение каждого часа (4). Для сравнения испытывались также пары с образцами, где покрытие наносилось на одну или обе трущиеся поверхности образцов после шлифования — поверхности с нерегулярным микрорельефом. Испытания продолжались 10 ч, они показали, что:

— при нанесении твердосмазочного покрытия только на одну из трущихся поверхностей с последующим вибронакатыванием коэффициент трения непрерывно растет и через 7 ч достигает значения 0,7;

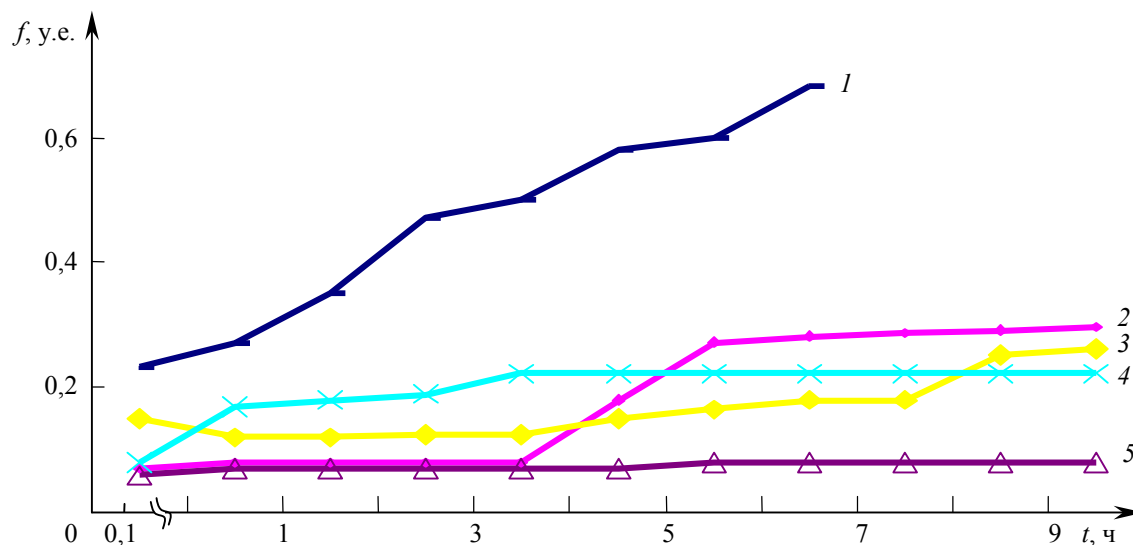
— пленки твердых смазок, изготовленных на основе дисульфида молибдена, обладают хорошими противоизносными и антифрикционными свойствами в течение 4 часов работы (однако по мере увеличения продолжительности испытания вследствие полного истирания покрытия и контакта поверхностей с нерегулярным микрорельефом коэффициент трения увеличивается до 0,28 для одностороннего покрытия и 0,22 — для двустороннего);

— создание регулярного микрорельефа хотя бы на одной из трущихся поверхностей с твердосмазочным покрытием обеспечивает низкий (0,06—0,08) коэффициент трения.

Для подтверждения факта повышения износостойкости твердосмазочного покрытия при регуляризации поверхности трения были проведены натурные испытания. Использовались подшипниковые цилиндрические и сферические втулки, изготовленные из материала ЭИ-828 и покрытые твердопленочной смазкой на основе дисульфида молибдена (ВНИИ НП-229). Одну из контактирующих поверхностей пары трения подвергали вибронакатыванию для создания на ней регулярного микрорельефа. Испытания подтвердили факт повышения износостойкости — запланированный ресурс был превышен в шесть раз.

Рассмотренный и исследованный в настоящей работе подход к обеспечению эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях, позволил создать пару трения с прочным покрытием, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Изготовленные по вышеизложенному способу около 100 подшипников скольжения проработали свыше 1000 часов в вакууме при высокой температуре и ни в одном случае не показали отслоения покрытия, а износостойкость возросла в шесть раз.

В качестве иллюстрации на рисунке приводятся экспериментальные зависимости влияния регулярности микрорельефа поверхности трения на износостойкость ( $f$  — коэффициент трения).



Здесь кривые соответствуют следующим парам трения: 1 — образец после шлифовки—образец с покрытием вибронакатанный, 2 — образец после шлифовки—образец с покрытием, 3 — образец с покрытием—образец с покрытием, 4 — образец после вибронакатывания—образец с покрытием, 5 — образец с покрытием—образец с покрытием вибронакатанный.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В. и др. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 321 с.
3. А.с. № 1220243 СССР, МКИ В 24 В 39/04. Устройство для нанесения регулярного микрорельефа / И. Р. Цимбал, И. Н. Дмитриева, Ю. Г. Шнейдер. Заявл. 02.04.84, опубл. 29.02.88.
4. Кузьмин Ю. П. Разработка и исследование аппаратуры для контроля микрогеометрии поверхностей с регулярным микрорельефом. Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982.
5. Шнейдер Ю. Г. Холодная бесштамповая обработка металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1967. 270 с.
6. А.с. № 1021993 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Машина трения / И. Р. Цимбал, Л. А. Чатынян, Т. А. Соловьева. Заявл. 04.11.81, опубл. 07.06.83.

#### Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения
- Игорь Романович Цимбал** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ведущий инженер-технолог

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.