

02;05;12

## **Влияние фуллерена C<sub>60</sub> на изнашивание металлов при фреттинге**

© Б.М. Гинзбург, В.А. Красный, Ю.П. Козырев, В.П. Булатов

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 19 марта 1997 г.

Трибологическими методами показана перспективность применения C<sub>60</sub> в качестве присадок к смазочным маслам, а также в качестве покрытий в условиях фреттинга.

Открытие фуллеренов [1] привело к развитию их исследований в различных аспектах. Однако сведения о трибологических свойствах фуллеренов весьма немногочисленны и касаются главным образом фуллерена C<sub>60</sub>. Опубликовано несколько работ, где фуллерен C<sub>60</sub> исследовался в виде твердой пленки в качестве твердосмазочного покрытия [2,3], а также в виде присадок к жидким смазочным материалам [4].

В ряде патентов сообщается, что различные модифицированные фуллерены могут использоваться в качестве антифрикционных покрытий, твердых смазок и присадок к смазочным маслам [5–11].

Особую форму разрушения твердых тел при трении скольжения представляет собой изнашивание при фреттинге [12]. Фреттинг характерен для номинально неподвижных сочленений конструкций (например, в местах скрепления деталей и т.п.) и возникает, как правило, при вибрациях, приводящих к различного рода колебательным относительным перемещениям контактирующих тел. Часто фреттинг сопровождается химическими процессами на поверхностях трения (фреттинг-коррозия) [13,14]. Характерной особенностью фреттинга, в отличие от других видов трения скольжения, является малая амплитуда относитель-

ных смещений контртел, сопоставимая с расстоянием между вершинами микронеровностей на поверхности трения, что затрудняет удаление продуктов износа из зоны контакта. Продукты износа при этом начинают играть роль абразива, что приводит к дополнительному изнашиванию. Циклический характер фреттинга в ряде случаев приводит к снижению усталостной прочности контртел, вызывая развитие усталостных повреждений. Таким образом, механизм фреттинг-износа многообразен, а их комбинации в реальных условиях приводят к трудностям изучения и выбора средств "антифреттинговой" защиты.

В данной работе излагаются первые результаты феноменологических исследований фуллерена  $C_{60}$  в качестве материала, препятствующего фреттинг-износу при трении скольжения.

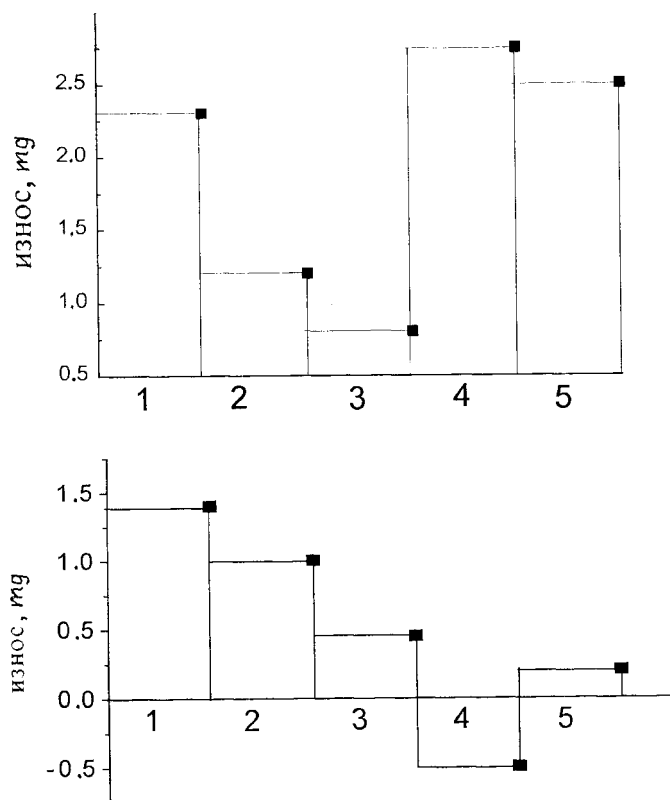
Фуллерен  $C_{60}$  (с содержанием 96–98%) был получен в лаборатории проф. В.П. Будтова (проект "Хромотрон" Российской научно-технической программы "Фуллерены и атомные кластеры").

Испытания образцов на фреттинг-износ проводились по методике, соответствующей ГОСТ 23.211-80 [14] на специальной установке "ФК", работающей на приводе стандартной машины трения СМЦ-2. Неодвижное контртело-образец представляет собой диск диаметром 35 мм и толщиной 7.5 мм. Подвижное контртело — полый цилиндр с внешним и внутренним диаметрами соответственно 25 и 20 мм, который своей торцевой (кольцевой) поверхностью контактирует с плоской поверхностью образца. Цилиндр совершает возвратно-вращательные колебания вокруг собственной оси. Вдоль оси к нему прикладываются различные нагрузки, создающие нормальное давление на контакте. В данной работе были приняты следующие условия испытаний: амплитуда — 150  $\mu\text{m}$ ; частота — 500  $\text{min}^{-1}$ ; нормальное давление при испытаниях со смазками — 4.2 МПа, без смазки — 3.2 МПа; длительность испытания каждого образца составляла 250 000 циклов. Испытывалось не менее трех однотипных образцов при одинаковых условиях испытаний.

Проведена серия испытаний образцов из стали Ст20 и латуни ЛАЖ-60 с контробразцами из Ст20 с применением жидкой и консистентной смазки с добавками  $C_{60}$ , а также проведены предварительные испытания покрытия из  $C_{60}$ <sup>1</sup>. Износ образцов и контр-образцов определялся взвешиванием с точностью 0.1 мг до и после испытания.

В качестве смазок использовались промышленное масло И-40А и консистентная смазка Литол-24.  $C_{60}$  вводился в смазки в виде порошка

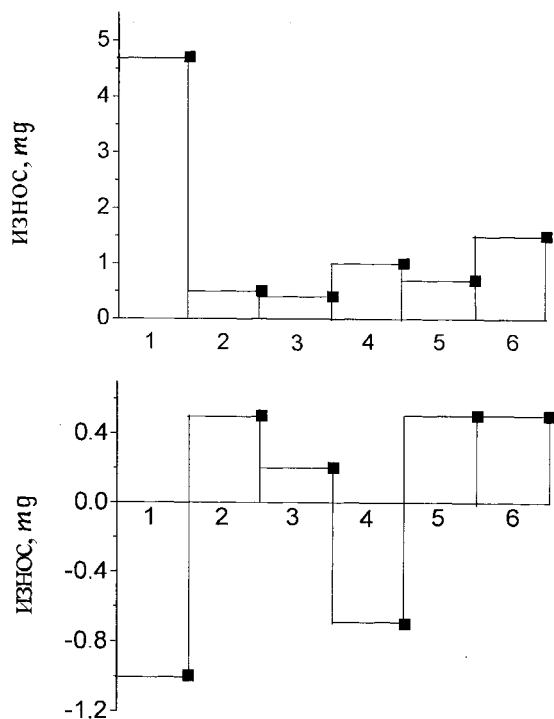
<sup>1</sup> Покрытия были нанесены в лаборатории проф. А.Я. Вуля.



**Рис. 1.** Износ стальных образцов (вверху) и стальных контро образцов (внизу): 1 — без смазки; 2 — смазка И-40А; 3 — И-40А с 2.5%  $C_{60}$ ; 4 — Литол-24; 5 — Литол-24 с 2.5%  $C_{60}$ . Отрицательное значение износа означает перенос частиц износа на исследуемое контртело.

путем механического перемешивания. Неоднородность распределения частиц фуллеренов в смазке, очевидно, является одной из причин значительного разброса получаемых экспериментальных данных (до 20%).

Результаты испытаний (по средним значениям износа в каждой серии образцов), представленные в виде гистограмм на рис. 1 и 2, показывают,



**Рис. 2.** Износ латунных образцов (вверху) и стальных контрообразцов (внизу): 1 — без смазки; 2 — смазка И-40А; 3 — 40А с 2.5%  $C_{60}$ ; 4 — Литол-24; 5 — Литол-24 с 2.5 6 — покрытие из  $C_{60}$  на латунном образце при сухом трении.

что использование масла И-40 А значительно, особенно для латунных образцов, снизило фреттинг-изнашивание в сравнении с образцами без смазки. При использовании этого масла на дорожке трения не наблюдались следы схватывания и переноса меди на контрообразец, что имело место при сухом трении. Применение того же масла с  $C_{60}$  позволило снизить износ образцов еще на 20–30% и контрообразцов — на 50% в сравнении с маслом без фуллеренов.

Неожиданные результаты получены для смазки Литол-24. Для стальных образцов износ с этой смазкой даже выше износа при сухом трении, при этом имел место перенос частиц износа на контрообразец;

для латунных образцов эффект применения Литола-24 оказался меньше, чем жидкой смазки, что может быть обусловлено его высокой вязкостью и недостаточной механической стабильностью в условиях сдвиговых деформаций. Однако и для этого типа смазки ведение  $C_{60}$  уменьшило износ в сравнении со смазкой без присадки.

Испытания образцов латуни с нанесенным на них покрытием из  $C_{60}$  показали, что при нормальном давлении 4.2 МПа для образцов без смазки и без покрытия имело место схватывание и визуально наблюдалось притормаживание вращения контробразца. Это потребовало снижения нормального давления для испытаний в условиях сухого трения до 3.2 МПа. При использовании ЛАЖ60 с покрытием притормаживания контробразца не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии схватывания в начальный период фреттинга. Износ латунного образца с покрытием оказался в  $\sim 3$  раза меньше износа того же образца без покрытия в условиях сухого трения, при этом отсутствовал перенос меди на контробразец, а на дорожке трения не наблюдались следы схватывания. Это позволяет сделать предварительный вывод об эффективности применения такого рода покрытий в качестве твердых смазок, особенно в тех случаях, когда подвод жидкой смазки к узлу трения конструктивно сложен.

Таким образом, проведенными исследованиями показана перспективность применения  $C_{60}$  в качестве присадок к смазочным маслам, а также в качестве покрытий в условиях фреттинга.

Настоящая работа выполнена в рамках Российской научно-технической программы "Фуллерены и атомные кластеры" (проект "Трибол").

## Список литературы

- [1] Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН. 1993. Т. 163. № 2. С. 33–60.
- [2] Bhushan B., Gupta D.K., Van Cleef G.W. et al. // Tribol. Trans. 1993. V. 36. N 4. P. 573–580.
- [3] Bhushan B., Gupta B.K., Van Cleef G.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. N 25. P. 3253–3255.
- [4] Gupta B.K., Bhushan B. // Lubr. Engineering. 1994. V. 50. N 7. P. 524–528.
- [5] Patent. N 05–229966, JP. Preparation of hydrogenated fullerene // Shigematsu K., Abe K. 25.02.92.
- [6] Patent. N 06–24720, JP. Manufacture of fluorinated fullerenes // Higashihara H., Shigematsu K. 06.07.92.

- [7] *Patent*. N 05–117174, JP. Hydrogenated closed–structure fullerene and its preparation. Shigematsu K., Abe K. 05.09.91.
- [8] *Patent*. N 05–179269, JP. Lubricants, Taniguchi M., Tomioka Y., Kumegava N., Isibashi M. 27.12.91.
- [9] *Patent*. N 5292444, US. Lube oil compositions containing fullerene-grafted polymers. Patil A.O., Schriver G.W., Lundberg R.D. 02.10.92.
- [10] *Patent*. N 5292813, US. Fullerene-grafted polymers and process for their preparation. Patil A.O., Schriver G.W., Lundberg R.D. 02.10.92.
- [11] *Patent*. N 5382718, US. Cyclofluoroalkylated fullerene compounds. Bekiarian P.G., Fagan P.J., Krusic P.J. 16.09.93.
- [12] *ГОСТ 23.211–80*. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии.
- [13] *Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В.* // Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.
- [14] *Уотерхауз Р.* // Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.