

05;12

Влияние C_{60} -содержащих присадок к смазочному маслу на оптимизацию процессов изнашивания при граничном трении металлов

© Д.Г. Точильников, Б.М. Гинзбург

Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 13 февраля 1998 г. В окончательной редакции 20 мая 1998 г.)

Исследовано влияние присадок, содержащих фуллерен C_{60} , к индустриальному маслу на оптимизацию процесса граничного трения стали и меди в парах трения скольжения сталь–сталь и медь–сталь. Оптимизацию характеризовали уменьшением параметра Q , введенного в предыдущей работе и представляющего собой вероятность того, что любое данное пятно касания трущихся контртел превратится в частицу износа при относительном сдвиге контртел на средний диаметр пятна касания. На основании экспериментальных данных рассчитаны значения параметра Q для различных режимов трения и показано, что наличие фуллерена в смазочном масле приводит к существенному уменьшению Q , а в случае меди этот параметр достигает довольно низких значений, близких к условному эталонному, выбранному ранее для ранжирования твердых тел по этому показателю.

Введение

Применение универсальных критериев для сравнительной оценки оптимальности процессов изнашивания позволяет сопоставлять противозносные свойства пар трения и смазочных материалов, определенных при испытаниях в различных условиях. К таким универсальным критериям, характеризующим процесс изнашивания при граничном трении твердых тел, можно отнести предложенный в работе [1] параметр Q , представляющий собой вероятность того, что любое пятно касания трущихся контртел превратится в частицу износа при относительном сдвиге контртел на средний диаметр пятна касания $Q = \alpha/n$, где α — количество пятен касания, превращающихся в частицы износа; n — общее число пятен касания, площадь которых составляет фактическую площадь фрикционного контакта. Можно предположить существование оптимального режима изнашивания, при котором величина Q будет минимальной, что и приведет в свою очередь к минимальным значениям интенсивности изнашивания. Уменьшение величины Q в процессе изнашивания можно рассматривать как оптимизацию процесса изнашивания.

В работе [1] была предложена методика феноменологической регистрации оптимальных режимов граничного трения, характеризующих минимальной интенсивностью изнашивания материала образца и соответствующей величиной $Q = Q^{opt}$. Для одного из наиболее антифрикционных материалов — баббита величина Q^{opt} оказалась равной $\approx 2 \cdot 10^{-10}$. Было показано также, что при наличии данных о линейной интенсивности изнашивания, твердости материала и контактном давлении можно вычислить Q для данных условий испытаний. На основе литературных данных были вычислены значения Q для ряда материалов (различных типов бронзы, композита фторпласт-4 + графит + MoS_2 , стали Ст-45, чугунов, кар-

бида титана) для определенных условий испытаний. Во всех случаях значения Q были на 1–3 порядка выше, чем $2 \cdot 10^{-10}$. В частности, для стали Ст-45, трущейся по бронзе, было получено значение $Q \approx 10^{-7}$, а для бронзы — $Q \approx 10^{-8}$. Только в случае высокопрочных чугунов, трущихся в двигателях по луженым и хромированным поршневым кольцам при смазывании моторными маслами, были получены значения $Q = 3 - 4 \cdot 10^{-10}$. Таким образом, значение $Q = 2 \cdot 10^{-10}$ может быть пока использовано в качестве условного эталона для различных материалов аналогично тому, как твердость алмаза является реперной величиной при оценке твердости твердых тел.

С другой стороны, в работах [2–6] было показано, что наличие небольших количеств фуллерена C_{60} (до 5%) в смазочном масле приводит к существенному улучшению различных трибологических свойств, в частности противозносных свойств стали и меди в парах трения скольжения сталь–сталь и сталь–медь. Представляло интерес выяснить, в какой мере фуллерен C_{60} способствует оптимизации процесса трения, т.е. исследовать влияние C_{60} -содержащих присадок к индустриальному маслу на значения Q для стали и меди и их изменения при различных условиях испытаний. Представляло также интерес сопоставить эти значения с реперным. Соответствующее исследование предпринято в настоящей работе.

Материалы

Фуллерен C_{60} был выделен хроматографически (с содержанием 96–98%) из экстракта фуллеренов (в основном C_{60} и C_{70}) в Лаборатории В.П. Будтова (проект "Хромотрон" Российской научно-технической программы "Фуллерены и атомные кластеры", 1994). В свою очередь экстракт выделяли из фуллереновой сажи, по-

лученной в плазме электрической дуги в Лаборатории Г.А. Дюжева (проект "Дуга" той же программы).

В качестве смазочных веществ использовали промышленное индустриальное масло И-40 А (И-Г-А-68 по ГОСТ 17479-87), смесь масла И-40 А и 5%-го фуллере-на C_{60} , смесь масла И-40 А и 5%-й фуллереновой сажи. В фуллереновой саже содержалось около 5.5% C_{60} и 1.5% C_{70} . Присадки механически вводились в масло в виде мелкодисперсных порошков. Перед употреблением смазочных смесей, полученных таким способом, проводили интенсивное перемешивание для более однородного распределения частиц в масле, однако остававшаяся неоднородность могла быть одной из причин разброса полученных данных.

Методика испытаний

Исследования проводились на стандартной роликовой машине трения 2070 СМТ-1 на парах трения, состоящих из неподвижного верхнего и вращающегося нижнего роликов (рис. 1). Нижний ролик диаметром 46 мм и шириной 16 мм изготавливался из износостойкой стали марки 18Х2НЧМА (ГОСТ 4543-71) и вращался со скоростью $\omega = 400 \text{ min}^{-1}$, что соответствовало линейной скорости скольжения 1 м/с. В качестве исследуемого образца использовались либо верхний неподвижный ролик (диаметром 50 мм и шириной 10 мм), изготовленный из стали Ст-45, либо медная фольга (0.25 мм), закрепляемая на этом ролике.

На образцы последовательно подавали различные нормальные нагрузки F_N . Испытания начинались с фрикционного контакта по линии при нагрузке $F_N = 100 \text{ N}$ (рис. 1, а). Продолжительность испытаний на каждой нагрузке составляла 300 с, а смазывание производилось одной каплей масла ($\sim 0.05 \text{ g}$) перед каждым изменением нагрузки. Через каждые 300 с производился подъем ка-

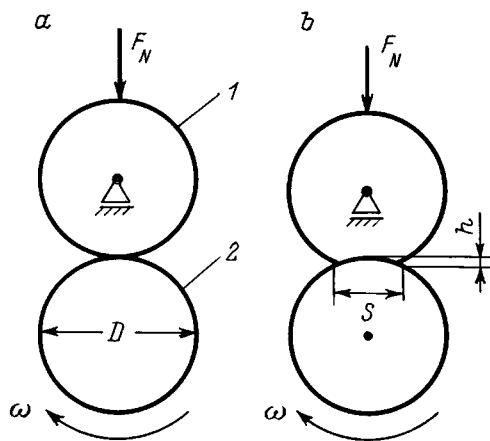


Рис. 1. Схема проведения трибологических испытаний: 1 — неподвижный ролик (образец), 2 — подвижный ролик; а — исходное состояние с линейным фрикционным контактом, б — состояние фрикционного контакта после выработки канавки износа с площадью S .

ретки машины трения и с помощью измерительной лупы определялись геометрические параметры пятна износа, по значениям которых рассчитывались средняя площадь пятна износа S , глубина канавки износа h (рис. 1, б) и объемный износ V_w [7]. Площадь пятна износа S_e , определенная в конце испытаний при данной нагрузке, рассматривалась как площадь начального фрикционного контакта S_i для последующей нагрузки. По каждому варианту испытаний (при каждой нагрузке и фиксированном типе смазки) проводилось в зависимости от разброса 3–15 испытаний, после чего рассчитывались среднеарифметические значения измеряемых величин. Для контроля воспроизводимости через каждые 10–12 испытаний проводились испытания на базовом масле И-40 А.

Величину Q рассчитывали по соотношению, предложенному в работе [1]

$$I_h = 3(P_N Q / H_B) \cdot (g/d), \quad (1)$$

где I_h — линейная интенсивность изнашивания образца; P_N — номинальное контактное давление; H_B — твердость по Бринеллю; g/d — отношение средней высоты частицы износа к среднему диаметру пятна касания или диаметру частицы износа, если пятно превратилось в частицу износа.

В дальнейшем мы принимали $g/d \approx 1$, т.е. частицы износа имеют комкообразную форму, что часто наблюдается для металлов.

В свою очередь линейная интенсивность изнашивания при линейном начальном контакте определяется как $I_h = h/L$, где h — глубина канавки износа, L — путь трения за время испытаний. Величина пути трения определялась как $L = \pi D \omega t$, где D — диаметр подвижного ролика, t — время испытаний. Номинальное контактное давление P_N определяли как F_N / S_{av} , где S_{av} — средняя за испытание площадь номинального контакта. Как показали специально проведенные испытания, используемая нами формула $S_{av} \approx S_i + 0.8(S_e - S_i)$ лучше отражает изменения площади контакта, чем среднее арифметическое значение начальной и конечной площадей, поскольку площадь контакта изменяется во времени нелинейно, резко увеличиваясь в первые моменты приложения новой нагрузки, а затем меняясь более плавно. Твердость по Бринеллю для стали Ст-45 может быть принята равной 2000 N/mm^2 , а для меди — 800 N/mm^2 [8].

С учетом всех приведенных постоянных значений параметров, входящих в формулу (1), значения Q можно было рассчитывать по формулам

$$Q = 2.2 \cdot 10^{-3} h S_{av} / F_N \quad \text{для пар трения сталь-сталь,} \quad (2)$$

$$Q = 0.9 \cdot 10^{-3} h S_{av} / F_N \quad \text{для пар трения медь-сталь,} \quad (3)$$

где значения h вводятся в мм, S_{av} — в mm^2 , F_N — в N .

Относительная средняя квадратическая ошибка среднеарифметических значений Q составляла 7–10%.

Минимальные и максимальные значения линейной интенсивности изнашивания I_h , параметра Q и контактных давлений P_N во всем диапазоне исследованных нагрузок для стали и меди в парах трения скольжения сталь–сталь и медь–сталь

| Смазка | Сталь | | | | Медь | | | | | |
|-----------------------------|---|---|----------|------------------------------------|----------|---|---|----------|------------------------------------|----------|
| | Размах средних значений P_N , N/mm ² | Линейная интенсивность изнашивания I_h , 10 ⁻⁸ | | Вероятность Q , 10 ⁻⁸ | | Размах средних значений P_N , N/mm ² | Линейная интенсивность изнашивания I_h , 10 ⁻⁸ | | Вероятность Q , 10 ⁻⁸ | |
| | | минимум | максимум | минимум | максимум | | минимум | максимум | минимум | максимум |
| И-40 А | 26–38 | 0.8 | 4 | 16 | 80 | 60–80 | 0.15 | 3 | 0.5 | 14 |
| И-40 А+5% фуллереновой сажи | 27–50 | 0.3 | 2 | 8 | 40 | 80–90 | 0.08 | 2 | 0.3 | 7 |
| И-40 А+5% C ₆₀ | 28–53 | 0.3 | 2 | 7 | 30 | 90–120 | 0.05 | 2 | 0.15 | 5 |

Результаты испытаний

Отметим, что специфика испытаний на трение такова, что в области упругого контакта трибологические характеристики зависят не только от приложенного к контакту давления, но в большей степени от абсолютного значения приложенной силы [8–10]. С ростом приложенной силы одновременно увеличивалась площадь контакта, поэтому контактное давление менялось не очень сильно, хотя значения Q менялись существенно. На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета Q на основе испытаний пар трения сталь–сталь и медь–сталь соответственно в зависимости от приложенной силы, в таблице приведены максимальные и минимальные значения параметра Q и более привычной для трибологов величины линейной интенсивности изнашивания во всем диапазоне исследованных нагрузок, а также размах средних значений давления на контакте.

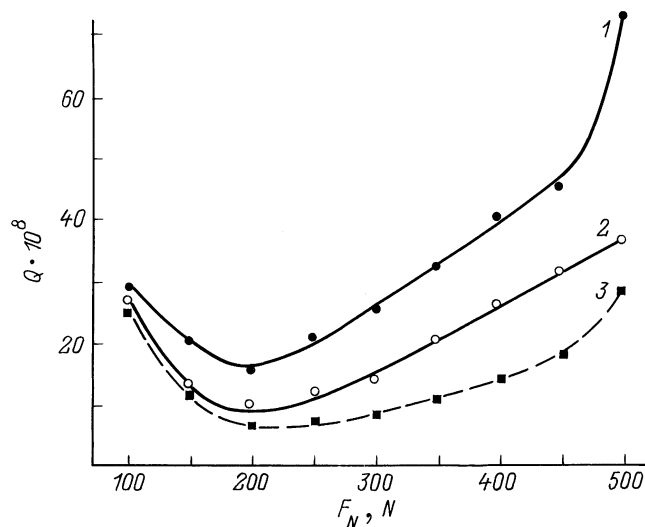


Рис. 2. Зависимость параметра Q от нагрузки для пары трения сталь–сталь. Смазывание базовым маслом И-40 А (1), И-40 А + 5% фуллереновой сажи (2) и И-40 А + 5% C₆₀ (3).

Рассмотрим, каков характер полученных зависимостей и как они меняются при наличии фуллеренов в смазке для пар трения сталь–сталь (рис. 2). На начальном этапе приработки (при $F_N = 100$ N) значения Q для различных смазок почти не отличаются друг от друга. При переходе от $F_N = 100$ до 200 N во всех случаях наблюдается снижение Q , т. е. происходит так называемая приработка, или оптимизация, процесса изнашивания. Однако для фуллереносодержащих смазок процесс оптимизации происходит более интенсивно. Так, для базового масла в указанном интервале нагрузок величина Q уменьшалась в 2 раза, для масла с добавками сажи — в 3 раза, с добавками C₆₀ — в 4 раза. При дальнейшем повышении нагрузки до 300 N в случае масла с присадкой C₆₀ величина Q практически не меняется, тогда как для других смазок она заметно возрастает. При нагрузках 300–500 N наблюдается сильное возрастание значений Q , причем для базового масла виден резкий рост вблизи

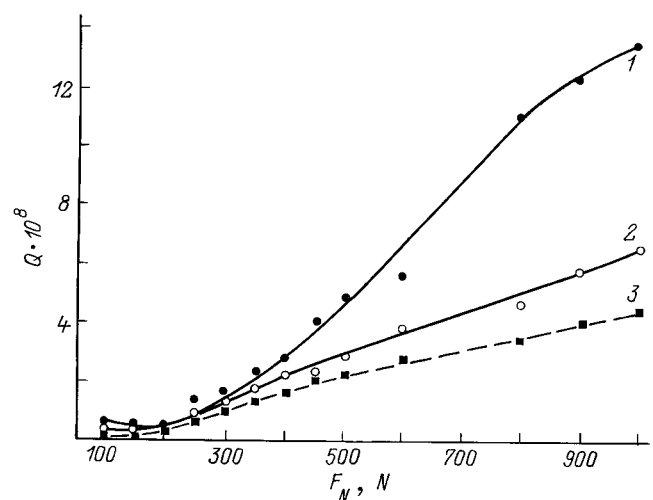


Рис. 3. Зависимость параметра Q от нагрузки для пары трения медь–сталь. Смазывание базовым маслом И-40 А (1), И-40 А + 5% фуллереновой сажи (2) и И-40 А + 5% C₆₀ (3).

500 N, характерный для задира. Однако для масла с добавкой C_{60} величина Q при таких высоких нагрузках в 2.7 раза меньше, чем для базового масла.

Наименьшее значение Q для пары сталь–сталь наблюдается при 200 N и составляет $\approx 7 \cdot 10^{-8}$ при добавках чистого C_{60} — более чем на 2 порядка выше по сравнению с эталонным значением для баббита. Несколько меньший эффект достигается при добавке фуллереновой сажи: наименьшее значение Q составляет при тех же условиях $\approx 9 \cdot 10^{-8}$. Наличие фуллеренов в смазке приводит к 2–3-кратному уменьшению линейной интенсивности изнашивания, а ее наименьшее значение достигает $0.3 \cdot 10^{-8}$ (см. таблицу).

Для пар трения медь–сталь образование слабого минимума на зависимости $Q(F_N)$ (снижение на 20%) наблюдалось только для базового масла (рис. 3). В случае фуллереносодержащих присадок приработка происходит очень быстро при первом фрикционном контакте с нагрузкой 100 N, и, очевидно, поэтому снижение Q не удалось зарегистрировать. Тем не менее величина Q при наличии фуллеренов в масле и этой нагрузке в 2.5–4.5 раза меньше, чем для базового масла (см. таблицу). В дальнейшем во всем диапазоне изменения нагрузки наблюдается рост значений Q , но везде C_{60} -содержащие присадки дают значительное уменьшение Q по сравнению с базовым маслом. В сравнении с парой сталь–сталь пара медь–сталь при всех исследованных условиях обладает лучшими противоизносными свойствами, а наименьшие значения I_n и Q , достигаемые при добавках чистого C_{60} , составляют соответственно $5 \cdot 10^{-10}$ и $15 \cdot 10^{-10}$ (см. таблицу). Последняя цифра по порядку величины уже сопоставима с эталонным значением для баббита.

Таким образом, безусловно, наличие фуллеренов в смазке способствует оптимизации поверхностей трения стали и меди и уменьшению их изнашивания. При этом значение параметра Q , характеризующего оптимизацию поверхности, достигает в случае меди очень низкого значения, близкого к условному эталонному значению, характеризующему минимальный возможный износ.

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

Список литературы

- [1] Козырев Ю.П., Гинзбург Б.М. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 4. С. 48–52.
- [2] Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. 1995. Т. 21. № 22. С. 62–66.
- [3] Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. 1995. Т. 21. № 23. С. 35–38.
- [4] Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г., Булатов В.П. // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 2. С. 235–239.
- [5] Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. 1997. Т. 23. № 15. С. 1–6.
- [6] Гинзбург Б.М. и др. // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 4. С. 523–526.
- [7] Булатов В.П. и др. // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 6. С. 1009–1013.

- [8] Крагельский И.В., Добычин М.М., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 440 с.
- [9] Нестерова И.Н., Гусев А.Ф. // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 6. С. 1152–1158.
- [10] Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. 1995. Т. 21. № 1. С. 41–45.