

1. Гулянский, Л.Г. применение эпиламирования для повышения износостойкости изделий // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 4. – С. 672 – 675.
2. Фторсодержащие ингибиторы изнашивания металлополимерных трибосистем / С.В. Авдейчик [и др.]. – Минск, 2011. – 270 с.

**УДК 539.216.2(045)**

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

**Ю. В. Мишук**

*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с опытным производством, Солигорск*

Композиты на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), промышленно производимого под различными торговыми марками: фторопласт-4 (Россия), тефлон (США); а также сополимеров политрифлорэтилена, известного под торговой маркой фторопласт-3 (Россия); поливинилиденфторида, известного под торговой маркой фторопласт-2 (Россия); сополимера тетрафторэтилена с этиленом, известного под торговой маркой фторопласт-40 (Россия); сополимер тетрафторэтилена с винилиденфторидом, производимого под торговой маркой фторопласт-42 (Россия); сополимер тетрафторэтилена с перфторфилилпропиловым эфиром, известного под торговыми марками фторопласт-50 (Россия), тефлон PFA (США), нашли самое широкое применение для создания элементов различных трибосистем, в т.ч. эксплуатируемых под действием экстремальных параметров.

Наибольшее распространение в трибосистемах получили материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), который обладает характерными свойствами, прежде всего, триботехническими [1 – 11]. Вместе с тем, этот материал имеет и ряд существенных особенностей, которые в некоторых условиях эксплуатации могут быть как достоинствами, так и недостатками.

Такой особенностью ПТФЭ является хладотекучесть. Под действием сравнительно небольших напряжений уже при комнатной температуре начинается пластическая (необратимая) деформация, увеличивающаяся с повышением температуры.

Параметры характеристик механических свойств ПТФЭ в значительной мере определяются степенью кристалличности, т.е. содержанием кристаллической фазы в структуре полимера. Степень кристалличности ПТФЭ

зависит от скорости охлаждения при термообработке (спекании) отпрессованных заготовок в интервале температур 593...673 К.

Большинство параметров характеристик механических свойств ПТФЭ с увеличением степени кристалличности ухудшаются: предел прочности при растяжении снижается до 70 %, предел прочности при изгибе – до 10 раз, прочность к удару – в 15 раз. В то же время с увеличением степени кристалличности в 5 раз увеличиваются: модуль упругости при изгибе и на 100 % относительное удлинение при разрыве (при степени кристалличности 85 %) [15].

ПТФЭ обладает самым низким коэффициентом трения в условиях трения без смазочного материала по сравнению с другими полимерами. Высокие антифрикционные свойства ПТФЭ обычно связывают с особой структурой его молекул, низкой поверхностной энергией (слабой адгезией), а также с тем, что ПТФЭ уже в начальные моменты трения легко образует на сопряженной поверхности пленки переноса, которые и обеспечивают самосмазывание [12, 13].

Несмотря на свои некоторые параметры служебных характеристик, чистый или «ненаполненный» фторопласт часто не отвечает необходимым требованиям для ряда областей его применения и находит применение только в статических или нагруженных динамических системах. Для повышения твердости, теплопроводности, стойкости к истиранию, снижению деформации под нагрузкой и коэффициента термического расширения к фторопласту-4 добавляют различные наполнители, сохраняющие свои параметры при длительном действии (6 – 8 ч) температур переработки (623 – 673 К).

Традиционно в качестве наполнителей антифрикционных полимерных композитов применяют твердые смазочные материалы, обеспечивающие в процессе эксплуатации на поверхности трения структуру, близкую к структуре жидких кристаллов. Такие наполнители имеют слоистое строение или приобретают его в процессе трения. Из широкого спектра наполнителей в триботехническом материаловедении часто используют сульфиды ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{PbS}$ ), селениды ( $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ), теллуриды ( $\text{MoTe}_2$ ,  $\text{WTe}_2$ ,  $\text{NbTe}_2$ ), оксиды переходных металлов ( $\text{PbO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ), графит, нитрид бора ( $\text{BN}$ ), бронзу, тальк, каолин, фторопласты и др. [1 – 10, 14, 15].

Выбор наполнителя для термопластов определяется как триботехническими, так и теплофизическими характеристиками твердых смазок, т.к. основными требованиями, предъявляемыми к наполнителям, являются термическая, химическая стабильность при температуре переработки полимера и высокая теплопроводность. Важными критериями выбора наполнителя яв-

ляются форма и размеры частиц, их полидисперсность и характер упаковки. Оптимальной геометрической формой наполнителей триботехнического назначения являются чешуйки (каолин, слюда, тальк). В общем случае при введении в полимер 20 – 30 % наполнителя с такой формой частиц увеличиваются жесткость (в 4 – 5 раз), теплопроводность (в 5 – 10 раз), твердость (около 10 %) и износостойкость (в сотни раз) композитов.

В последние десятилетие повышенное внимание уделяют композиционным материалам на полимерных матрицах, содержащим наноразмерные модификаторы, – нанокомпозитам [3, 4, 10, 16 – 19 и др.].

Особое энергетическое состояние наночастиц, обусловленное их габитусом, составом, технологией получения [16, 17], приводит к их комплексному модифицирующему действию в полимерной и олигомерной матрице на различных уровнях структурного упрочнения.

Существенного повышения эксплуатационных характеристик ПТФЭ удалось достичь путем введения в состав наномодификаторов, например, наночастиц углерода детонационного синтеза – ультрадисперсных алмазно-графитных частиц (УДАГ). Исследования, проведенные в этой области, свидетельствуют о перспективности разработки материалов с наномодификаторами, обеспечивающими увеличение адгезионных, прочностных и триботехнических показателей.

Разработана достаточно большая номенклатура триботехнических композитов на основе фторсодержащих матриц, которые освоены промышленно и на протяжении многих лет эффективно применяются в машиностроении.

К числу наиболее эффективных фторкомпозитов относятся материалы, содержащие кокс (Ф4К20), дисульфид молибдена (Ф4К15М5), стекловолокно (Ф4С15), лакоткани на основе стекловолокна, пропитанного суспензией ПТФЭ.

К числу наиболее перспективных триботехнических фторкомпозитов относят материалы, армированные углеродными волокнами.

Введение во фторопласт углеволокна приводит к значительному повышению температуры термической деформации, прочности, твердости, модуля сдвига, стабильности размеров, сопротивления ползучести и деформации под долговременной нагрузкой [1, 2, 16].

В настоящее время широкое применение в машиностроении получили материалы на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродными волокнами, известные под названием «Флубон». Данные материалы обладают низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и химической стойкостью. Однако вследствие значительной

вязкости расплава ПТФЭ и плохой смачиваемости волокон наполнителя прочностные характеристики материалов «Флубон» сравнительно невысоки [1].

«Флубон» способен длительное время работать при температуре от 20 до 540 К, удельной нагрузке до 10 МПа и скорости скольжения до 5 м/с. Материал используют для изготовления поршневых колец компрессоров высокого давления, торцевых уплотнений химических насосов и реакторов, деталей узлов трения провяочных машин для химико-фотографической обработки цветной киноплёнки и в других отраслях химического машиностроения.

### Литература

1. Сиренко, Г.А. Антифрикционные карбопластики. / Г.А. Сиренко. – Киев: Техніка, 1985. – 195 с.
2. Новиков, И.И. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах. / И.И. Новиков, В.П. Захаренко, Б.С. Ландо. – Л.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
3. Охлопкова, А.А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе полимеров и ультрадисперсных керамик: дис. .... д-ра техн. наук: 05.02.01 / А.А. Охлопкова. – Якутск, 2000. – 269 с.
4. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена структурная модификация / Ю.К. Машков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 240 с.
5. Горяинова, А.В. Фторопласты в машиностроении / А.В. Горяинова, Г.К. Божков. – М.: Машиностроение, 1971. – 160 с.
6. Паншин, Ю.А. Фторопласты / Ю.А. Паншин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
7. Триботехнические свойства композита Флувис / В.В. Серафимович [и др.] // Трение и износ. – 2011. – Т. 22. – № 1. – С. 109 – 112.
8. Модифицирование углеволокон для наполнения политетрафторэтилена / В.А. Шелестова [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 6. – № 3. – С. 86 – 89.
9. Фторполимеры / под ред. Л.А. Уолла. – М.: Мир, 1975. – 448 с.
10. Охлопкова, А.А. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1996. – 162 с.
11. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1976. – 430 с.
12. Злотников, И.И. Особенности трения и изнашивания политетрафторэтилена, наполненного высокодисперсными органокремнеземами / И.И. Злотников, Е.М. Иванова // Трение и износ. – 2003. – Т. 24. – № 3. – С. 448 – 450.
13. Злотников, И.И. К механизму самосмазывания при трении политетрафторэтилена / И.И. Злотников. // Трение и износ. – 2001. – Т. 24. – № 5. – С. 541 – 544.
14. Зыбин, Ю.А. Наполненные фторопласты. / Ю.А. Зыбин, Н.Н. Самосатский. – Киев, 1965. – 165 с.

15. Порянова, А.В. Фторопласты в машиностроении / А.В. Порянова, Г.И. Божков, М.С. Тихонова. – М.: Машиностроение, 1971. – 320 с.
16. Полимерсиликатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]: под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
17. Введение в физику нанокomпозиционных машиностроительных материалов / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 439 с.
18. Гусев, А.И., Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
19. Рамбиди, Н.Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н.Г. Рамбиди, А.В. Березкин. – М.: Физматлит, 2008. – 430 с.

**УДК 539.216.2(045)**

## **ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПОКРЫТИЯ**

**Д. В. Гридюшко, С. Н. Голушко**

*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с опытным производством, Солигорск*

Современные вакуумные технологии позволяют формировать функциональные покрытия различного состава, строения, геометрических размеров, назначения. Номенклатура таких покрытий в настоящее время необычайно широка и непрерывно развивается в связи с совершенствованием технологического оборудования и материальной базы, основанной на применении новых компонентов, в т.ч. наноразмерных.

Вместе с тем, практический опыт применения традиционных покрытий со сравнительно простой и доступной технологией нанесения на рабочие поверхности деталей трения, на обрабатывающий инструмент показывает, что потенциальные возможности таких покрытий реализованы не в полной мере и при использовании дополнительных методов модифицирования область их применения может быть существенно расширена [1, 2].

В последние годы широкое распространение получают методы нанесения износостойких покрытий в вакууме. Различают три основных метода нанесения покрытий: катодное распыление, термическое напыление и ионное осаждение [1 – 3]. В зависимости от реакционной способности газовой среды методы напыления могут быть физическими и химическими. Для получения покрытий из химических соединений применяют химические методы: реактивное катодное распыление и реактивное испарение. В