

*Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 4, стр. 268 – 272*

*20 августа 1974 г.*

**ЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ  
ПРИ ЭЛЕКТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ  
ТРУЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА**

*Е.А.Духовской, А.Н.Пономарев, А.А.Силин, В.Л.Тальрозе*

В статье проводятся экспериментальные данные о получении эффекта аномально низкого трения при воздействии электронного облучения на трущуюся поверхность дисульфида молибдена. Указано на тождественность эффекта и его механизма при бомбардировке дисульфида молибдена электронами и ускоренными атомами гелия.

Ранее авторами было обнаружено явление аномально низкого трения при бомбардировке трущихся поверхностей полиэтилена, дисульфида

молибдена и графита пучком атомов гелия с энергией  $2 \text{ кэВ}$  [1, 2]. В настоящее время нами были предприняты попытки реализовать это явление при облучении в вакууме поверхности  $\text{MoS}_2$  электронным пучком

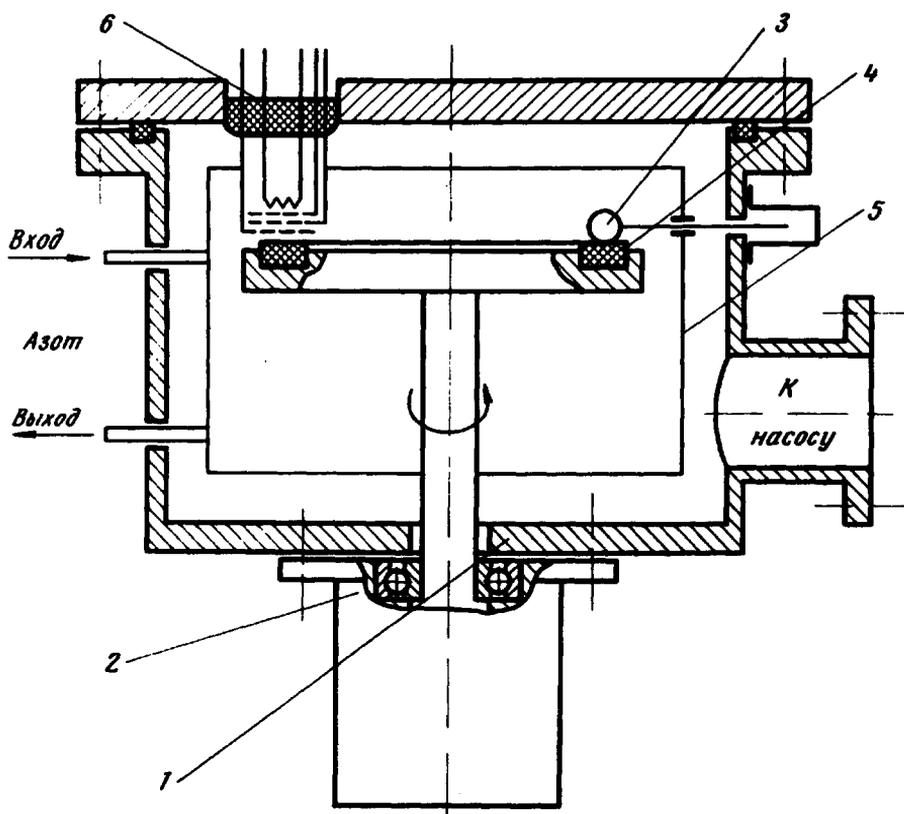


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – магнитная муфта, 3 – индентор с измерительной аппаратурой, 4 – испытуемый образец, 5 – азотный экран, 6 – электронная пушка

с энергией  $2 \text{ кэВ}$ . Схема установки представлена на рис. 1. Она состоит из стальной вакуумной камеры с помещенным внутри узлом трения – неподвижным шариковым индентором из стали ШХ-15 и вращающимся в металлической оправке испытуемым диском. Нагрузка и сила трения измерялись тензодатчиками по стандартной схеме [3]. Вращение диска в вакууме осуществлялось с помощью магнитной муфты. Опыты проводились при температуре узла трения  $20^\circ \text{C}$ , нагрузке на индентор диаметром  $0,5 \text{ см}$  в интервале от  $50$  до  $150 \text{ гс}$  и скорости скольжения  $20 \text{ см/сек}$ . Исследуемые диски изготавливались из материала М-801, который получался по следующей технологии: кольцевой диск из металлического молибдена наружным диаметром  $55 \text{ мм}$ , внутренним –  $40 \text{ мм}$  и толщиной  $5 \text{ мм}$  выдерживался в парах серы при температуре  $600^\circ \text{C}$ , в результате чего на поверхности металла образовывался слой дисульфида молибдена толщиной до  $10 \text{ мкм}$ . Такая технология была выбрана с целью получения на поверхности достаточно чистого дисульфида молибдена.

Узел трения был окружен медным экраном, охлаждаемым жидким азотом.

Электронная пушка, состоящая из нагреваемого катода, вытягивающей и ускоряющей сеток и коллектора вторичных электронов, обеспечивала пучок диаметром 10 мм с энергией 2 кэв и током до 1 ма. Облучению подвергался участок трущейся поверхности диска, отстоящий по дорожке трения на 180° от индентора. Глубину пробега электронов в материале оценивали по формуле [4]:  $h = 250 (M/\rho) (E/Z^{1/2})^n$ , (1) где  $M$  – молекулярный вес облучаемого вещества;  $\rho$  – плотность;  $E$  – энергия электронов в кэв;  $Z$  – порядковый номер элемента

$$n = \frac{1,2}{1 - 0,29 \lg Z} \quad (2)$$

Для сложных веществ, в частности  $MoS_2$ , в формулу (1) вместо  $Z$  и  $M$  подставляются соответственно суммы порядковых номеров и атомных весов отдельных элементов.

Пробег электронов с энергией 2 кэв в дисульфиде молибдена, оцененный по этой формуле, составляет около 2000 Å. Мощность дозы, усредненная по толщине облучаемого слоя, может быть оценена по уравнению:

$$I = \frac{1000 i E}{h \rho} \quad (e \cdot z),$$

где  $E$  – энергия электронного пучка (кэв);  $i$  – плотность тока ( $a/cm^2$ ),  $h$  – глубина пробега в см,  $\rho$  – плотность [ $e/cm^3$ ].

Поскольку при вращении диска непосредственно облучает лишь часть поверхности, то усредненная по времени мощность дозы  $I'$  составляет:  $I' = I (d/\pi D)$ , где  $d$  – диаметр электронного пучка;  $D$  – диаметр дорожки трения.

В экспериментах в процессе трения измерялась температура индентора с помощью термопары, один из спаев которой был размещен внутри индентора на расстоянии 0,3 мм от поверхности трения. При обычном трении наблюдался небольшой разогрев индентора в пределах 5° С. При возникновении аномально низкого трения такой разогрев исчезал полностью. При средней мощности электронного пучка около 1  $вт/cm^2$  типичной теплопроводности металлического диска и очень малой толщине слоя дисульфида молибдена ( $10^{-3}$  см) даже с довольно низкой теплопроводностью ( $\lambda \geq 3 \cdot 10^{-4}$  кал/см · град С [5]) разогрев поверхностного слоя за счет облучения весьма незначителен и не превышает 1° С.

Эксперимент состоял в следующем. Испытуемые диски протирались спиртом и устанавливались в камеру, которая откачивалась до  $5 \cdot 10^{-7}$  тор. Медный экран охлаждался жидким азотом до температуры около 80° К. После этого включался двигатель, создавалась нагрузка на индентор и осуществлялась приработка индентора и вращающегося диска до получения стабильного коэффициента трения. Затем включалась электронная пушка и проводилось облучение поверхности вращающегося диска пучком электронов. При этом регистрировалась величина коэффициента трения в зависимости от тока и времени облучения. Результаты одного из типичных экспериментов приведены на рис. 2. При нагрузке на индентор 100  $гс$  после приработки трущихся поверхностей

стабильный коэффициент трения в вакууме находился в пределах 0,04 – 0,05. После включения электронной пушки (ток пучка 500 мкА, диаметр сечения пучка 1 см, энергия 2 кэВ, что соответствует мощности дозы  $5 \cdot 10^4$  вт/г или  $5 \cdot 10^9$  рад/сек) происходило падение коэффициента трения до аномально низкой величины ниже 0,002, что является пределом чувствительности установки. После выключения электронного пучка в процессе трения коэффициент трения медленно (за времена 10 – 15 мин, а в отдельных экспериментах еще медленнее) возрастал до величины 0,03. Соединение камеры с окружающим воздухом после получения эффекта аномально низкого трения приводило к практически мгновенному скачку коэффициента трения до значений 0,05 – 0,06.

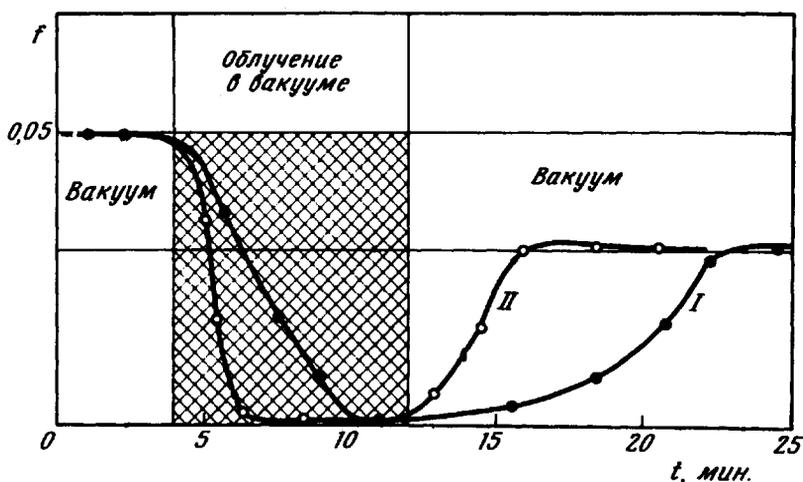


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в процессе облучения поверхности трения дисульфида молибдена электронами (1) и быстрыми атомами гелия (2)

Для сравнения на рис. 2 приведена одна из кривых изменений во времени коэффициента трения, полученная ранее при облучении поверхности трения дисульфида молибдена пучком атомов гелия приблизительно при той же мощности дозы, что и в случае электронного пучка.

Совпадение характера явления аномально низкого трения при облучении электронами и быстрыми атомами свидетельствует об универсальности эффекта.

Механизм возникновения сверхнизкого трения пока не вполне ясен (что отчасти связано с неясностью детального микроскопического механизма внешнего трения для реальных твердых тел вообще). Однако, проведенные нами в последнее время электронографические исследования поверхности  $\text{MoS}_2$  после достижения сверхнизкого трения указывают на сильную ориентацию кристаллов  $\text{MoS}_2$ , а масс-спектральное наблюдение за парциальным давлением воды в ходе описанного облучения показало, что последнее ведет к удалению гидроксилсодержащих групп с поверхности. В целом это свидетельствует о том, что по крайней ме-

ре адгезионная составляющая взаимодействия, обуславливающая внешнее трение, может существенно ослабляться в ходе обработки поверхности, ведущей к сверхнизкому трению.

Институт химической физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
27 апреля 1974 г.

После переработки  
15 июля 1974 г.

### Литература

- [ 1 ] Е.А.Духовской, В.С.Онищенко, А.Н.Пономарев, А.А.Силин, В.Л.Тальрозе. ДАН СССР, 189, № 6, 1969.
  - [ 2 ] Е.А.Духовской, А.Н.Пономарев, А.А.Силин, В.Л.Тальрозе. ДАН СССР, 200, № 1, 1972.
  - [ 3 ] Н.П.Раевский. "Методы экспериментального исследования механических параметров машин". Изд. АН СССР, 1952.
  - [ 4 ] Ch.Feldman. Phys. Rev., 117, 2, 455, 1960.
  - [ 5 ] В.Э.Вайнштейн, Г.И.Трояновская. "Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы". М., изд. Машиностроения, 1968.
-