

05

## Определение „контактной“ температуры в зоне трения антифрикционного полимерного покрытия по стали

© В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, А.А. Лебедев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 декабря 2005 г.

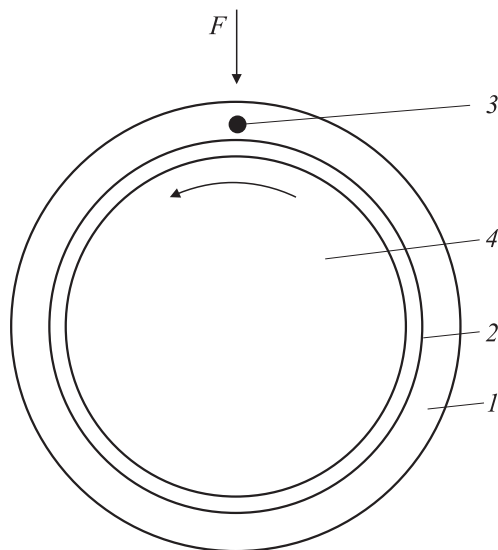
Исследованы временные зависимости температуры при трении антифрикционного покрытия из смеси полиамидов 6.6 (РА 6.6) и 6 (РА 6) по стали 45. На фоне монотонного роста температуры, измеренной термопарой на расстоянии  $\approx 1.5$  mm от зоны трения, наблюдали два участка  $T_1$  и  $T_2$ , в окрестности которых температура стабилизируется, а затем вновь увеличивается. Оказалось, что значения этих температур близки к температурам стеклования РА 6.6 и РА 6. Появление участков объяснено резким увеличением затрат энергии трения на сегментальную подвижность при температурах стеклования. Сравнив значения  $T$  и  $T_2$  с температурами стеклования, нашли, что „контактная“ температура в зоне трения на  $10\text{--}20^\circ$  превышает температуру, измеренную термопарой.

PACS: 81.40.Pq

Одним из перспективных путей увеличения срока службы подшипников скольжения в узлах трения является применение антифрикционных полимерных покрытий [1–7]. При этом существенно увеличивается надежность и долговечность узлов трения и сокращаются расходы на их эксплуатацию и ремонт.

В последнее время для изготовления покрытий используют дешевые серийно выпускаемые полиамиды: РА 5.4, РА 6, РА 6.6 и др. По износостойкости покрытия из этих полимеров значительно превосходят втулки из антифрикционных металлов и сплавов. В связи с этим особый интерес приобрел вопрос о кинетике износа и долговечности таких покрытий.

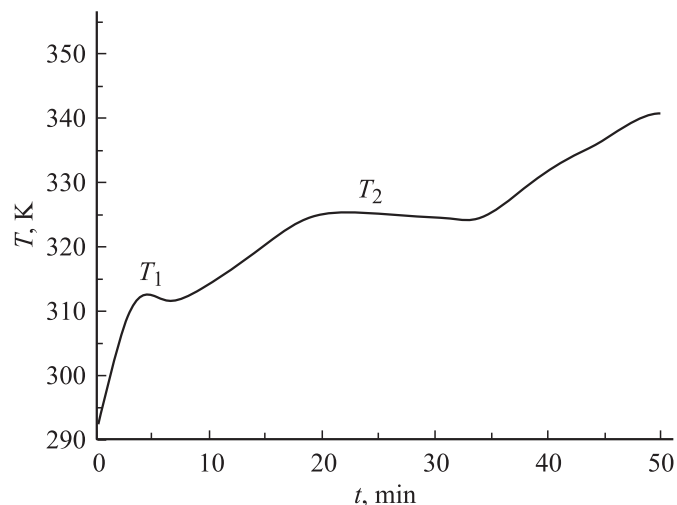
Согласно современным представлениям [8–12], в основе кинетики износа лежит процесс разрыва межатомных связей под действием тер-



**Рис. 1.** Схематическое изображение узла трения. На втулку из стали 45 (1) нанесено покрытие (2) толщиной 0.3 мм из смеси полиамидов PA 6.6 и PA 6. Стрелкой показано направление вращения вала (4) из стали 45. Температура измеряется термопарой (3) на расстоянии  $\approx 1.5$  мм от зоны трения. Нагрузка  $F$  направлена сверху вниз.

мических флуктуаций, поэтому для определения долговечности необходимо уметь определять „контактную“ температуру в зоне трения. До последнего времени ее оценивали при помощи сложных расчетов, требующих знания формы, твердости и коэффициентов теплопроводности трущихся тел [10,13–16]. В данной работе описан экспериментальный метод определения контактной температуры при трении полимера по стали. Он основан на сопоставлении значений температур, измеренных с помощью термопары на некотором расстоянии от зоны трения, с температурами релаксационных переходов.

**Методика эксперимента.** Исследования проводились на лабораторном стенде, имитирующем узел трения транспортных и строительных машин. На рабочую поверхность втулки из расплава наносились покрытия толщиной  $\approx 0.3$  мм из смеси полимеров PA 6.6 и PA 6 (рис. 1). Материал втулки — сталь 45. Частота вращения вала составляла  $\approx 25$  s<sup>-1</sup>. При различных нагрузках  $F$  (рис. 1) изучали временные



**Рис. 2.** Фрагмент временной зависимости температуры под нагрузкой  $F = 120$  kg.

зависимости температуры в отверстии диаметром 1 mm, просверленном в стальной втулке на расстоянии 2 mm от границы между металлом и полимером. Температуру измеряли при помощи хромель-копелевой термопары.

**Результаты измерений.** На рис. 2 показан участок временной зависимости температуры под нагрузкой  $\approx 120$  kg. На нем наблюдается два участка, в окрестности которых температура остается приблизительно постоянной: первый при  $T_1 \approx 312$  K и второй — при  $T_2 \approx 325$  K. При других нагрузках наблюдалось такое же явление: когда температура достигала 310–315 или 320–330 K, то в течение некоторого промежутка времени (5–20 min) она стабилизировалась, а затем вновь увеличивалась.

**Обсуждение результатов.** Для выяснения причины появления участков, в которых температура в течение некоторого времени остается неизменной, сравним ее значения с температурами стеклования  $T_g$  РА 6.6 и РА 6.

Измерения при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии при скорости нагрева 2.5–40 grad/min [17] дали значение  $T_g$  для

РА 6: 330–350 К. Оно согласуется с данными, приведенными в [18]:  $T_g = 340$  К.

Чтобы определить температуру стеклования РА 6.6 изучали температурные зависимости полос регулярности в инфракрасных (ИК) спектрах и модуля Юнга РА 6.6 при растяжении со скоростью  $\approx 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  и при динамических испытаниях с частотой  $\approx 100$  Hz. Были получены следующие значения: из данных ИК-спектроскопии и при растяжении —  $T_g \approx 315$  К, а при динамических испытаниях  $T_g \approx 320$  К, которая совпадает с приведенной в [18] —  $T_g = 320$  К.

Таким образом, значение  $T_1$  приблизительно на  $5\text{--}10^\circ$  ниже  $T_g$  для РА 6.6, а  $T_2$  — на  $\approx 15\text{--}20^\circ$  меньше температуры стеклования РА 6. Известно, что при температуре стеклования возникает сегментальная подвижность в аморфных областях полимеров, поэтому появление рассматриваемых участков на временных зависимостях температуры можно объяснить резким увеличением энергии трения на возбуждение сегментальной подвижности молекул полимеров при температурах стеклования РА 6 и РА 6.6. Такое объяснение позволяет оценить „контактную“ температуру в зоне трения полиамидного покрытия по стали: она отличается от температуры, измеренной термопарой, не более чем на  $\approx 10\text{--}20^\circ$ .

Предварительные опыты показали, что температура в зоне трения других полимеров (ароматических полиамидов и полигетероариленов) по сталям также не превышает  $5\text{--}10$  К от значения, измеренного термопарой на расстояниях  $2\text{--}5$  мм от нее. Этот результат согласуется с результатами оценки температур в зоне трения по спектрам люминесценции [19,20]. Он открывает возможности экспериментальной оценки „контактных“ температур в зоне трения, используя показания термопар.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-01216а).

## Список литературы

- [1] *Белый В.А., Довгяло В.А., Юркевич О.Р.* Полимерные покрытия. Минск: Наука и техника, 1976. 416 с.
- [2] *Башкарев А.Я., Миронов Н.И., Семенов В.П.* Пластмассы в строительных и землеройных машинах. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1981. 191 с.
- [3] *Чичнадзе А.В.* Полимеры в узлах трения машин и приборов. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

- [4] *Vadasz Emil*. Gepalkatreszek gyartasa es javitasa muanyagbevonattal. Muszaki Konyvkiado. Budapest, 1978. 320 p.
- [5] *Шестаков В.М.* Работоспособность тонкослойных полимерных покрытий. М.: Машиностроение, 1973. 160 с.
- [6] *Платонов В.Ф.* Подшипники из полиамидов. М.: Машгиз, 1961. 112 с.
- [7] *Гепель С.Б., Белый В.А., Булгаков В.Я., Гехтман Г.А.* Применение полимерных материалов в качестве покрытий. М.: Химия, 1968. 238 с.
- [8] *Ратнер С.Б.* // Докл. АН СССР. 1963. Т. 150. № 4. С. 150–154.
- [9] *Ратнер С.Б., Лурье Е.Г.* // Докл. АН СССР. 1966. Т. 166. № 4. С. 909–913.
- [10] *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 826 с.
- [11] *Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Суслов М.А.* // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 9. С. 1619–1624.
- [12] *Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.* Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
- [13] *Uefz H.* // *Verstoffe und Korrosion*. 1968. Heft 8. S. 665–676.
- [14] *Uefz H., Breckel H.* // *Wear*. 1967. V. 10. P. 185–198.
- [15] *Uefz H., Feohl J.* // *VDI-Berichte*. 1973. N 194. S. 57–68.
- [16] *Uefz H., Feohl J.* // *Schmiertechnik u. Tribologie*. 1974. Bd. 27. N 6. S. 141–144.
- [17] *Берштейн В.А., Егоров В.М.* Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. Л.: Химия, 1990. 256 с.
- [18] *Alger, Mark S.M.* *Polymer science dictionary*. N.Y.: Elsevier Applied Science, 1989. 532 p.
- [19] *Тохметов А.Т., Веттегрень В.И.* // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 1. С. 33–37.
- [20] *Тохметов А.Т., Веттегрень В.И.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 20. С. 1895–1898.