

УДК 541.64:546.26

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН–ФУЛЛЕРЕНОВАЯ САЖА¹

© 2008 г. Б. М. Гинзбург*, А. О. Поздняков*, Д. Г. Точильников*,
Ш. Туйчиев**, А. А. Шепелевский*

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук
199178 Санкт-Петербург, Большой пр., 61

**Таджикский государственный национальный университет
734025 Душанбе, пр. Рудаки, 17

Поступила в редакцию 16.05.2007 г.

Принята в печать 21.02.2008 г.

Исследовано влияние добавок фуллереновой сажи на антифрикционные и противоизносные свойства ПТФЭ при трении скольжения по стали и смазывании водой. Структура модифицированного ПТФЭ и фуллереновой сажи проанализирована методами малоугловой и широкоугловой рентгенографии. Предложен гипотетический механизм упрочняющего действия фуллереновой сажи при трении.

ПТФЭ – один из лучших антифрикционных материалов, однако он обладает повышенным износом и хладотскучестью под нагрузкой, что допускает его использование лишь при малых нагрузках. Износостойкость ПТФЭ можно повысить введением наполнителей. В качестве наполнителей ПТФЭ применяют кокс, графит, стекловолокно, угольные волокна, порошки бронзы, меди, свинца и их окислов, а также сочетания указанных компонентов [1, 2]. Композиции ПТФЭ с углеродными волокнами и графитом, хотя и обладают наилучшими противоизносными свойствами, но имеют высокую стоимость, а технология их изготовления более сложна, чем технология получения других композиций.

Из материалов на основе ПТФЭ наибольшее применение в настоящее время получили материалы с различной концентрацией порошковых углеродных наполнителей. Для опорных поверхностей узлов трения наиболее предпочтительным наполнителем является кокс [1, 3].

Наиболее распространенная композиция Ф-4К20 [3] содержит 80% ПТФЭ марки Ф-4 и 20% каменноугольного кокса (здесь и далее – мас. про-

центы). Эта композиция обладает высокой износостойкостью, малой деформируемостью под нагрузкой и малой гигроскопичностью. Основным недостатком Ф-4К20 является сравнительно высокий коэффициент трения (например, при одинаковых контактных давлениях и аналогичных условиях трения по стали он в 2–3 раза выше, чем у Ф-4).

Добавками углеродных наполнителей обычно достигают компромисса – теряют в антифрикционных свойствах, но при этом увеличивают износостойкость. Введение в Ф-4 более 20% наполнителя приводит к резкому уменьшению прочности композита при растяжении и сжатии.

В работах [4, 5] исследовано влияние малых добавок фуллерена C_{60} и фуллереновой сажи на трибологические свойства жидких минеральных масел. При этом показано, что значительно более дешевая фуллереновая сажа оказывает практически такое же положительное влияние, что и чистый фуллерен. Был сделан следующий вывод: роль фуллерена сводится к иницированию процессов трибополимеризации нефтяных и парафиновых олигомеров, содержащихся в минеральных маслах, и формированию защитной полимерной пленки на поверхности трения. Однако механизмы увеличения прочностных и противоизносных характеристик твердых смазочных ма-

¹ Работа посвящается светлой памяти Николая Альфредовича Платэ.

E-mail: ginzburg@tribol.ipme.ru (Гинзбург Борис Моисеевич).

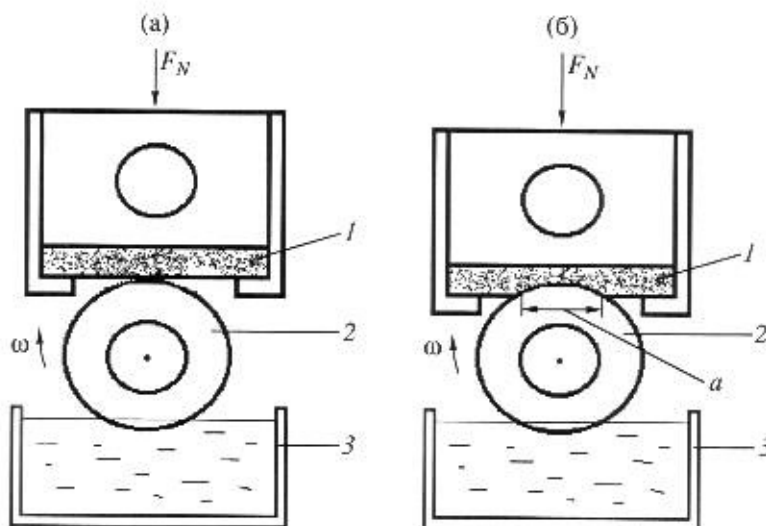


Рис. 1. Схемы трибологических испытаний. а – схема 1, линейный начальный контакт; б – схема 2, конформный начальный контакт. 1 – образец, 2 – подвижный ролик, 3 – водяная ванна.

териалов при введении в них малых добавок фуллереновой сажи оставались неясными.

В настоящей работе исследовано влияние малых добавок (1–10%) фуллереновой сажи на антифрикционные и противоизносные свойства ПТФЭ марки Ф-4 (ГОСТ 10007-80, Россия) при граничном трении скольжения. Исследуемые материалы проанализированы методами малоугловой и широкоугловой рентгенографии. Предложена гипотеза, объясняющая механизм упрочняющего действия фуллереновой сажи при трении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Использовали фуллереновую сажу, выпускаемую Научно-производственной компанией “НеоТекПродакт” (Санкт-Петербург, Россия) [6]. Фуллереновую сажу вводили в количестве 1, 3, 5 или 10% в материал Ф-4.

Исследования проводили на стандартной роликовой машине трения 2070 СМТ-1. Испытуемый образец представлял собой плоскую пластину с прямоугольным сечением и толщиной 10 мм.

В качестве контртела к пластине подводили ролик с диаметром 46 и шириной 16 мм, изготовленный из износостойкой хромоникельмолибденовой стали марки 18Х2НЧМА (ГОСТ 4543-71) и вращающийся со скоростью 400 мин⁻¹, что соответствовало линейной скорости скольжения 1 м/с.

Рабочая цилиндрическая поверхность ролика, обработанная круглым шлифованием, имела шероховатость $R_a = 0.65$ мкм и во время испытаний была погружена на 6 мм в водяную ванну. Вязкость воды в условиях испытаний настолько мала [7], что всегда осуществлялось граничное трение [8]. Ширина ролика всегда превосходила ширину образца.

Использовали две схемы начального фрикционного контакта (рис. 1). По схеме 1 начальный контакт цилиндр–плоскость между контртелами осуществлялся по линии, вдоль образующей подвижного цилиндрического ролика (рис. 1а). Далее на образец подавали ступенчато увеличивающуюся нормальную нагрузку F_N (от 100 до 1600 Н через каждые 100 Н); на каждой ступени нагрузку поддерживали постоянной в течение 300 с. При испытаниях по схеме 1 определяли объемный износ V_f на каждой ступени и сумму этих объемов $\sum V_f$ на всех ступенях; работу сил трения A_f на каждой ступени и суммарную работу сил трения $\sum A_f$ на всех ступенях; несущую способность P_m материала (или верхний предел рабочих давлений).

По схеме 2 (рис. 1б) на поверхности образца тем же роликом предварительно вырабатывали канавку износа площадью 30–50 мм², так что далее испытания проводили на конформных контртелах с приработанным фрикционным контак-

том. На образец подавали последовательно ступенчато увеличивающиеся нормальные нагрузки F_N (от 100 до 800–1200 Н через каждые 100 Н). Так же, как и по схеме 1, продолжительность испытаний на каждой ступени составляла 300 с. В результате испытаний по схеме 2 определяли средний коэффициент трения f_{av} на каждой ступени и линейную интенсивность изнашивания I_h на каждой ступени.

По всем вариантам проводили от трех до шести испытаний. Трибологические показатели определяли как средние арифметические значения. Относительные среднеквадратические ошибки лежали в пределах 5–10%. Другие детали методики испытаний описаны ранее [9].

МЕТОДИКА РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования методом широкоугольной рентгенографии проводили на дифрактометре ДРОН-2.0 (CuK_α -излучение) с графитовым кристаллом-монокроматором и Ni-фильтром, используя схему Брегга–Брентано. Из фуллереновой сажи прессованием готовили таблетки толщиной ~2 мм. По измеренным значениям ширины рефлексов оценивали средние размеры кристаллитов L_{hkl} в направлении $[hkl]$ по формуле Шеррера [10]:

$$L_{hkl} = B / [(2 \cos \theta) / \lambda] \Delta \theta, \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, B – константа, близкая к единице, 2θ – угол рассеяния, $\Delta \theta$ – полуширина рефлекса.

Съемку малоугловых дифрактограмм проводили на установке КРМ-1 со щелевой коллимацией первичного пучка рентгеновского излучения; ширина пучка составляла 5' у основания контура. Использовали CuK_α -излучение, фильтрованное Ni. Диапазон исследованных углов рассеяния простирался от 12' до 2°. В качестве подложки применяли гидратцеллюлозную пленку толщиной 7.5–10 мкм, на поверхность которой наносили тонкий слой силикатного клея, после чего поверхность более или менее равномерно посыпали тонким слоем исследуемого порошка и раскатывали порошок стеклянным валиком. Контрольная подложка вместе с тонким слоем клея не давала за-

метного рассеяния в измеряемом интервале углов рассеяния по сравнению с фоном.

Измерения проводили по методике “на про-свет”: образец устанавливали в центре гониометра перпендикулярно первичному пучку и снимали кривую рассеяния $I_s(2\theta)$; затем образец помещали перед первой щелью и снимали контур первичного пучка с учетом его поглощения образцом $I_a(2\theta)$. Для всех образцов кривые $I_a(2\theta)$ были одинаковы в пределах ошибок измерений, так что нормировку к одинаковой интенсивности первичного пучка не проводили. Далее из кривой $I_s(2\theta)$ вычитали кривую $I_a(2\theta)$; указанные “разностные” дифрактограммы представлены ниже в качестве экспериментальных кривых $I(s)$ или $I(2\theta)$, где $s = 4\pi \sin(\theta) / \lambda$, 2θ – угол рассеяния, λ – длина волны рентгеновского излучения.

Согласно теории Гинье, распределение интенсивности малоуглового рассеяния рентгеновских лучей от разбавленных систем однородных и одинаковых по размеру частиц описывается формулой [11]

$$I(s) = n^2 \exp(-4\pi^2 R_g^2 s^2 / 3), \quad (2)$$

где $I(s)$ – интенсивность рассеяния, n^2 – рассеивающая способность в расчете на одну рассеивающую частицу, R_g – радиус инерции, $s = 4\pi\theta/\lambda$, учитывая малость угла рассеяния. Формула (2) справедлива, если произведение $R_g s$ заметно меньше единицы. Логарифмируя формулу (2), получим соотношение

$$\lg I = \lg n^2 - (4\pi^2 R_g^2 s^2 / 3) \lg e \quad (3)$$

Поэтому сначала экспериментальные кривые рассеяния строили в обычных координатах (интенсивность–угол рассеяния), а затем перестраивали в координатах Гинье (логарифм интенсивности–квадрат угла рассеяния). По тангенсу α угла наклона кривых в координатах Гинье определяли радиусы инерции рассеивающих элементов. Для используемого CuK_α -излучения имеем [11]

$$R_g = 0.644(-\alpha)^{1/2} \quad (4)$$

Экспериментально ранее было установлено [11], что по крайней мере для двух систем рассеивающих частиц, каждая из которых имеет более или менее узкое распределение по размерам, в

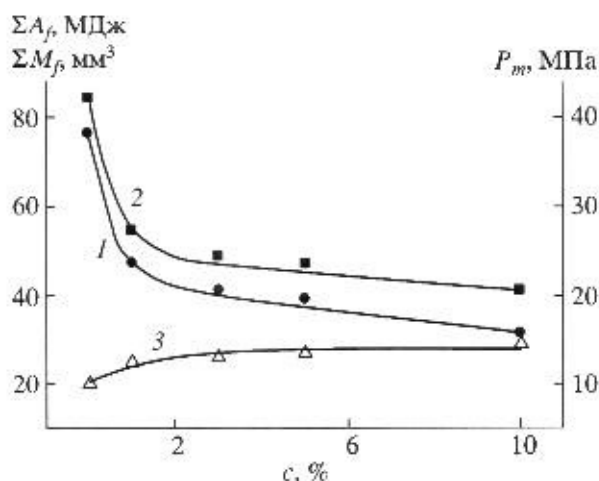


Рис. 2. Зависимость суммарной работы сил трения (1), суммарного объемного износа (2) и несущей способности (3) от концентрации фуллереновой сажи для композита на основе фторопласта Ф-4 при трении скольжения по схеме 1.

координатах Гинье получается ломаная кривая с двумя соответствующими прямолинейными участками.

Теория Гинье разработана для случая точечной коллимации, и в принципе при использовании щелевой коллимации необходимо вводить коллимационную поправку. Однако в работе [11] упоминается, что в частном случае экспоненциальной зависимости интенсивности от угла рассеяния линейный ход зависимости $\lg I(s^2)$, причем с тем же наклоном, сохраняется для любой высоты коллимационных щелей.

Действительно, перепишем формулу (2) в виде

$$I(q) = I_0 \exp(-R^2 q^2/3) \quad (5)$$

($q = 2\pi s$). При щелевой коллимации интенсивность рассеяния равна

$$\bar{I}(q) = \int_{-a}^{+a} I(\sqrt{q^2 + x^2}) W(x) dx, \quad (6)$$

где $2a$ – высота щели, x – координата вдоль щели, $W(x)$ – функция щели. Преобразуем выражение (6) к виду

$$\bar{I}(q) = \int_{-a}^{+a} I_0 \exp(-R^2(q^2 + x^2)/3) W(x) dx \quad (7)$$

Выносим за знак интеграла величину, не зависящую от x :

$$\bar{I}(q) = I_0 \exp(-R^2 q^2/3) \int_{-a}^{+a} \exp(-R^2 x^2/3) W(x) dx \quad (8)$$

Так как получившийся интеграл равен некоторой постоянной величине K , то в итоге имеем

$$\bar{I}(q) = K I_0 \exp(-R^2 q^2/3), \quad (9)$$

что и требовалось показать.

В случае малоугловых измерений гониометр вращали вручную и проводили при каждом фиксированном угле рассеяния набор 1000 импульсов, так что относительная погрешность измерений интенсивности составляла ~3–4%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

При испытаниях по схеме 1 введение в Ф-4 фуллереновой сажи в количестве 1 и 10% способствует уменьшению энергопотерь на трение соответственно на ~40 и ~60%, снижению объемного износа на ~35 и 50%, увеличению допустимых рабочих давлений (несущей способности) на 25 и 45% (рис. 2). Таким образом, добавка фуллереновой сажи существенно улучшает триботехнические показатели Ф-4 при трении по стали и смазывании водой, причем основные изменения происходят при концентрации фуллереновой сажи 1–3%. Добавка большего количества сажи, на наш взгляд, нецелесообразна.

При испытаниях по схеме 2 в диапазоне рабочих давлений 1–10 МПа добавка сажи снижает величину коэффициента трения до значений $f_c = 0.015$ –0.02 (рис. 3) и величину линейной интенсивности изнашивания до значений $I_h = (0.40$ – $2.9) \times 10^{-8}$ (рис. 4), т.е. обеспечивают снижение f_c в 1.5–2 раза и I_h в 2–7.5 раза.

Следует отметить, что добавка 1% фуллереновой сажи к Ф-4 приводит в условиях смазывания водой к значительному увеличению износостойкости (материал становится по этому показателю лучше, чем Ф-4К20, рис. 4, кривые 2 и 6) при одновременном снижении коэффициента трения.

Отметим также, что эффективность добавок фуллереновой сажи невелика при малых давле-

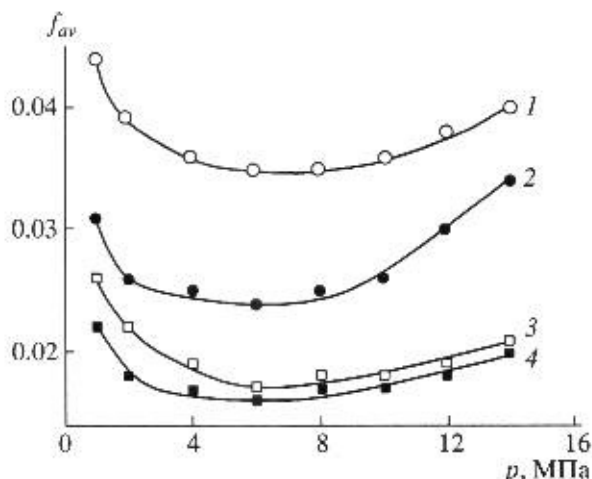


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения Φ -4, модифицированного фуллереновой сажей, от контактного давления при трении скольжения по стали и смазывании водой (схема 2). Концентрация сажи 0 (1), 1 (2), 3 (3) и 5% (4).

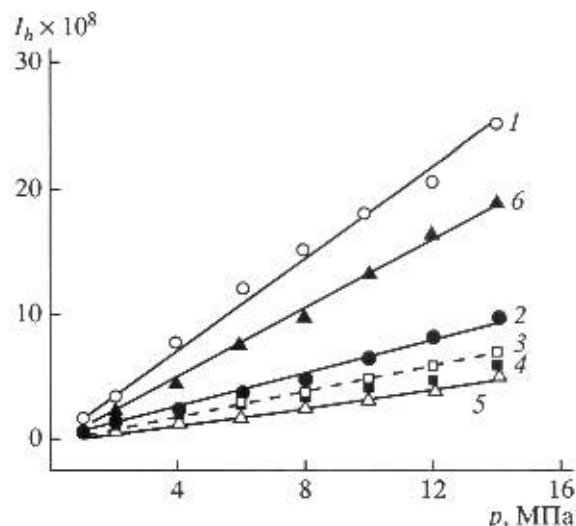


Рис. 4. Зависимость линейной интенсивности изнашивания от контактного давления при трении скольжения по стали и смазывании водой (схема 2) для Φ -4 (1), композита на основе Φ -4 с фуллереновой сажей (2–5) и Φ -4K20 (6). Концентрация фуллереновой сажи в композите 1 (2), 3 (3), 5 (4) и 10% (5).

ниях на контакте, но сильно возрастает с повышением давления (рис. 4). Поэтому, чтобы делать определенные выводы об эффективности фуллеренсодержащих добавок, необходимо проводить испытания в достаточно широком интервале давлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Широкоугольные рентгенограммы образцов Φ -4 с введенной фуллереновой сажей показывают, что структура фторопласта практически не меняется, все основные рефлексы сохраняют свое положение, интенсивность и форму (рис. 5). Очевидно, фуллереновая сажа находится в матрице Φ -4 в виде отдельной не смешивающейся на молекулярном уровне фазы; на рентгенограммах ввиду малых количеств сажи слабо проявляется только рефлекс 002 решетки графита.

Рассмотрим широкоугольные рентгенограммы фуллереновой сажи (рис. 6). На них проявляются четыре рефлекса, из которых первые три соответствуют градиентированной кубической решетке фуллерена C_{60} , а четвертый – рефлексу 002 решетки графита. Размеры кристаллитов, рассчитанные по формуле Шеррера для кристаллитов фуллерена C_{60} в фуллереновой саже, со-

ставляют ~25 нм по ширине рефлекса 111 и ~20 нм по ширине рефлекса 220. Размер кристаллитов графита примерно вдвое больше.

Прежде чем рассмотреть результаты малоугловых измерений, отметим, что, согласно расчетным и экспериментальным данным, молекула фуллерена C_{60} представляет собой усеченный икосаэдр и имеет внутреннюю полость с нулевой электронной плотностью [12]; диаметр внутренней полости составляет 0,4 нм, а внешний диаметр – 0,714 нм [13]. С учетом указанных размеров в первом приближении молекулу C_{60} можно

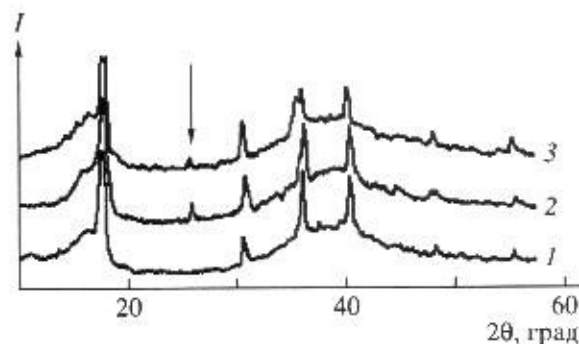


Рис. 5. Широкоугольные рентгенограммы Φ -4 (1), Φ -4 + 1% фуллереновой сажи (2), Φ -4 + 3% фуллереновой сажи (3). Стрелкой указан рефлекс 002 решетки графита.

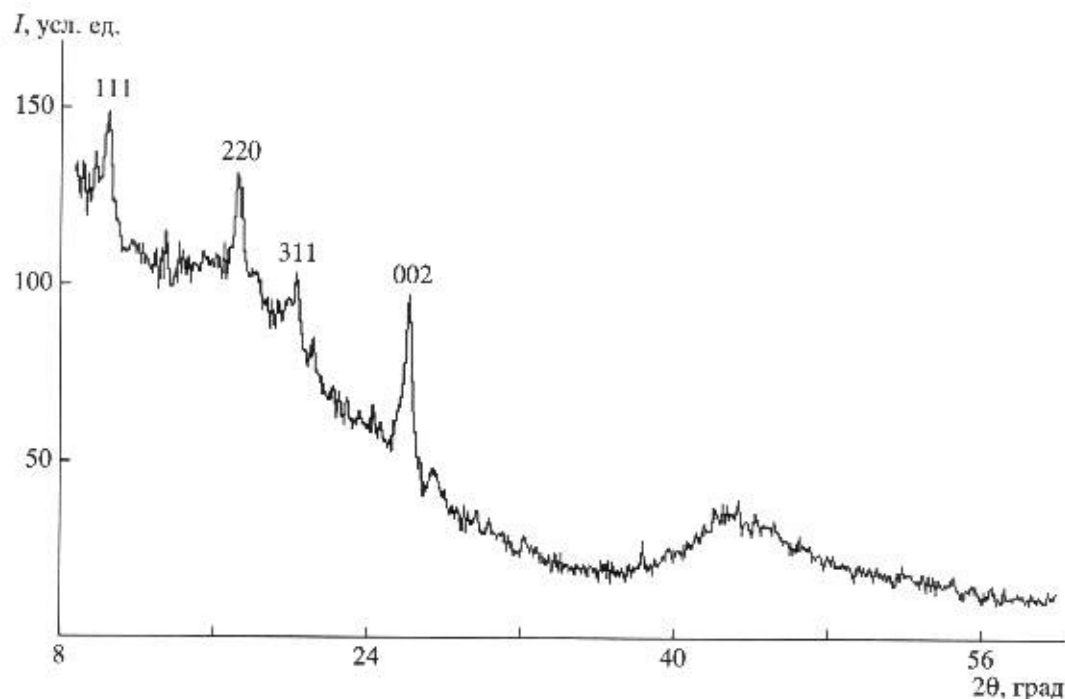


Рис. 6. Широкоугольная рентгенограмма фуллереновой сажи. 111, 220 и 311 – рефлексы, соответствующие гранецентрированной кубической решетке C_{60} , 002 – наиболее сильный рефлекс решетки графита.

моделировать сферической оболочкой с равномерным распределением плотности; тогда ее радиус инерции равен 0.30 нм. Эти оценочные данные для отдельной молекулы C_{60} и других структурных элементов приведены в таблице.

На рис. 7А показаны малоугловые рентгенограммы фуллерена C_{60} и фуллереновой сажи, а на рис. 7Б – те же рентгенограммы, перестроенные в координатах Гинье.

Обращает на себя внимание равенство наклона линейных участков кривых *a* и *б* (рис. 7Б) в их самой “малоугловой” части; соответствующий этим наклонам радиус инерции составляет ~10 нм. Если принять, что рассеивающие частицы являются однородными по плотности кубами, то длина ребра куба равна 20 нм, что хорошо согласуется с данными широкоугольной рентгенографии о размерах кристаллитов C_{60} как в порошке фуллерена, так и в порошке фуллереновой сажи.

Обратимся ко второму участку на кривой *a* рис. 7Б. Здесь проведено две прямых линии. Наклон одной из них дает радиус инерции ~0.9 нм, а наклон второй – ~0.3 нм. Первое значение хорошо согласуется с размерами конгломератов, состоящих из двух элементарных ячеек гранецен-

трированной кубической решетки C_{60} (таблица). Наклон второй линии определен на уровне погрешности измерений и соответствует одиночным молекулам C_{60} , которые, согласно моделированию формы аморфного гало широкоугольных рентгенограмм [14], имеются в большом количестве в порошкообразном фуллерене C_{60} , получаемом методом Хуффмана–Кречмера.

Второй и третий линейные участки на кривой *б* (рис. 7Б) соответственно дают для частиц фуллереновой сажи радиусы инерции 3 и 2 нм (длина ребра кубов 6 и 4 нм), что можно отнести к сравнительно мелким “кристаллическим” образованиям C_{60} или графита, по три–четыре ячейки в каждом кристаллографическом направлении (таблица). Таким образом, согласно обеим рентгенографическим методикам в порошке фуллереновой сажи имеются кристаллиты размером 20–25 нм и более мелкие образования размером 4–6 нм.

Эти образования (если они не агломерируют в процессе переработки) придают исследуемым образцам свойства нанокомпозитов, что может объяснять их упрочнение [15]. Дополнительное упрочнение может возникать вследствие высокой электрооакцепторной способности молекул C_{60} .

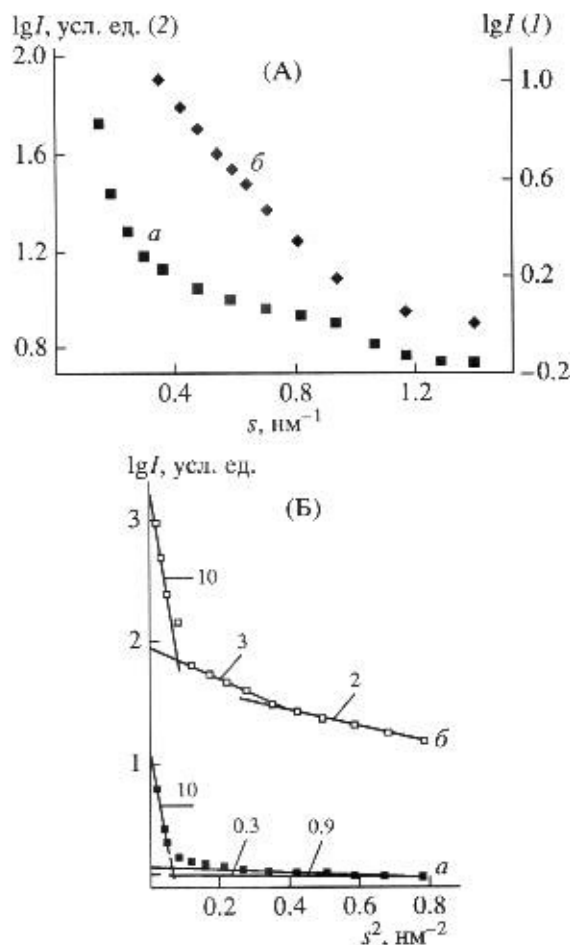


Рис. 7. Малоугловые рентгенограммы порошков C_{60} (а) и фуллереновой сажи (б) (А) и те же рентгенограммы в координатах Гинье (Б). На рис. 7Б цифры у различных участков кривых – соответствующие радиусы инерции в нанометрах.

Действительно, известно, что при механическом разрушении полимеров в устье образующихся микротрещин происходит механодеструкция полимерных цепей. Аналогичный процесс идет, очевидно, в устьях многочисленных микротрещин, приводящих к образованию частиц износа. На рис. 8 представлена схема продвижения микротрещины, достигающей молекулы (или небольших конгломератов) C_{60} . На поверхности микротрещины сосредоточены свободные полимерные радикалы (рис. 8а). Часть из них, достигшая фуллереновой поверхности, образует с фуллереном ковалентные связи. При дальнейшем увеличении сил, раскрывающих трещину, эти связи разрываются, происходит втягивание молекулы (или агрегата молекул) C_{60} в микротрещину (рис. 8б), сопровождающееся образованием большого количества новых ковалентных связей мак-

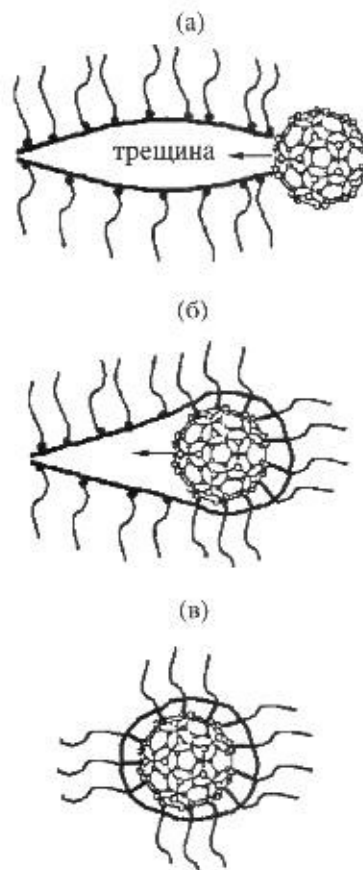


Рис. 8. Схема продвижения микротрещины через полимерную матрицу, модифицированную молекулами C_{60} . а – начальная стадия, б – образование ковалентных связей и частичное втягивание молекулы C_{60} в микротрещину, в – полное втягивание молекулы C_{60} в микротрещину и ее «залечивание».

рорадикалов с фуллереном, что приводит в конечном итоге к «залечиванию» микротрещины (рис. 8в).

То, что полимерные радикалы, образующиеся при термо- и механодеструкции полимеров, легко реагируют с C_{60} , было показано на примере многих полимеров (ПС, ПММА, ПЭГ и других) [16].

В работе [17] методом термодесорбционной масс-спектрометрии показано, что наличие C_{60} в ПММА замстно изменяет характер его структурных изменений при трении. Известно, что масс-термограмма деструкции ПММА, полученного методом свободнорадикальной полимеризации, имеет три температурных пика выделения мономера [18]. Первый, самый низкотемпературный пик, соответствует разрушению макромолекул в местах дефектов типа «голова-к-голове»,

Структурные элементы и примерные значения их радиусов инерции

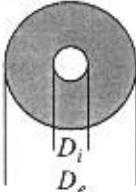
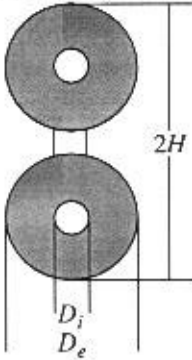
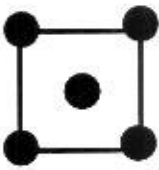
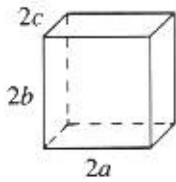
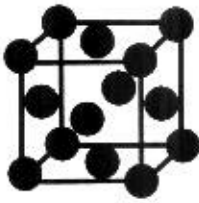
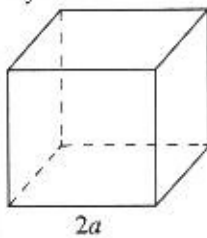
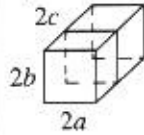
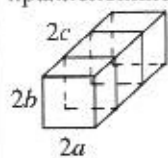
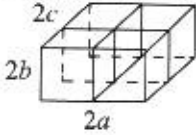
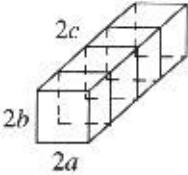
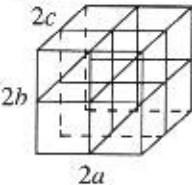
Структурный элемент	Схема	Модель	Размеры, нм	R_g , нм
Молекула C_{60}		Сферическая оболочка 	$D_i = 0.4$ $D_e = 0.7$	0.30
Димер C_{60} или конгломерат из двух молекул		Гантель 	$D_i = 0.4$ $D_e = 0.7$ $2H = 1.4-1.6$	0.4
Грань элементарной ячейки границентрированной кубической решетки или конгломерат из пяти молекул C_{60}		Прямоугольный параллелепипед 	$a = b = 0.7$ $c = 0.35$	0.6
Элементарная ячейка границентрированной кубической решетки или конгломерат из 14 молекул C_{60}		Куб 	$a = 0.7$	0.7
Две элементарные ячейки		Прямоугольный параллелепипед 	$a = b = 0.7$ $c = 1.4$	1.0
Три элементарные ячейки		Прямоугольный параллелепипед 	$a = b = 0.7$ $c = 2.1$	1.35

Таблица. Окончание

Структурный элемент	Схема	Модель	Размеры, нм	R_g , нм
Четыре элементарные ячейки ($2 \times 2 \times 1$)		Прямоугольный параллелепипед 	$a = c = 1.4$ $b = 0.7$	1.2
Четыре элементарные ячейки ($4 \times 1 \times 1$)		Прямоугольный параллелепипед 	$a = b = 0.7$ $c = 2.8$	1.7
Восемь элементарных ячеек ($2 \times 2 \times 2$)		Куб 	$a = b = c = 1.4$	1.4
27 элементарных ячеек ($3 \times 3 \times 3$)				2.1
64 элементарные ячейки ($4 \times 4 \times 4$)				2.8

второй – разрушению, обусловленному наличием концевых групп, и третий – разрушению основной цепи. Исследование пленок ПММА, перенесенных при трении на стальное контртело, показало, что наблюдается смещение второго масс-спектрометрического пика в сторону низких температур [17], являющееся одним из признаков образования ковалентной связи ПММА–фуллерен. То, что смещается именно второй пик, указывает на ковалентное присоединение C_{60} к концу радикала (макромолекулы). Таким образом, предположение об образовании ковалентных связей между частицами наполнителя и матрицей ПТФЭ в исследуемых образцах выглядит достаточно правдоподобным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06-08-00910-а), Отделения энергетики, механики, машиностроения и проблем управления РАН (программа фундаментальных исследований № 13), Отделения физических наук РАН (программа “Новые материалы и структуры”), Санкт-Петербургского научного центра и

Международного научно-технического центра (проект Т-1145).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тренис, изнашивание и смазка. Справочник / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Аликина. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1.
2. Применение полиолефинов, полистиролов, фторопластов и поливинилацетатных пластиков: Каталог ОНПО “Пластполимер”. Черкассы: Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований, 1981.
3. Полимеры в узлах трения машин и приборов. Справочник / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988.
4. Гинзбург Б.М., Киреев О.Ф., Байдакова М.В., Соловьев В.А. // Журн. техн. физики. 1999. Т. 69. № 11. С. 113.
5. Гинзбург Б.М., Байдакова М.В., Киреев О.Ф., Точильников Д.Г., Шепелевский А.А. // Журн. техн. физики. 2000. Т. 70. № 12. С. 87.
6. Пат. 2234457 Россия. 2001.
7. Smith W.V. // Wear. 1973. V. 25. № 1. P. 139.

8. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебда, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. Т. 1.
9. Тоцильников Д.Г., Гинзбург Б.М. // Вопросы материаловедения. 2002. Т. 31. № 3. С. 39.
10. Китайгородский А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1952. С. 130.
11. Гинье А. Рентгенография кристаллов / Пер. с франц. под ред. Н.В. Белова. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961.
12. Козырев С.В., Роткин В.В. // Физика и техника полупроводников. 1993. Т. 27. № 9. С. 1409.
13. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // Успехи физ. наук. 1993. Т. 163. № 2. С. 33.
14. Королев Ю.М., Козлов В.В., Поликарпов В.М., Антипов Е.М. // Высокомолек. соед. А. 2001. Т. 43. № 11. С. 1933.
15. Мошнев В.В., Гаришин О.К. // Успехи механики. 2005. Т. 3. № 2. С. 3.
16. Ginzburg B.M., Shibaev L.A., Melenevskaja E.Yu., Pozdnjakov A.O., Pozdnjakov O.F., Ugolkov V.L., Sidorovich A.V., Smirnov A.S., Leksovskii A.M. // J. Macromol. Sci. Phys. 2004. V. 43. № 6. P. 1193.
17. Поздняков А.О., Гинзбург Б.М., Иванов М.А., Степанов С.В., Поздняков О.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 11. С. 26.
18. Шибаев Л.А., Антонова Т.А., Виноградова Л.В., Гинзбург Б.М., Эгонник В.И., Меленевская Е.Ю. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 81.

Tribological Characteristics of Composites Based on Poly(tetrafluoroethylene) and Fullerene Carbon

B. M. Ginzburg^a, A. O. Pozdnyakov^a, D. G. Tochil'nikov^a,
Sh. Tychiev^b, and A. A. Shepelevskii^a

^a Institute of Problems in Machine Science, Russian Academy of Sciences,
Bol'shoi pr. 61, St. Petersburg, 199178 Russia

^b Tajik State National University,
pr. Rudaki 17, Dushanbe, 734025 Tajikistan
e-mail: ginzburg@tribol.ipme.ru

Abstract—The effect of fullerene carbon fillers on the antifriction characteristics and wear resistance of PTFE during its sliding friction on steel and water lubrication has been studied. The structures of the modified PTFE and the fullerene carbon filler are analyzed by small-angle and wide-angle X-ray diffraction. The hypothetical mechanism of reinforcing effect provided by the fullerene carbon filler during friction is proposed.