



ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗНАШИВАНИЯ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Мадаминов Н.З.

Андижанский государственный технический институт

Аннотация. Исследована топография поверхностей изнашивания композитов на основе высокомолекулярного полиэтилена PE1000 с ZrO_2 и углеродными нанотрубками (УНТ) при изнашивании незакреплённым абразивом по адаптированной схеме ГОСТ 23.208-79 и при трении по стали 45 по схеме «шарик – диск». Выделены механизмы микрорезания, пластического оттеснения и расслаивания поверхностного слоя. При трении по стали введение 25 масс. % УНТ уменьшает площадь износа дорожки в 2,3 раза, тогда как при абразивном изнашивании износ составов с УНТ в 1,6–1,8 раза выше, чем у матрицы; следовательно, ранжирование составов по износостойкости зависит от схемы испытаний.

Износостойкость полимерного композита не является его постоянной характеристикой: один и тот же материал может по-разному вести себя при изнашивании незакреплёнными абразивными частицами и при сухом трении по стали. Поэтому сведения о строении поверхностей трения необходимы для того, чтобы связать результаты испытаний с действующим механизмом разрушения и обоснованно сравнивать составы. В работе исследованы поверхности изнашивания композитов на основе высокомолекулярного полиэтилена PE1000 марки ТНХК с диоксидом циркония и с углеродным наполнителем, содержащим многостенные нанотрубки (УНТ).



Использованы две схемы. Композиты с 1–20 масс. % ZrO_2 испытывали на изнашивание порошком Al_2O_3 (основная фракция 40–71 мкм) по адаптированной схеме ГОСТ 23.208-79 в течение 90 мин; поверхности исследовали методом оптической микроскопии. Композиты с 0–25 масс. % УНТ испытывали по схеме «шарик – диск» (ASTM G99) в паре со сталью 45 твёрдостью 45–50 HRC при нагрузке 35 Н, скорости 0,15 м/с и продолжительности 6 ч (путь трения около 3 км) с непрерывной регистрацией коэффициента трения и среднеквадратичного значения (СКЗ) виброускорения. Дорожки износа на полимерном образце исследовали профилометром Mitutoyo CS-5000CNC и методом цифровой микроскопии, пятно износа на стальном шарике – микроскопически.

При абразивном изнашивании поверхность композита с 1 масс. % ZrO_2 изнашивается равномерно, без выраженных борозд и кромок. С увеличением содержания ZrO_2 на поверхности появляются выглаженные участки; их образование можно связать с локальным размягчением полимера в зонах контакта, которое облегчается низкой теплопроводностью материала. Эти наблюдения согласуются с тем, что наименьший износ в данной схеме получен при малом содержании ZrO_2 (0,5–1 масс. %).

При трении по стали дорожка износа на ненаполненном PE1000 содержит продольные бороздки и отдельные лунки, что соответствует микрорезанию и пластическому отеснению полимера неровностями контртела. Такая картина типична для высокомолекулярного полиэтилена: изнашивание протекает в две стадии – пластическое деформирование и разрушение полимера твёрдыми неровностями стали, а затем абразивное действие образовавшихся частиц износа [1, с. 111–113]. С ростом содержания нанотрубок поверхность дорожки становится более рельефной: при 25 масс. % на ней преобладают чешуйчатые



участки отслоения, т. е. к микрорезанию добавляется расслаивание поверхностного слоя, источником которого, вероятно, служат агломераты наполнителя.

Количественные характеристики, определённые по профилограммам и микрофотографиям, приведены на рисунке. Площадь износа дорожки на полимерном образце уменьшается от $\approx 38 \cdot 10^3$ мкм² у ненаполненного PE1000 до $\approx 16 \cdot 10^3$ мкм² при 25 масс. % УНТ, т. е. в 2,3 раза; уже при 5 масс. % она составляет $\approx 18 \cdot 10^3$ мкм². Площадь пятна износа на стальном шарике изменяется мало при 0–10 масс. % (0,83–0,91 мм²) и снижается до 0,66–0,67 мм² при 20–25 масс. %. СКЗ виброускорения уменьшается от 0,18 до 0,14 м/с², что свидетельствует о более стабильном режиме скольжения. Средний за испытание коэффициент трения находится в пределах 0,064–0,090 (у ненаполненного PE1000 $\approx 0,073$) и с концентрацией наполнителя меняется слабо.



Рис. 1. Влияние содержания УНТ на износ полимерного образца по профилограмме (а), площадь пятна износа стального шарика (б) и СКЗ виброускорения (в) при трении по схеме «шарик – диск»

Сопоставление двух схем показывает, что влияние нанотрубок зависит от механизма изнашивания. При трении по стали увеличение их содержания до 25 масс. % снижает износ полимера и уменьшает вибрации



пары, тогда как при изнашивании незакреплённым абразивом массовый износ составов с 5–25 масс. % УНТ за 90 мин в 1,6–1,8 раза выше, чем у ненаполненной матрицы [2]. Вероятная причина состоит в том, что при сухом трении по гладкой стали главную роль играют жёсткость и сопротивление пластическому оттеснению поверхностного слоя, повышающиеся с введением нанотрубок, а при абразивном воздействии – прочность закрепления частиц и сплошность поверхностного слоя, которые ухудшаются из-за агломерации наполнителя.

Таким образом, топография поверхностей трения позволяет различить микрорезание, пластическое оттеснение и расслаивание поверхностного слоя композитов РЕ1000 и объяснить, почему ранжирование составов по износостойкости зависит от схемы испытаний. При выборе наполнителя для конкретного узла трения необходимо ориентироваться на преобладающий в нём механизм изнашивания и подтверждать выбор испытаниями по соответствующей схеме.

Литература

1. Охлопкова Т.А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. – Томск, 2018. – 160 с.
2. Мадаминов Н.З. Исследование влияния на параметр износа композитов увеличения содержания наноразмерных модификаторов // Frontiers of knowledge and interdisciplinary discovery: International scientific online conference. – 2026. – May, Issue 2. – С. 243–247.
3. ASTM G99-23. Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. – West Conshohocken: ASTM International, 2023.