

В. И. АПАРИН, Е. А. ДУХОВСКОЙ, А. Н. ПОНОМАРЕВ, А. А. СИЛИН
член-корреспондент АН СССР В. Л. ТАЛЪРОЗЕ

**О СУЩЕСТВЕННОМ УСИЛЕНИИ ОРИЕНТАЦИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ, ПРИВОДЯЩЕМ К СВЕРХНИЗКОМУ
ТРЕНИЮ ЕГО В ПАРЕ С МЕТАЛЛОМ**

В работе ⁽¹⁾ высказывалось предположение, что сверхнизкое трение ряда полимеров (дисульфида молибдена, полиэтилена и др.) в паре с металлом, достигаемое бомбардированием поверхности полимера быстрыми частицами, должно коррелировать с существенным «залечиванием» поверхностных микродефектов. Следствием подобного исчезновения дефектов должна быть значительно более сильная по сравнению с обычно наблюдаемой при трении ⁽²⁾ ориентация кристаллитов весьма тонкого (порядка сотен Å) поверхностного слоя вещества по базовым плоскостям в процессе сверхнизкого трения.

Проверка указанного предположения проводилась на дисульфиде молибдена, имеющем ярко выраженную слоистую структуру и отличающемся сильным смазочным действием. Исследования проводились путем снятия электронограмм с образцов MoS₂, подвергнутых трению в различных условиях. Слой MoS₂ толщиной 20–60 мкм синтезировался по специальной технологии на чистом молибдене, помещаемом в пары серы. Выбранная технология позволяла получить дисульфид молибдена, обладающий повышенной способностью к реализации сверхнизкого трения при бомбардировке ускоренными атомами гелия. Для опытов были использованы образцы MoS₂, подвергнутые трению при различных условиях: на воздухе, в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ тор при обычном трении и в вакууме $5 \cdot 10^{-4}$ тор при сверхнизком трении при бомбардировке поверхности трения пучком атомов гелия. Режим трения в остальном во всех случаях был одинаковым: нагрузка на стальной шарик диаметром 0,5 см составляла 200 г, скорость скольжения 0,25 см/сек, температура образца — в пределах 20–25° С. Продолжительность скольжения шарика по дорожке из MoS₂ диаметром 0,5 см составляла 2 часа. Трение осуществлялось на установке «ТВО-3» ⁽¹⁾. Для получения сверхнизкого трения использовался поток нейтральных атомов гелия интенсивностью $2 \cdot 10^{14}$ атом/см²·сек, ускоренных до энергии 2 кэВ. Электронограммы снимались на просвет на электронном микроскопе УЭМВ-100к, работающем в режиме электронографа при ускоряющем напряжении 75 кэВ по стандартной методике, с микроучастков поверхности трения, извлеченных в реплику.

На рис. 1а приведена электронограмма синтезированного поликристаллического MoS₂, не подвергавшегося трению. Видно, что она представляет собой набор колец, характеризующих дифракцию электронов на всех возможных плоскостях кристаллической решетки. Таким образом, в данном случае, как и следовало ожидать, наблюдается хаотическое распределение кристаллитов в поверхностном слое.

При трении MoS₂ на воздухе происходит его окисление и связанный с ним существенный износ поверхности трения, сопровождающийся дроблением кристаллитов ⁽³⁾. В результате наблюдается резкое ослабление интенсивности и даже исчезновение дифракционных колец, свидетельствующее

щие о разрушении поверхностного слоя (рис. 1б), что подтверждается постоянством дифракционной картины при изменении угла съемки в пределах от 0 до 40°. Отметим, однако, что все линии на рис. 1б идентифицируются как принадлежащие MoS_2 . При обычном трении в вакууме (рис. 1в) наблюдается лишь слабо выраженная текстура с осью [0001] со значительной угловой шириной дужек.

Это свидетельствует о том, что базисная плоскость (0001) кристаллитов MoS_2 лишь примерно совпадает с плоскостью скольжения. Приведенная электронограмма аналогична полученной

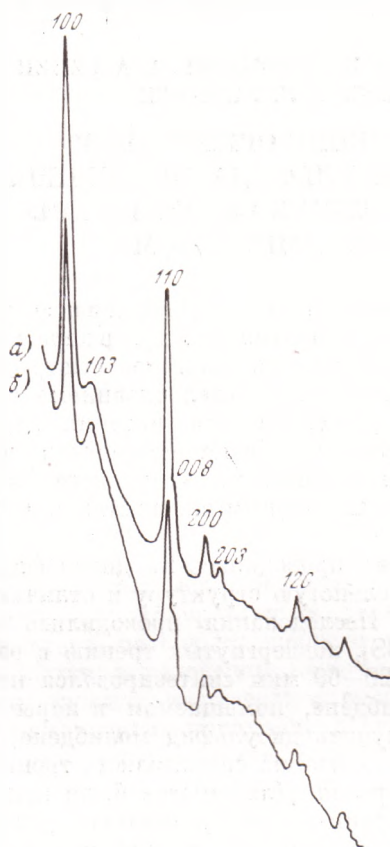


Рис. 2

Рис. 2. Микрофотограммы с электрограмм MoS_2 , снятые в направлении нулевой слоевой линии: а — сверхнизкое трение; б — обычное трение в вакууме

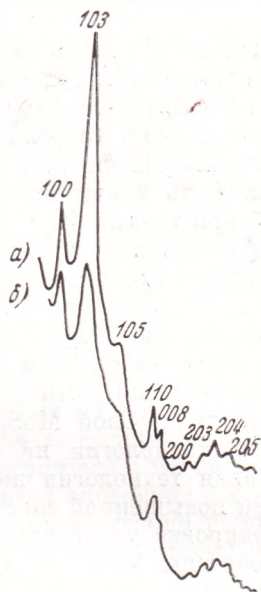


Рис. 3

Рис. 3. Микрофотограммы с электрограмм MoS_2 , снятые перпендикулярно нулевой слоевой линии: а — сверхнизкое трение; б — обычное трение в вакууме

для примерно тех же условий трения Боуденом на природном молибдените (4). Можно предположить, что далеко неполная ориентация кристаллитов при трении в вакууме обусловлена динамическим равновесием между тенденцией к сглаживанию поверхности и упорядоченному расположению кристаллитов при скользящем контакте и противоположной тенденцией к дезориентации и образованию микротрещин в результате разрыва более или менее сильных адгезионных связей на дефектах решетки.

На заключительном рис. 1г представлена полученная авторами электронограмма в условиях, соответствующих сверхнизкому трению MoS_2 . В этом случае на электронограмме значительно более ярко и резко и с меньшей угловой шириной выражены дужки текстуры. Это свидетельствует о том, что тенденция к ориентации базисных плоскостей (0001) кристаллитов вдоль плоскости скольжения при сверхнизком трении существ-

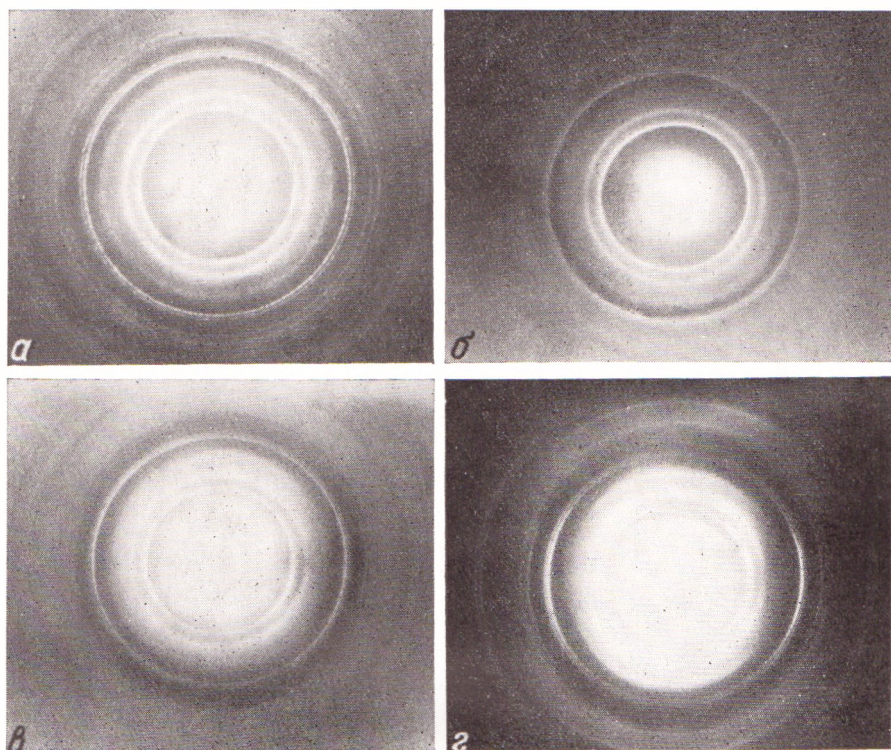


Рис. 1. Электронограммы синтетического MoS₂. *a* — после изготовления, *b* — после трения на воздухе, *c* — после обычного трения в вакууме, *d* — после сверхнизкого трения в вакууме, $\varphi=40^\circ$

вешно усиливается. Микрофотограммы (рис. 2 и 3) двух последних электронограмм (рис. 1в, г), полученные на микрофотометре ИФО-451, более наглядно демонстрируют различие в степени ориентации кристаллитов MoS_2 . Расположение дужек текстуры на дебаевских кольцах малой интенсивности, по-видимому, является следствием того, что поверхность трения существенно гетерогенна. Это обусловлено тем, что непосредственное участие в трении принимает лишь часть поверхности, состоящая из отдельных островков — пятен фактического контакта размером порядка единиц и десятков микрон. Именно на этих пятнах и возникает, по-видимому, сильная ориентация, обусловленная совместным радиационно-механическим

Таблица 1

Результаты индирования электронограммы синтетического MoS_2

| № кольца | Интенсивность | D, мм | $d_{HKL}, \text{Å}$ | | HKL | № кольца | Интенсивность | D, мм | $d_{HKL}, \text{Å}$ | | HKL |
|----------|---------------|-------|---------------------|-------|-------|----------|---------------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | | расчет | теор. | | | | | расчет | теор. | |
| 1 | с. | 18,2 | 2,720 | 2,737 | (100) | 7 * | сл. | 38,1 | 1,300 | 1,298 | (203) |
| 2 | о.с. | 21,8 | 2,270 | 2,277 | (103) | 8 | сл. | 39,5 | 1,253 | 1,251 | (204) |
| 3 | ср. | 27,0 | 1,833 | 1,830 | (105) | 9 | о.сл. | 41,2 | 1,201 | 1,196 | (205) |
| 4 | ср. | 31,3 | 1,581 | 1,581 | (110) | 10 | о.сл. | 44,8 | 1,105 | 1,102 | (118) |
| 5 | ср. | 32,1 | 1,542 | 1,538 | (008) | 11 | о.сл. | 47,8 | 1,035 | 1,034 | (120) |
| 6 | сл. | 36,0 | 1,375 | 1,368 | (200) | 12 | о.сл. | 49,4 | 1,002 | 1,003 | |

* Рис. 1а.

действием. Остальная часть поверхности не участвует в трении, т. е. не подвергается механическому воздействию. Поэтому ориентации на ней не происходит. Приведенные электронограммы относятся к участкам поверхности размером $0,5 \times 0,5$ мм, что существенно больше размеров пятен фактического контакта. Поэтому они соответствуют лишь некоторому усредненному состоянию поверхности.

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют заключить, что ориентация в поверхностном слое MoS_2 действительно становится значительно более полной при комбинированном радиационно-механическом воздействии, вызывающем эффект сверхнизкого трения.

Раскрытие элементарных радиационно-химических и механохимических процессов, ведущих к рассмотренному эффекту улучшения структуры слоя, является задачей дальнейших исследований.

Авторы благодарят доктора химических наук Л. А. Атовмяна за полезные дискуссии.

Поступило
25 III 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. А. Дуговой, А. Н. Пономарев и др., ДАН, т. 200, № 1 (1971). ² В. Л. Калижан, Я. С. Уманский, УФН, т. 108, в. 3 (1972). ³ Е. Р. Брейтуэйт, Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия, М., 1967. ⁴ Ф. Боуден, Д. Гейбор, Трение и смазка твердых тел, М., 1968.