

05;07;12

Влияние ориентации волокон на образование микротрещин в волокнистом полимерном композите при трении

© В.И. Веттегрень, А.И. Ляшков, И.П. Щербаков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 20 апреля 2010 г.)

Методом триболоминесценции (ТЛ) проведены исследования образования микротрещин при сухом трении скольжения по стали полифениленсульфида (PPS) и композита (СМ) с матрицей из PPS, армированной угольной тканью. Установлено, что когда слои ткани расположены параллельно плоскости скольжения, количество и линейные размеры микротрещин больше, чем в PPS. При перпендикулярном расположении слоев ткани относительно плоскости скольжения, наоборот, количество, линейные размеры микротрещин меньше, чем в PPS. Эти эффекты объяснены образованием граничных слоев матрицы, молекулы в которых ориентированы параллельно оси волокон в ткани.

В настоящее время для создания деталей, работающих в узлах сухого трения, используются композиты (СМ) на основе полимерной матрицы, армированной полимерными волокнами. Их разрушение при трении идет путем накопления микротрещин [1–7]. Этот процесс ранее был исследован методами электронной микроскопии, акустической эмиссии и рамановской спектроскопии [3–6]. Недавно было обнаружено, что за образованием и ростом трещин в кристаллах и полимерах также можно следить, анализируя форму и интенсивность вспышек триболоминесценции (ТЛ) [7,8]. Для исследования динамики микротрещин, образующихся в полимерных композитах при трении, этот метод не применялся.

Цель настоящей работы — исследование методом ТЛ динамики микротрещин, образующихся в процессе трения в полифениленсульфиде (PPS) и СМ с матрицей из PPS, армированной тканью из углеродных волокон.

Методика эксперимента

Для исследований использовали PPS и СМ с матрицей из PPS, в которых слои угольной ткани УРАЛ-Т15-Р располагались параллельно, перпендикулярно или хаотично относительно плоскости скольжения. Композит изготавливали по технологии, позволяющей проводить пропитку тканей при высокой вязкости расплава [9].

Образцы имели вид прямоугольных пластинок с линейными размерами $17 \times 24 \times 9$ мм, в которых среднее расстояние между слоями ткани составляло ≈ 150 мкм.

Конструкция установки, для изучения ТЛ схематически представлена на рис. 1. Образцы помещали между двумя зажимами и прижимали к стальному валу. Контактное давление составляло ≈ 0.1 МПа. Частота вращения вала — 27 ГГц. Возникающее излучение через световод направляли на фотоэлектронный умножитель РЕМ-136, электрические сигналы с которого поступали на один из входов аналого-цифрового преобразователя (ADC) ASK-3106 фирмы „АКТАКОМ“. Напряжение на

его выходе, пропорциональное числу квантов, попавших на катод РЕМ-136 через каждые 10 ns, записывалось в память компьютера. Для каждого из образцов было проведено 10 измерений временных зависимостей интенсивности ТЛ. Каждое измерение длилось 1.3 ms со временем оцифровки 10 ns. Полученные результаты усреднялись. (Чтобы выяснить природу центров ТЛ, между образцом и РЕМ-136 располагали монохроматор SPM-2, который с помощью шагового двигателя, управляемого компьютером, осуществлял развертку по длинам волн).

Результаты измерений

На рис. 2 показан спектр ТЛ PPS. Интенсивная полоса в этом спектре — 2.31 eV, согласно [10], может быть приписана переходу $\pi^* \rightarrow \pi$ в ароматическом кольце вблизи от свободного радикала, образующегося при разрывах связи между атомами углерода и серы в молекуле PPS. Это означает, что интенсивность ТЛ пропорциональна числу „разорванных“ химических связей в молекуле PPS.

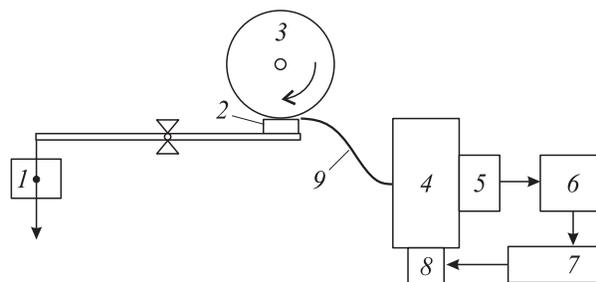


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для изучения ТЛ при сухом трении: 1 — груз, 2 — исследуемый образец, 3 — стальной вал, 4 — монохроматор, 5 — ФЭУ, 6 — ADC, 7 — компьютер, 8 — шаговый двигатель, 9 — кварцевый световод.

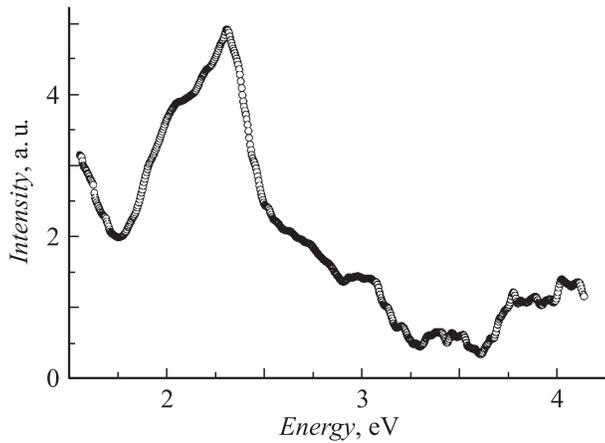


Рис. 2. Спектр TL PPS.

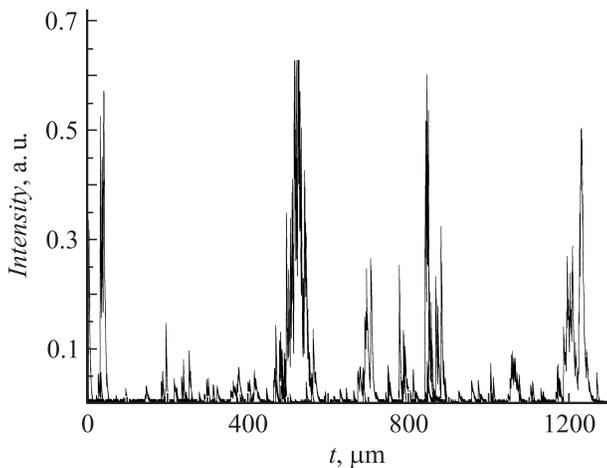


Рис. 3. Временная зависимость интенсивности TL при трении PPS о стальной вал.

Временная зависимость интенсивности TL при трении о стальной вал пластинок из PPS показана на рис. 3. Аналогичным образом выглядели временные зависимости интенсивности TL при трении СМ. Они представляют собой ряд вспышек одинаковой формы: сначала в течение 10 ns, интенсивность I росла линейно от времени t , а затем уменьшалась экспоненциально от него ($I = I_m \exp(-t/\tau)$), I_m — максимальное значение интенсивности вспышки, а $\tau = 30$ ns — среднее время ее уменьшения). Неизменность формы вспышек обусловлена особенностями конструкции прибора. Минимальное время отработки современных РЕМ ≈ 10 ns и измерить временную зависимость вспышек люминесценции за меньшее время невозможно. Среднее значение τ задано разрядкой паразитной емкости через сопротивление нагрузки на его выходе и в нашей установке составило 30 ns. Таким образом, примененная нами конструкция прибора не позволила изучить форму вспышек люминесценции. Можно было лишь зарегистрировать их появление.

Известно [1,2], что „разорванные“ химические связи в полимерах располагаются в основном на берегах микротрещин. Это дает основание приписать вспышки

TL рождению микротрещин. Тогда их максимальная интенсивность линейно связана с площадью поверхности трещин.

Образцы PPS имели темно коричневый, а СМ — черный цвет. Поэтому методом TL регистрируются микротрещины, образующиеся в поверхностном слое. Оценим их размер. Скорость роста трещин задана скоростью S волн деформации. Измерения показали [8], что $S \approx 0.5$ km/s, что дает линейный размер $L \approx St = 5 \mu\text{m}$. Анализ поверхности образцов PPS с помощью оптического микроскопа показал, что после удара на ней действительно формируются трещины размером до десятков микрометров.

Вспышки TL, как правило, накладываются друг на друга, что затрудняет анализ распределения их амплитуд. Чтобы построить временную зависимость амплитуд, их дифференцировали по времени. Поскольку время роста интенсивности каждой вспышки одинаково, производная ее интенсивности по времени пропорциональна площади S_f трещин:

$$dI/dt = I_m \approx qS_f,$$

где q — коэффициент пропорциональности.

Средняя величина dI/dt вспышек люминесценции от поверхностного слоя PPS $\approx 2 \cdot 10^7$ (V/s). Так как средний линейный размер трещин составляет $5 \mu\text{m}$, то их средняя площадь $\approx 20 \mu\text{m}^2$. Отсюда $q \approx 1 \cdot 10^6$ V/s(μm^2) и линейный размер микротрещин можно оценить как

$$L \approx 10^{-3} \sqrt{(dI/dt)}.$$

Временные зависимости линейных размеров микротрещин приведены на рис. 4. С их использованием найдено среднее число N микротрещин, образующихся в образцах за 1.3 ms, их максимальный L_{max} и средний $\langle L \rangle$ размеры, а также среднее время τ_{cr} между моментами их образования. Результаты приведены в таблице. Из нее видно, что когда слои угольной ткани расположены параллельно плоскости скольжения количество образующихся микротрещин в ≈ 4 раза, а их средний и максимальный размеры — в ≈ 2 раза больше, чем в PPS. В то же время среднее время между актами образования микротрещин в композите в ≈ 4 раза меньше, чем в PPS.

При перпендикулярном расположении угольной ткани относительно плоскости скольжения, наоборот, количество трещин и их размеры уменьшились, а среднее время между актами их образования увеличилось в ≈ 5 раз по сравнению со значениями этих характеристик в PPS.

Среднее число трещин, образующихся при трении в образцах за 1.3 ms, диаметры: максимальный — D_{max} и средний $\langle D \rangle$, а также среднее время τ_{cr} между их образованием

| Материал | Ориентация волокон относительно плоскости скольжения | N , pcs. | τ_{cr} , μs | D_{max} , μm | $\langle D \rangle$, μm |
|----------|--|------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| PPS | | 160 | 8 | 10 | 5 |
| Композит | разориентированы | 50 | 25 | 6 | 3 |
| | параллельная | 600 | 2 | 25 | 10 |
| | перпендикулярная | 30 | 50 | 10 | 1 |

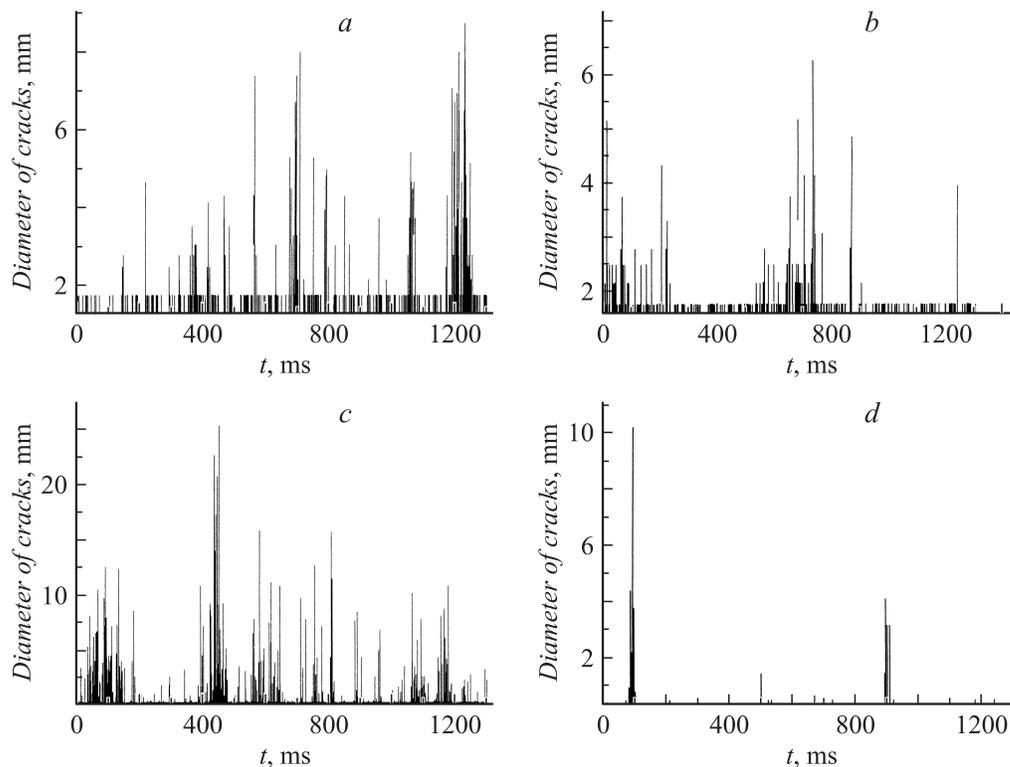


Рис. 4. Типичные временные зависимости диаметров микротрещин, образующихся в PPS (*a*) и СМ (*b, c, d*) при трении о стальной вал за 1.3 ms. Расположение волокон относительно плоскости скольжения: *b* — беспорядочное; *c* — параллельное, *d* — перпендикулярное.

Когда угольные волокна располагаются хаотично относительно плоскости скольжения, количество трещин в композите меньше в ≈ 3 раза и их средний и максимальный диаметры меньше в ≈ 2 раза, чем в PPS.

Обсуждение результатов

При трении исследуемые образцы подвергаются воздействию касательных напряжений. Прочность PPS на изгиб составляет ≈ 100 МПа, а угольных волокон — на порядок больше — ≈ 2 ГПа. По этой причине при трении трещины образуются в матрице [3–5].

Известно [11–13], что при образовании композита вокруг волокон формируются граничные слои матрицы, молекулы в которых ориентированы параллельно оси волокон. Прочность таких слоев в направлении, перпендикулярном оси волокон, выше [13], а параллельном — ниже, чем имела матрица до образования композита. Это ведет к росту числа и длины трещин при параллельном и их уменьшению — при перпендикулярном расположении слоев ткани относительно плоскости скольжения.

Таким образом, ориентация молекул матрицы в граничных слоях с волокнами оказывает существенное влияние как на число, так и на размеры микротрещин, образующихся в композитах при трении.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-00256-а).

Список литературы

- [1] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [2] Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб: Политехника, 1993. 475 с.
- [3] Leksovskij A., Baschkin B.L., Tichkin A.P., Abdulmanov A. // Solid State Phenom. 2008. Vol. 137. P. 9–14.
- [4] Юдин В.Е., Лексовский А.М. // ФТГ. 2005. Т. 47. Вып. 5ю С. 944–950.
- [5] Лексовский А.М., Гаврилин А.В., Баскин Б.Л. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 5. С. 46–53.
- [6] Katerelos D.G., Galiotis C. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. N 17. P. 3752–3754.
- [7] Веттегрень В.И., Савицкий А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И. Вопросы материаловедения. 2009. Т. 57. /No 1. С. 141–145.
- [8] Веттегрень В.И., Ляшков А.И., Щербаков И.П. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 155–158.
- [9] Савицкий А.В., Ляшков А.И., Горикова И.А. // Пластические массы. 1995. № 3. С. 14–15.
- [10] Yamaji M., Wakabayashi S., Tobita S. // Res. Chem. Intermed. 2006. Vol. 32. N 8. P. 749–758.
- [11] Семенович Г.М. Структура и свойства поверхностных слоев полимеров. Киев: Наук. думка, 1972. 258 с.
- [12] Gabaraeva A.D., Regel V.R., Filipov N.N., Leksovskij A.M. // Faserforschung und Textiltechnik. 1978. Bd 29. N. 1. S. 13–21.
- [13] Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Суслов М.А. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 135–138.