

05

Зависимость коэффициента трения одномерно армированного волокнистого композита от свойств матрицы

© В.И. Веттегрень, А.В. Савицкий, А.И. Ляшков, Р.И. Мамалимов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 2 апреля 2008 г.

Измерены коэффициенты сухого трения покоя μ_0 и скольжения μ_s матриц и волокон различных полимеров, а также однонаправленного композита с нитями из волокон полиамидбензимидазола (РАВІ) по шлифованной пластине из закаленной стали. Установлено, что для матриц и волокон, температура стеклования T_g которых ниже комнатной, T_R , $\mu_0 > \mu_s$, в противном случае $\mu_0 \approx \mu_s$. Этот эффект объясняется резким увеличением податливости полимеров при T_g , приводящим к увеличению площади их контакта с поверхностью стали. Для композита при $T_g > T_R$ $\mu_0 \approx \mu_s \approx \mu_e/C$, где μ_e — коэффициент скольжения торцов нитей РАВІ, а C — их концентрация. Когда $T_g < T_R$ (матрица податлива) коэффициенты трения композита и матрицы близки, т.к. она не способна удержать концы волокон при трении. В результате они укладываются вдоль поверхности матрицы или утапливаются в ее поверхностном слое.

PACS: 62.20.Qr

В настоящее время для создания деталей, работающих в узлах сухого трения, используются полимерные материалы, наполненные порошками или отрезками волокон. Перспективными для этой цели являются волокнистые композиты, обладающие высокими прочностью и износостойкостью. В последние 5 лет в литературе появились работы [1–11], в которых изучается, как влияет концентрация различных волокон на изнашивание и коэффициент трения композитов. Однако вопрос о влиянии матрицы на триботехнические свойства волокнистых композитов остается открытым.

Цель настоящей работы — исследование влияния матрицы на коэффициент трения однонаправленных композитов, наполненных высокопрочными волокнами из полиамидбензимидазола (РАВІ). Исполь-

Таблица 1. Коэффициенты трения изотропных матриц

№ п/п	Полимер	μ_0	μ_s	T_g , К
1	PTFE	0.15	0.07	150
2	PE	0.26	0.24	250
3	PP	0.062	0.05	270
4	РА-6-10	0.10	0.09	320
5	РА-6	0.12	0.12	340
6	PET	0.24	0.24	350

Таблица 2. Коэффициенты трения боковой поверхности волокон в направлении, параллельном их оси

№ п/п	Волокно	μ_0	μ_s
1	PTFE	0.1	0.05
2	РА-6	0.16	0.15
4	РАVI	0.27	0.27

зование однонаправленного композита позволило упростить анализ полученных данных и выяснить природу изменения коэффициента трения композита при изменении матрицы.

Измеряли коэффициент сухого трения следующих матриц: политетрафторэтилена (PTFE), полиэтилена (PE), полипропилена (PP), полиамида 6 (РА-6), полиамида 6-10 (РА-6-10) и полиэтилентерефталата (PET) (табл. 1). С этой целью из них готовили стержни длиной 1 см и диаметром ≈ 4 мм. Для измерения коэффициента трения боковой поверхности волокон (табл. 2) параллельно их оси слой из нитей наклеивали на пластинку из алюминия. Чтобы ценить величину коэффициента трения торцов волокон РАVI, нити из них пропитывали матрицами при высоких температурах (методика описана в [12]) и готовили стержни, таких же размеров, как из матриц. Оба конца стержней шлифовали алмазным кругом. Затем один из концов стержней протирали не каландрированной фенелоновой бумагой. При протирке удавалось удалить частицы разрушенной матрицы, оставив нетронутыми концы нитей. В результате получали поверхность, из которой выходили торцы нитей длиной $\approx 20-50$ μm и диаметром

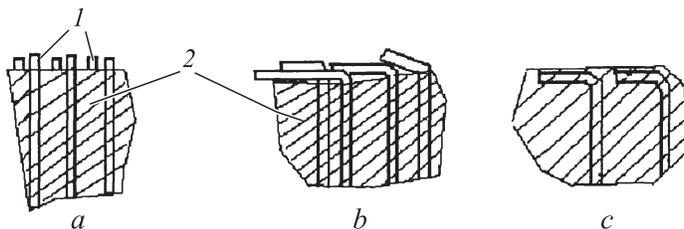


Рис. 1. Схема расположения торцов волокон РАВІ (1) на поверхности матрицы (2) в зависимости от ее пластичности: *a* — матрица жесткая ($T_g > T_R$); *b* — пластичность матрицы не очень высока ($T_g > T_R$ меньше, чем на 50 К), *c* — пластичность матрицы высока ($T_g < T_R$ более, чем на 50 К).

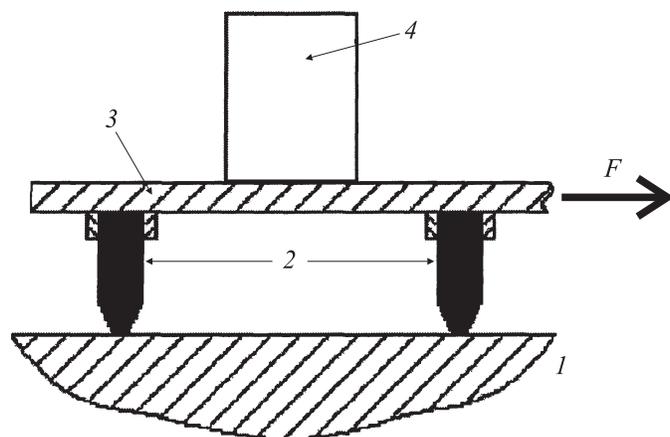


Рис. 2. Фрагмент установки для измерения коэффициента трения: 1 — пластина из стали 45; 2 — образцы из матрицы или композита, укрепленные на алюминиевой пластинке — 3, 4 — груз.

$\approx 30 \mu\text{m}$ (рис. 1, *a*). Стержни устанавливали в держатели, укрепленные на алюминиевой пластинке, перпендикулярно к ее поверхности (рис. 2).

Коэффициенты трения при комнатной температуре измеряли на построенной в лаборатории установке, которая схематически изображена на рис. 2. Алюминиевые пластинки (2) с образцами волокон или

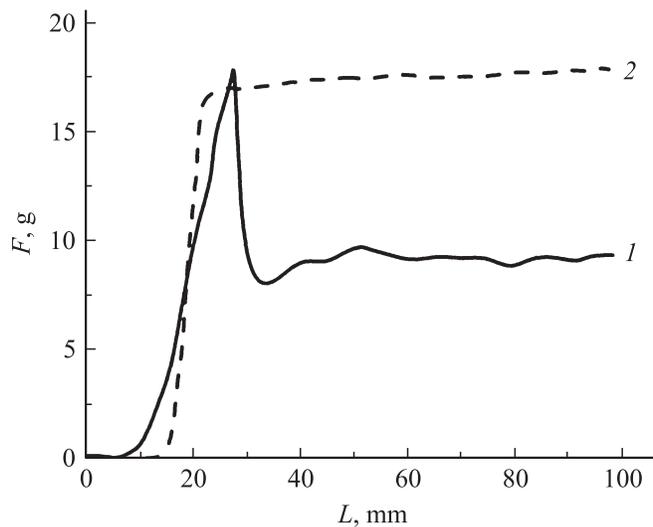


Рис. 3. Зависимость силы от пути трения различных матриц: 1 — PTFE ($T_g < T_R$ на 140 К), $P = 0.3$ МПа; 2 — PA-6 ($T_g > T_R$ на 60 К), $P = 0.8$ МПа.

стержней, на которые помещали груз (3), перемещали со скоростью ≈ 0.2 см/с по шлифованной пластине из стали 45. Усилие перемещения регистрировали тензодатчиком и записывали на самописце.

На рис. 3 показаны примеры зависимостей силы трения F матриц от пути L . Такие же зависимости были получены для боковой поверхности волокон. Их можно условно разделить на две группы. Для первой в начале пути сила трения возрастает, достигает значения F_0 , затем уменьшается до квазистационарного значения F_s , т.е. коэффициент трения покоя $\mu_0 = F_0/P$, где P — сила нормального давления, больше, чем коэффициент трения скольжения $\mu_s = F_s/P$. Во вторую группу отнесены образцы, для которых $F_0 \approx F_s$, т.е. $\mu_0 \approx \mu_s$.

Известно, что усилие, необходимое для движения образца по контртелу, затрачивается на разрыв адгезионных связей между поверхностями трущихся тел. Возможны два случая.

В первом случае скорость образования адгезионных связей больше скорости, с которой тела перемещаются относительно друг друга. В начале

пути коэффициент трения увеличивается до значения μ_0 , соответствующего прочности адгезионных связей. После их разрыва устанавливается равновесие между числом образующихся и распадающихся связей. В результате коэффициент трения уменьшается до μ_s .

Во втором случае скорость образования адгезионных связей близка к скорости перемещения трущихся тел, и $\mu_0 \approx \mu_s$.

Оказалось, что для матриц и волокон первой группы температура T_g ниже T_R , а второй — выше (табл. 1, значения T_g взяты из работ [13,14]). Известно, что при температуре стеклования пластическая деформация полимеров под давлением резко возрастает. По этой причине возрастают площадь контакта матриц со сталью и адгезионное взаимодействие между ними, что обуславливает увеличение коэффициента μ_0 . Однако пластическая деформация полимера развивается не мгновенно, а со скоростью, которая зависит от температуры и давления. Поэтому после начала движения площадь адгезионного контакта уменьшается, что и проявляется в уменьшении коэффициента трения до μ_s . Для матриц и волокон второй группы податливость и площадь контакта между полимером и металлом остаются практически неизменными и $\mu_0 \approx \mu_s$.

Измерение коэффициента трения торцов волокон РАВІ представляет собой более трудную задачу. Если $T_g < T_R$, то матрица пластически деформируется, выходящие из нее торцы нитей изгибаются и покрывают поверхность (рис. 1, *b*) или частично утапливаются в ней (рис. 1, *c*). В противном случае матрица жесткая, и торцы нитей практически не изгибаются (рис. 1, *a*). В этих условиях, зная концентрацию волокон C , можно оценить величину коэффициента трения торцов волокон: $\mu_e \approx \mu_c \cdot C$, где μ_c — коэффициент трения композита. Например, для образцов с матрицами из РА-6 и РЕТ ($T_g > T_R$), концентрация волокон РАВІ в которых ≈ 39 и $\approx 32\%$, нашли, что $\mu_c \approx 0.06$ и ≈ 0.07 соответственно. Оценка коэффициента трения торцов волокон РАВІ в этом случае дала $\mu \approx 0.02$.

Перейдем теперь к рассмотрению вопроса о коэффициенте трения композита. Анализ (табл. 3) показал, что его величина зависит от температуры стеклования матрицы: если $T_g > T_R$, то $\mu_c \approx \mu_e/C$ (№№ образцов 1–3); если $T_g < T_R$, то μ_c может иметь три значения в зависимости от величины пластической деформации матрицы. Если разница между T_g и T_R не превышает 2–3 десятков градусов, то концы нитей при движении композита, как правило, укладываются вдоль ее поверхности (рис. 1, *b*). В этом случае коэффициенты трения

Таблица 3. Коэффициенты трения однонаправленных композитов с волокнами из PAB1

№	Матрица	P , МПа	μ_{0c}	μ_{sc}	Концентрация нитей, %
1	РЕТ	230	0.07	0.07	32
2	РА-6	12.2	0.11	0.06	39
3	РА-6-10	145	0.13	0.13	36
4	РЕ	27.5	0.26	0.22	30
5	PTFE	46	0.10	0.05	35
6	PP	?	0.15	0.15	36

покоя и скольжения композита близки к их значениям для боковой поверхности волокон (образец № 4). Если разница между T_g и T_R больше 50° , матрица обладает высокой пластичностью, и при движении нити утапливаются в ее поверхностном слое (рис. 1, *c*). Тогда коэффициенты трения покоя и скольжения композитов и матриц близки (образец № 5). Наконец, возможен вариант, когда нити частично утоплены в поверхностном слое матрицы. В этом случае μ_c имеют значение промежуточные между коэффициентами трения боковой поверхности волокон и матрицы (образец № 6).

Таким образом, величина коэффициентов трения и скольжения одномерного волокнистого композита определяется пластичностью полимерной матрицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 07-08-13533-офи_ц.

Список литературы

- [1] Satapathy B.K., Bijwe J. // *Wear*. 2004. V. 257. P. 573–584.
- [2] Wu J., Cheng X.H. // *Wear*. 2006. V. 261. P. 1293–1297.
- [3] Pihlilä H., Tosun N. // *Wear*. 2002. V. 252. P. 979–984.
- [4] Satapathy B.K., Bijwe J. // *Composites (A)* 2006. V. 37. P. 1557–1567.
- [5] Bijwe J., Awtade S., Ghosh A. // *Wear*. 2006. V. 260. P. 401–411.
- [6] Mody P.B., Chou T.W., Friedrich K., Mater J. Sci. // 1988. V. 23. P. 4319–4330.
- [7] Rajesh J.J., Bijwe J., Tewari U.S., Mater J. Sci. // 2001. V. 36. P. 351–356.
- [8] Lhymn C. // *Wear*. 1987. V. 117. P. 147–159.

- [9] *Unal H., Mimaroglu A.* // J. Reinforced Plastics and Composites. 2006. V. 25. N 16. P. 1659–1667.
- [10] *Theiler G., Hübner W., Gradt Th., Klein P.* // Materialwissenschaft and Werkstofftechnik 2004. V. 35. Is. 10–11. P. 683–689.
- [11] *Marsha P., Tewari U.S.* // J. Reinforced Plastics and Composite. 2004. V. 23. N 1. P. 65–82.
- [12] *Савицкий А.В., Ляшков А.И.* / Устройство для пропитки ленточного волокнистого материала. Патент РФ № 2054355, 24.08.1990.
- [13] *Bersten V.A., Egorov V.M.* Differential Scanning Calorimetry of Polymers. NY: Ellis Horwood. 1994. 253 p.
- [14] *Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А.* Полиимиды — класс термостойких полимеров. Л.: Наука. 1983. 328 с.