

УДК 621.891+541.15

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Е. А. ДУХОВСКОЙ, А. Н. ПОНОМАРЕВ, А. А. СИЛИН,

член-корреспондент АН СССР В. Л. ТАЛЬРОЗЕ

ЯВЛЕНИЕ СВЕРХНИЗКОГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ,
ВЫЗВАННОЕ ИНТЕНСИВНЫМ РАДИАЦИОННЫМ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Ранее (^{1, 2}) было показано, что после предварительного облучения ряда органических полимеров быстрыми электронами и γ -лучами до доз порядка $5 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{11}$ эрг/г коэффициент трения f их существенно возрастает. При одновременном с трением облучении до тех же доз политетрафторэтилена (ПТФЭ) пучком быстрых электронов также наблюдается резкое увеличение f (³). При бомбардировке поверхности материала на основе дисульфида молибдена (MoS_2) небольшими потоками ускоренных до 5 кэВ ионов водорода был получен намек на незначительное снижение величины f этого материала. После прекращения облучения исходное значение f не возобновлялось * (⁴). Однако недавно авторами настоящей работы было обнаружено (⁵), что при бомбардировке значительно большими потоками ускоренных атомов гелия и некоторых других элементов поверхности полиэтилена (ПЭ), трущегося в вакууме о металлическое контртело, наблюдается снижение коэффициента трения до величины 0,0015, которая является пределом чувствительности установки. После прекращения бомбардировки в течение 350—500 сек. исходное значение f восстанавливается.

Контрольные опыты, в которых эффект сохранялся несмотря на то, что на пути пучка устанавливалась находящаяся под положительным потенциалом сетка (⁵), а облучаемая поверхность образца находилась в контакте с заземленными медными щетками, позволили установить, что наблюдаемое явление не связано с накоплением статического электричества (к аналогичному выводу приводит описываемое нами ниже получение эффекта на графите, обладающем существенной электропроводностью).

В работе, результатам которой посвящено настоящее сообщение, авторами было предпринято более детальное исследование обнаруженного эффекта на других материалах, существенно отличающихся своими свойствами. Воздействие осуществлялось потоком полученных резонансной перезарядкой атомов гелия плотностью порядка 10^{13} атомов / ($\text{см}^2 \cdot \text{сек}$) с энергией 2 кэВ. Опыты проводились при комнатной температуре, нагрузках N на индентор диаметром $d = 0,5$ см в интервале от 50 до 150 Г и скорости скольжения $v = 20$ см/сек. Разрежение в камере было в пределах от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ тор. Появление аномально низкого трения наблюдалось на полипропилене (ПП), дисульфиде молибдена и графите и не было обнаружено на полистироле и политетрафторэтилене.

Слой MoS_2 толщиной 30—40 м предварительно синтезировался на поверхности молибденового образца. Идентификация вещества поверхностного слоя методом рентгеноструктурного анализа подтвердила наличие MoS_2 .

* Авторы (⁴) пишут: «у образца из самосмазывающегося материала, работающего в паре со сталью 2Х13, коэффициент трения при переходе от воздуха к вакууму резко падает, а от облучения полами с энергией до 5 кэВ меняется незначительно (несколько уменьшается). Модуляция ионного пучка также не позволила выявить воздействие данного вида облучения на испытание пары трения».

с ромбоидальной структурой. Графитовые образцы были изготовлены из материала марки АГ-1500.

Кинетика эффекта на ПП и MoS_2 (рис. 1) была, в общем, аналогична наблюдавшейся ранее на ПЭ. Эффект наблюдался многократно, устойчиво сохранялся во время облучения и сразу исчезал полностью (ПП) или частично (MoS_2) при напуске в камеру воздуха. Отличие для MoS_2 заключалось в том, что получение эффекта не требовало длительной приработки, как у органических полимеров. При этом отсутствовал характерный для последних пик трения, наблюдаемый сразу после начала бомбардировки

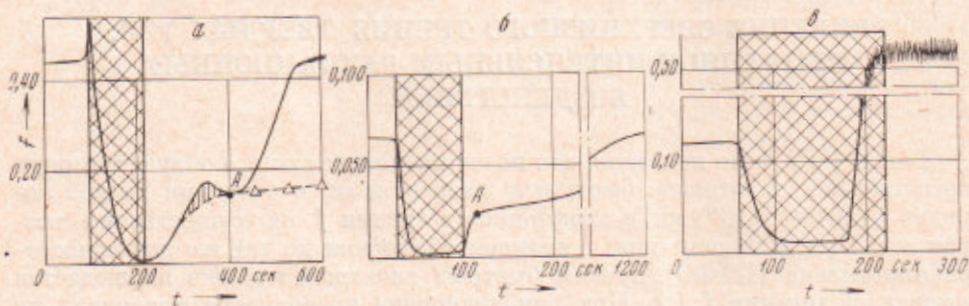


Рис. 1. Сверхнизкое трение при бомбардировке ускоренными атомами гелия полипропилена (а), дисульфида молибдена (б) и графита (в). Заштрихованная область соответствует времени бомбардировки, пунктир — спонтанному восстановлению величины трения в вакууме. $v = 20$ см/сек; $N = 100$ Г (а, в), 50 Г (б); $\theta = 20^\circ$ С (а), 25° (б), 22° (в)

(рис. 1а), наконец, период восстановления трения был существенно большим, чем у органических полимеров.

У графита (рис. 1в), как и у MoS_2 , получение эффекта не требовало предварительной приработки и происходило без начального пика. Однако в отличие от других материалов, трение сохранялось на аномально низком уровне лишь в течение 40–60 сек., после чего резко возрастало, хотя облучение продолжалось. Вторичное появление эффекта наблюдалось лишь после того, как графитовый образец переносился в обычные атмосферные условия, выдерживался в них в течение 10–20 мин., а затем снова возвращался в вакуумную испытательную установку.

Восстановление значения f в вакууме до исходной величины после прекращения облучения у ПП, ПЭ и MoS_2 протекало в два этапа. Первый из них, идущий примерно до точки А (рис. 1а) и характеризующийся временем τ , может происходить спонтанно, т. е. в условиях, когда движение образца относительно индентора остановлено. При этом величина τ падает с ростом давления в вакуумной камере и повышением температуры образца. Второй этап, соответствующий росту f от точки А до исходной величины, наблюдается лишь при трении. Длительность этого этапа падает с ростом нагрузки и увеличением скорости скольжения. Было установлено также, что время падения трения до аномально низкой величины, исчисляемое с момента включения источника, уменьшается до некоторого предела по мере роста мощности дозы облучения.

По предварительным данным изнашивание образцов в режиме сверхнизкого трения весьма мало, по крайней мере, на два порядка ниже, чем при обычном трении, а его интенсивность слабо зависит от режима нагружения. Наблюдения, выполненные на оптическом и электронном микроскопах, позволили установить, что переход от обычного трения к сверхнизкому сопровождается существенным уменьшением степени шероховатости дорожек трения.

Естественно, возникает вопрос о природе обнаруженного эффекта. В нашей публикации⁽⁵⁾ мы предположили, что указанный эффект может быть обусловлен сильным неравновесным насыщением поверхностного

слоя полиэтилена газом в результате внедрения бомбардирующих частиц, а также их воздействия на полимер. Следствием подобного насыщения может быть диффузия газа с созданием в зоне фрикционного контакта эффекта «аэростатической подушки». Необходимое для этого количество газа может быть оценено из выражения

$$q = nphv / b, \quad (1)$$

где n — число Лoshмидта; p — давление в подушке; h — толщина газового слоя; v — скорость скольжения и b — диаметр зоны контакта.

При нагрузке на полиэтиленовый образец $N = 100$ Г $p = 150$ атм и $b = 0,02$ см. Приняв $h = 10^{-6}$ см, $v = 20$ см/сек и учитывая, что $n = 2,7 \cdot 10^{19}$ молекул/см³·атм, получим согласно (1) $q = 4 \cdot 10^{18}$ молекул/см²·сек. Количество образовывавшегося при бомбардировке полиэтилена водорода, определенное прямыми масс-спектрометрическими измерениями в ходе опыта, не превышало $2,5 \cdot 10^{15}$ молекул/см²·сек, что, таким образом, исключало эффект газовой подушки.

При бомбардировке органических полимеров быстрыми атомами гелия могли образовываться жидкие продукты деструкции или пластифицированный ими или газовыми продуктами слой, способный обладать смазочным действием, характерным для чисто жидкостного трения. Для проверки указанного предположения были проведены контрольные опыты, в которых поверхность полимера покрывалась тонким слоем различных жидких смазок. В условиях, аналогичных описанным выше, значения f (табл. 1) существенно превышали аномально низкие величины f , полученные в процессе облучения, что опровергало объяснение эффекта, основанное на допущении жидкостного трения.

Обнаружение аномально низкого трения на веществах весьма различной химической природы и состава исключает объяснение его образованием каких-то специфических химических продуктов, и механизм его должен быть связан с некоторыми общими физическими особенностями самого процесса трения. Авторы находят сейчас объяснение эффекту исходя из следующих предположений:

1) обычно наблюдаемые после приработки значения коэффициентов сухого трения обусловлены неупругими потерями в ходе трения на неоднородностях — дислокациях и микротрещинах;

2) названные неоднородности являются ловушками «дырок», электронов и свободных валентностей, образующихся при облучении. В результате рекомбинация зарядов и свободных радикалов происходит по преимуществу в таких неоднородностях, где, следовательно, и выделяется значительная доля получаемой веществом энергии и образуется заметная доля новых химических веществ и связей. (О стремлении свободных валентностей собираться в некоторых областях в облучаемом твердом теле см., например, в (6).);

3) эти процессы способны «залечивать» неоднородности, снимать локальные напряжения. Приработке остается после этого лишь убрать более крупномасштабную шероховатость;

4) повышение f после прекращения облучения связано с обратным «прорастанием» микротрещин и дислокаций через облученный слой, имеющий толщину всего 10^3 Å.

Естественно, что названное «залечивание» дефектов, «отжиг», может происходить при достаточной скорости образования активных частиц в

Таблица 1

Значения коэффициентов трения в контрольных опытах ($N = 100$ Г; $v = 20$ см/сек; $\theta = 20^\circ$ C)

Материал	Масло		
	веретенное	авиационное	вазелиновое
ПТФЭ	0,025	0,032	0,05
ПЭ	0,04	0,10	0,09

облучаемом слое; поэтому эффект и был обнаружен на короткопробежных частицах и проявляется тем быстрее, чем больше поток быстрых частиц.

Из приведенного объяснения понятно, что для веществ, особенно радиационно стойких, как например, полистирол, эффекта при использованных потоках частиц может еще не наблюдаться. Наличие эффекта в случае графита может быть объяснено тем, что графит, содержащий в поверхностном слое воду и, вероятно, кислород, под воздействием облучения еще, по-видимому, способен к превращениям со значительным радиационным выходом, однако после очистки поверхностного слоя под облучением эффект, как было отмечено, через короткое время исчезает. Другими словами, чистый графит, известный своей радиационной стойкостью, эффекта не дает.

С другой стороны, если вещество особенно нестойко к радиационным воздействиям, как например, тефлон, эффект опять-таки может отсутствовать, но уже потому, что образование новых дефектов обгоняет заживление старых.

С развитой точки зрения эффект должен быть преимущественно свойствен веществам с умеренной радиационной стойкостью.

Изложенные здесь наброски механизма аномально низкого трения под облучением, как можно видеть, качественно объясняют как значительную общность эффекта, так и уже найденные исключения, однако приведенная концепция требует большей экспериментальной проверки.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
оптико-физических измерений

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
19 IV 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ K. McLure, D. Tabor, *Wear*, 8, 3 (1965). ² K. Matsubara, M. Watanabe, *Wear*, 10, 214 (1967). ³ Е. А. Духовской, И. В. Крагельский, А. А. Силин, *ДАН*, 175, № 3 (1967). ⁴ А. И. Акишин, Г. И. Троиновская и др., *Сборн. Теории трения и износа*, «Наука», 1965, стр. 285. ⁵ Е. А. Духовской и др., *ДАН*, 189, № 6 (1969). ⁶ В. А. Толкачев, *Хим. высоких энергий*, 4, № 4 (1970).