

Литература

1. Охрименко, А.Е. Основы радиолокации и РЭБ / А.Е. Охрименко. — М.: Воениздат, 1983. — Ч. 1: Основы радиолокации. — 456 с.
2. Евсиков, Ю.А. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов / Ю.А. Евсиков, В.В. Чапурский. — М.: Высш. школа, 1977.
3. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А.И. Канашенкова, В.И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003. — 416 стр.: ил.
4. Коростелев, А.А. Пространственно-временная теория радиосистем: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев. — М.: Радио и связь, 1987. — 320 с.: ил.
5. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. — М.: Радио и связь, 1986.
6. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. — М.: Сов. радио, 1970. — 560 с.
7. Пространственно-временная обработка сигналов / И.Я. Кремер [и др.]. — М.: Радио и связь, 1984. — 224 с.
8. Гриднев, Ю.В. Пространственно-временной автокомпенсатор: а. с. SU № 1507052 от 18.05.1987 / Ю.В. Гриднев.
9. Гриднев, Ю.В. Цифровой пространственно-временной автокомпенсатор: а. с. SU № 1632209 от 1.11.1990 / Ю.В. Гриднев.
10. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов [и др.]. — М.: Радио и связь, 1988. — 304 с.

ТРЕНИЕ И ИЗНОС ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.К. Мышкин, С.С. Песецкий, А.Я. Григорьев

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси

Введение

Современный период развития техники характеризуется все более широким применением полимерных конструкционных материалов (инженерных пластиков) в таких важнейших отраслях промышленности, как автотракторная, авиационная, нефтехимическая и др. В сравнении с металлами или керамиками, полимерные материалы более технологичны, обеспечивают значительное снижение массы изделий, обладают высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред. Возможность изменять функциональные свойства полимеров изделий введением наполнителей различной природы делает очень эффективным применение полимерных композитов в узлах трения — подшипниках скольжения, зубчатых коле-

сах, кулачках, направляющих, в виде антифрикционных покрытий и т. п.

По объемам применения и перспективам дальнейшего расширения производства среди полимеров лидирующая роль принадлежит термопластам. Существенное улучшение триботехнических свойств термопластичных материалов обеспечивается введением в полимерную матрицу упрочняющих и смазывающих добавок. Перспективно применение смесей полимеров, которые, в сравнении с гомополимерами, обладают улучшенными эксплуатационными и технологическими характеристиками при более низкой стоимости и в ряде случаев существенно более высокими триботехническими свойствами.

Прогресс в области нанотехнологий обусловил интенсификацию исследований влияния нанораз-

мерных наполнителей (углеродных, глинистых, металлосодержащих и полимерных) на свойства полимерных композитов. Установлено, что небольшие добавки нанонаполнителей (1...5 об. %) способны кардинальным образом изменять триботехнические свойства полимеров. В современных представлениях такое сильное влияние объясняется тем, что при дисперсности частиц 10...100 нм их поверхность достаточно велика, чтобы даже при концентрациях в десятые доли процента перевести практически весь полимер в состояние граничного слоя, толщина которого достигает 0,02...0,50 мкм. В связи с этим в настоящей статье сделана попытка обобщения и анализа информации в области трибологии полимерных нанокompозитов.

Трение полимерных материалов

Трение представляет собой совокупность процессов, протекающих в тонких поверхностных слоях контактирующих тел при их относительном движении. Основная концепция науки о трении — существование двух независимых компонент силы трения — *адгезионной* и *деформационной* — проста и плодотворна. Она составляет основу так называемой двучленной модели трения. Подобный подход применим к любым материалам, включая полимеры. Поведение полимеров при трении связывают с протеканием следующих основных явлений:

- образованием адгезионных связей между контактирующими поверхностями;
- деформированием, разрывом связей и срезом материалов пары трения в зоне контакта;
- формированием фактической площади контакта.

Адгезионные связи, их формирование и разрушение. Между атомами и молекулами двух поверхностей, приведенных в контакт, действуют силы притяжения и отталкивания. Действие этих сил приводит к формированию пятен фактического контакта. Процессы образования и разрыва связей определяют адгезионную составляющую трения.

Работа силы трения равна энергии разрушения межповерхностных связей. В общем случае образование, рост и разрушение связей определяются природой контактирующих поверхностей, химическими процессами, протекающими на них, и напряженным состоянием поверхностных слоев, вызванным условиями нагружения.

Если прочность межповерхностных связей превышает когезионную прочность менее прочного материала, происходят его разрушение и

перенос. В противном случае разрушение протекает по границе раздела материалов. В полимерах поверхностные и межмолекулярные силы, как правило, приблизительно равны по величине, поэтому разрушение часто происходит в объеме наименее прочного из контактирующих материалов. Однако это не всегда так. При определенных условиях в металлополимерном контакте металл может переноситься на поверхность полимера.

Контакт твердых тел с учетом адгезии описывается различными моделями, наиболее известными из которых являются модели Джонсона — Кендалла — Робертса (ДЖКР) и Дерягина — Муллера — Топорова (ДМТ). Сравнительный анализ этих моделей показал, что теория ДЖКР применима к телам размером более микрометра и имеющим свойства полимера, преимущественно, эластомера, а теория ДМТ справедлива для тел нанометрового масштаба со свойствами металлов.

Деформационная составляющая силы трения. Другой причиной возникновения силы трения считается деформация, происходящая при вступлении в контакт неровностей двух скользящих друг относительно друга поверхностей. Неровности испытывают упругую, пластическую или вязкоупругую деформацию в зависимости от свойств материалов. При начальном приложении нагрузки к полимеру возникает, главным образом, пластическая деформация, если полимер находится в стеклообразном состоянии, либо вязкоупругая или даже вязкопластическая, если он находится в высокоэластическом состоянии.

На любом масштабном уровне следует учитывать механические свойства контактирующих материалов, однако, в зависимости от уровня такие характеристики, как модуль Юнга и твердость, могут отличаться не только по величине, но и по физическому смыслу. Деформация сопровождается диссипацией механической энергии, которая определяется типом деформации, условиями трения, свойствами контактирующих материалов, масштабным уровнем механических свойств, составом окружающей среды и другими факторами.

Фактическая площадь контакта. Контактующие при трении поверхности не являются гладкими (рис. 1). При их сближении неровности, имеющие максимальную высоту, вступают в контакт. По мере возрастания нагрузки в контакт входят новые пары неровностей с меньшей высотой, образуя отдельные пятна контакта. Общая площадь этих пятен составляет фактическую площадь контакта (ФПК).

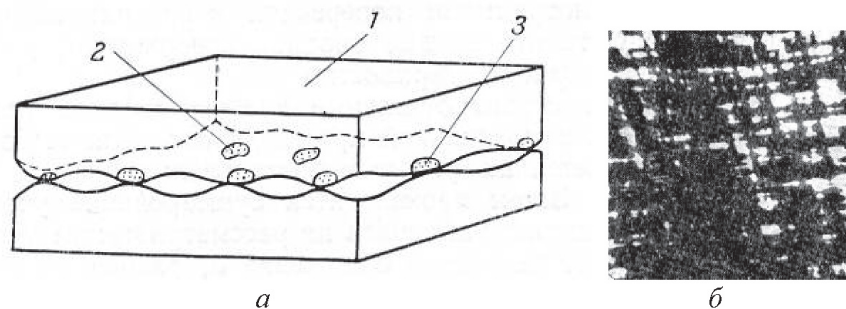


Рис. 1. Формирование фрикционного контакта:

а) 1 — номинальная; 2 — контурная площадь;
3 — фактическая площадь;

б) фактическая площадь контакта (белые пятна), сфотографированные с помощью люминесцентной краски

Выступы поверхности не являются гладкими, они тоже в свою очередь покрыты неровностями, которые возникают как проявление молекулярной и надмолекулярной структур полимеров. С учетом этого обстоятельства ФПК определяется на основе двухуровневой модели типа модели Арчарда, рассматривающей сочетание двух уровней неровностей — шероховатости и микрошероховатости.

Анализ двухуровневой модели показал, что наиболее высокие неровности первого уровня (шероховатость) вступают в контакт и формируют отдельные пятна контакта (контурная площадь). Но вопреки традиционному представлению, эти пятна не являются сплошными, а каждое из них состоит из некоторого числа меньших пятен. Общую площадь таких пятен меньшего масштаба и принято называть фактической площадью контакта. На пятнах фактического контакта может возникать сильное взаимодействие сопрягаемых поверхностей. Вклад физического и, возможно, химического взаимодействия в общее сопротивление относительному перемещению контактирующих поверхностей может быть очень существенным.

Процессы формирования фактической площади касания, деформирования материалов в зоне контакта, возникновения и разрыв адгезионных связей существенно зависят от условий нагружения фрикционной пары.

Влияние нагрузки на трение. Общепринято, что сила трения пропорциональна нормальной нагрузке (первый закон трения). По данным многих авторов, этот закон выполняется для некоторых полимеров, испытанных при определенных условиях (табл. 1).

Так, при скольжении стального шарика радиусом 6,35 мм по поверхности политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиметилметакрилата (ПММА), поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилена (ПЭ) и нейлона коэффициент трения остается практически постоянным в диапазоне нагрузок 10–100 Н. Аналогичные результаты получены для ПТФЭ, политрифторхлорэтилена (ПТФХЭ), ПВХ, поливинилиденхлорида (ПВДХ) и ПЭ при нагрузке 2–15 Н, ПТФЭ, ПММА, полистирола

(ПС) и ПЭ при 10–40 Н и т. п. За пределами указанных диапазонов нагрузок пропорциональность силы трения нормальной нагрузке нарушается. Так, например, при умеренных нагрузках (0,02–1 Н) коэффициент трения снижается с ростом нагрузки, что можно объяснить упругой деформацией неровностей поверхности. Следует отметить, что аналогичным образом ведут себя резины, для которых типична упругая деформация. Следует иметь в виду, что нагрузка может изменять температуру вязкоупругих переходов в полимерах, влияя таким образом на механизм трения.

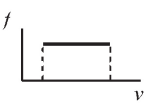
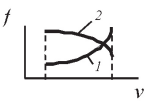

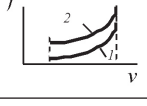

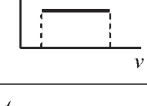
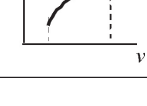
Таблица 1

Влияние нагрузки на коэффициент трения

Материал	Нагрузка, пара трения	Графическая зависимость
ПТФЭ, ПФХЭ, ПВХ, ПВДХ, ПЭ	2–15 Н Сталь – полимер	
ПТФЭ, ПММА, ПММА, ПК	10–40 Н Сталь – полимер	
ПТФЭ, ПЭ, ПММА, ПВХ, нейлон	10–100 Н Сталь – полимер	
ПТФЭ, ПММА, нейлон	Сталь – полимер	
Резина	Расчет	
Резина	Расчет	

Влияние скорости скольжения на трение. Считается, что сила трения не зависит от скорости скольжения. Это утверждение справедливо только в случае, если температура в контакте возрастает незначительно и, следовательно, поведение поверхностного слоя материала не изменяется. Однако весьма трудно разделить влияние скорости скольжения и температуры трения, поэтому необходимо внимательно анализировать данные, полученные различными исследователями. В табл. 2 представлены некоторые из большого числа имеющихся результатов.

Таблица 2
Влияние скорости скольжения на коэффициент трения

Материал	Скорость скольжения, пара трения	Графическое представление
ПТФЭ, ПЭ, ПММА, ПК	0,01–1,00 см/с Сталь – полимер Нагрузка ограничена	
1 — нейлон; 2 — ПК	4–183 см/с Полимер – полимер	
ПТФЭ	10 ⁻⁵ –10 см/с Сталь — полимер	
1 — ПТФЭ; 2 — нейлон	0,1–10,0 см/с Сталь – полимер	
ПТФЭ	1,1–180,0 см/с Сталь – полимер	
Волокна	1,5 см/с Полимер – полимер	
Резина	Расчет	

Коэффициент трения не зависит от скорости лишь в ограниченном диапазоне (0,01–1,00 см/с) для ПТФЭ, ПЭ, ПММА и ПС, а также для контакта полимерных волокон. Обычно же имеет место сложная зависимость коэффициента трения от скорости, причиной которой может быть вязкоупругое поведение полимеров. При низких скоростях скольжения вязкое сопротивление в

зоне контакта увеличивается с ростом скорости. Если контактное давление велико, происходит аномальное вязкое течение, приводящее к резкому возрастанию вязкости вследствие роста скорости.

Аналогичная зависимость коэффициента трения от скорости может быть получена и на основе молекулярно-кинетических представлений. При высоких скоростях скольжения в зоне контакта доминирует упругое поведение материала, поэтому сила трения слабо зависит от скорости или уменьшается при ее снижении. Кроме того, следует иметь в виду, что при высокой скорости продолжительность контакта мала, что еще больше снижает силу трения.

В промежуточном диапазоне скоростей все указанные факторы являются конкурирующими, и зависимость силы трения от скорости скольжения имеет максимум, положение которого определяется релаксационными свойствами полимера.

Влияние температуры на трение. Полимеры, являющиеся вязкоупругими материалами, очень чувствительны к фрикционному нагреву. Хорошо известно, что трение — типичный диссипативный процесс, в котором механическая энергия превращается в тепловую (до 90–95%, согласно известным экспериментальным данным). Зачастую тепловое состояние фрикционного контакта оказывается решающим фактором эксплуатационных характеристик узлов трения.

Считается, что тепловыделение при трении является результатом деформации материала на пятнах фактического контакта. Механическая энергия может превращаться в тепловую вследствие протекания различных процессов, таких как пластическая деформация, гистерезис, диспергирование и вязкое течение. Другой источник теплоты трения связан с возникновением и разрывом адгезионных связей. По всей вероятности, эти процессы энергетически неэквивалентны, и различие энергий может вызывать выделение или поглощение теплоты.

Часто полагают, что влияние температуры на трение можно рассматривать с учетом механических характеристик полимеров, измеренных при определенных температурах. В пользу этого предположения говорит корреляция коэффициента трения с твердостью и прочностью на сдвиг для некоторых полимеров. Она имеет место только при отсутствии влияния температуры на адгезию.

Некоторые из зависимостей коэффициента трения от температуры представлены в табл. 3.

Таблица 3
Влияние температуры на коэффициент трения

Материал	Температура, условия испытаний	Графическое представление
1 — ПС; 2 — ПТФЭ	20–80 °С Сталь – полимер	
1, 2 — ПТФХЭ; 3 — ПП	–50...+150 °С Сталь – полимер 1 — $v = 3,5 \cdot 10^{-5}$ см/с; 2 — $v = 3,5 \cdot 10^{-2}$ см/с	
1 — ПЭ; 2 — ПТФЭ	–40...+20 °С Сталь – полимер	
резина	20–200 °С Сталь – полимер	

Адгезия является ведущим механизмом трения полимеров в высокоэластическом состоянии по гладким поверхностям. Другие механизмы трения проявляются, когда полимер переходит из высокоэластического в стеклообразное состояние. В этом случае вклад механических потерь в объемную деформацию поверхностных слоев полимера возрастает. Если полимер нагрет почти до температуры стеклования T_g , роль объемной механической компоненты становится более значительной до тех пор, пока ее вклад не станет сравнимым со вкладом адгезии.

Изнашивание полимеров и композитов на их основе

Общепринято, что наиболее распространенными видами изнашивания полимеров являются абразивное, адгезионное и усталостное изнашивание.

Абразивное изнашивание. Сущность абразивного изнашивания заключается в резании или пропахивании поверхности более твердыми частицами или неровностями, которые могут быть как внедренными в поверхность контртела, так и находиться в зоне контакта в виде свободных частиц. В первом случае говорят об изнашивании закрепленным, а во втором — свободным абразивом.

При абразивном изнашивании на поверхности появляются царапины, канавки и следы схватывания, а частицы износа, как правило, имеют вид мелких частичек стружки. Большинство моделей

абразивного изнашивания основаны на геометрическом описании неровностей, поэтому интенсивность изнашивания зависит от формы и угла при вершине абразивных частиц или неровностей, движущихся по сопрягаемой поверхности. Существует множество абразивных материалов, и природа абразивного изнашивания конкретной трибосистемы зависит в определенной степени от формы присутствия абразива в ней: твердые фазы исходной микроструктуры, загрязнения, попавшие в систему износа, продукты износа контактирующих поверхностей.

При воздействии абразивной частицы на пластичный материал возможна реализация двух различных типов деформирования. Первый из них — возникновение канавок, часто называемое пропахиванием, при котором впереди частицы образуется валик и материал оттесняется в стороны, формируя гребни на краях канавки. При этом не происходит удаление материала с поверхности трения. Второй тип деформирования — резание — подобен резанию при механической обработке. В этом случае весь объем материала, оттесненный абразивной частицей, удаляется в виде стружки.

Существует и другой подход к описанию абразивного изнашивания. Экспериментальные результаты показывают, что скорость абразивного изнашивания пропорциональна величине $1/\sigma\epsilon$, где σ — предел прочности при растяжении, а ϵ — соответствующая деформация (рис. 2). Эта зависимость была установлена Ланкастером и Ратнером и часто называется их именами.

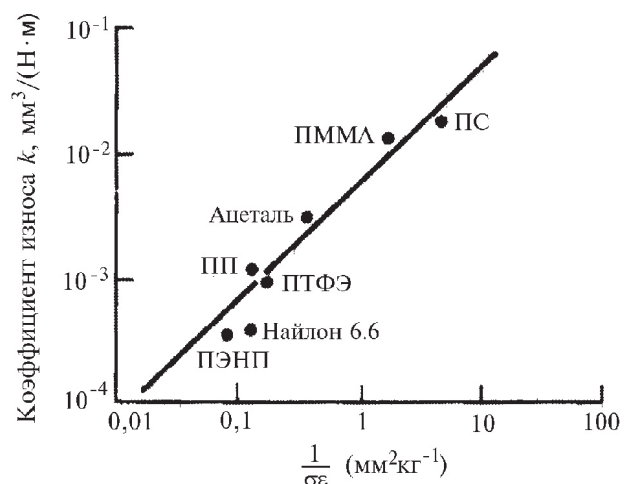


Рис. 2. Зависимость Ратнера – Ланкастера для абразивного изнашивания:

σ и ϵ — предел прочности и относительное удлинение при растяжении соответственно

При изнашивании закрепленным абразивом часть неровностей оказывает пропахивающее действие, остальные — режущее. Соотношение между этими механизмами зависит от двух факторов: угла атаки частицы и прочности на сдвиг на границе раздела. При изнашивании свободным абразивом его частицы легко внедряются в поверхность полимера, и он ведет себя как абразивная шкурка, изнашивающая контртело.

Адгезионное изнашивание и фрикционный перенос. Адгезионное изнашивание является результатом среза адгезионных связей. В его основе лежит адгезия — одна из составляющих трения, описанная выше. Этот вид изнашивания включает формирование, рост и разрыв адгезионных связей. Его отличительная черта — перенос материала с одной из сопрягаемых поверхностей на другую вследствие образования локализованных связей между ними. Перенос полимеров является наиболее важной характеристикой их адгезионного изнашивания.

Явление фрикционного переноса наблюдается для материалов практически любой природы (металлов, керамик, полимеров) и их сочетаний. Полимеры склонны к фрикционному переносу при трении как по металлам, так и по полимерам. В качестве примера рассмотрим трение ПТФЭ по ПЭ. Было обнаружено, что в начальный период времени происходит перенос ПТФЭ в виде очень малых хлопьев. Толщина перенесенного слоя монотонно возрастает, а затем колеблется около среднего значения, зависящего от условий испытаний, особенно от нагрузки и скорости скольжения (рис. 3).

В зависимости от свойств полимера и условий трения перенесенные фрагменты могут иметь различную форму. Еще одним следствием переноса полимера является изменение шероховатости контактирующих поверхностей — шероховатость поверхности полимера претерпевает существенные изменения до тех пор, пока не наступит

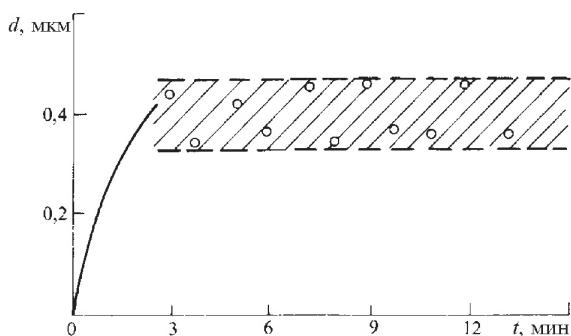


Рис. 3. Кинетика толщины перенесенного слоя ПТФЭ: $N = 0,05$ МПа, $v = 0,35$ м/с

стадия установившегося изнашивания, а шероховатость поверхности металла изменяется за счет переноса полимера.

Усталостное изнашивание. Усталость трактуется как изменение состояния материала в результате многократного деформирования, приводящего к прогрессирующему разрушению. Ее отличительной особенностью является накопление необратимых изменений, вызывающих зарождение и распространение трещин. Такой процесс протекает при трении и сопровождается практически все виды изнашивания. При качении и возвратно-поступательном скольжении материал в зоне фрикционного контакта испытывает многократное деформирование. Кроме того, каждая неровность поверхности трения претерпевает последовательное нагружение неровностями сопрягаемой поверхности. В результате в поверхностной и подповерхностной зонах возникают два изменяющихся поля напряжений разного масштаба от размера номинальной площади контакта в первом случае до диаметра фактического пятна контакта во втором. Они являются источником усталости материала в данных областях, которая приводит к зарождению и распространению трещин и отделению частиц износа. Такой процесс называется фрикционной усталостью. В отличие от объемной усталости, он охватывает только поверхностные и подповерхностные области материала. Удаление материала с поверхности в результате фрикционной усталости представляет собой усталостное изнашивание. Известно, что усталостные трещины зарождаются в местах возникновения максимальных касательных напряжений или деформаций растяжения.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при трении положение зоны максимальных касательных напряжений зависит от коэффициента трения. При малых коэффициентах трения ($f < 0,3$) зона, в которой касательные напряжения максимальны, находится под поверхностью трения, а при возрастании $f > 0,3$ она выходит на поверхность. Однако при совместном нормальном и тангенциальном нагружении тела на поверхности и под ней возникают зоны, в которых происходит деформация растяжения, вызывающая фрикционный нагрев. Поэтому трещины могут зарождаться на поверхности и/или под ней (рис. 4).

Зарождение усталостных трещин облегчается наличием дефектов, являющихся концентраторами напряжений. Это царапины, углубления, риски и раковины на поверхности, а также примесные атомы.

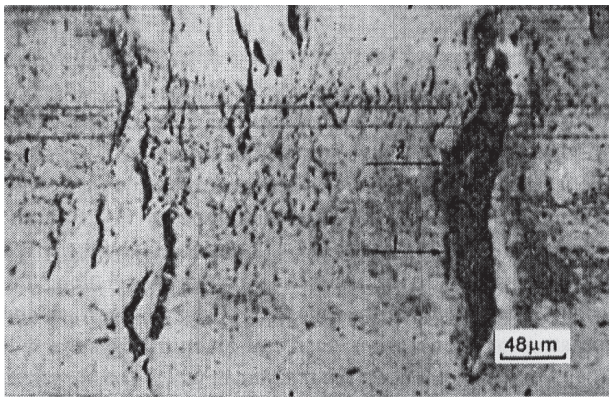


Рис. 4. Усталостное разрушение поверхности эпоксидной смолы: $f = 0,17$

Под действием циклических напряжений поверхностные и подповерхностные трещины растут, сливаются и пересекаются друг с другом, в результате чего после определенного количества циклов деформирования отделяются частицы износа.

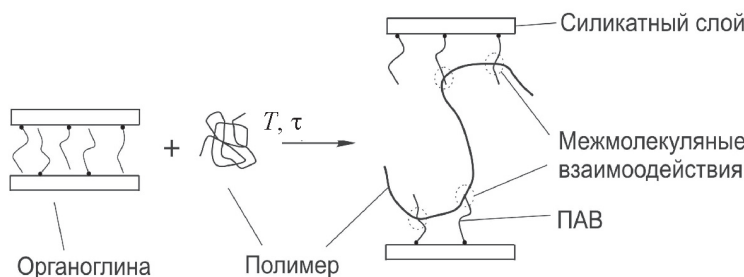


Рис. 5. Взаимодействие макромолекул полимера в расплаве со слоистым глинистым минералом, модифицированным органическим ПАВ

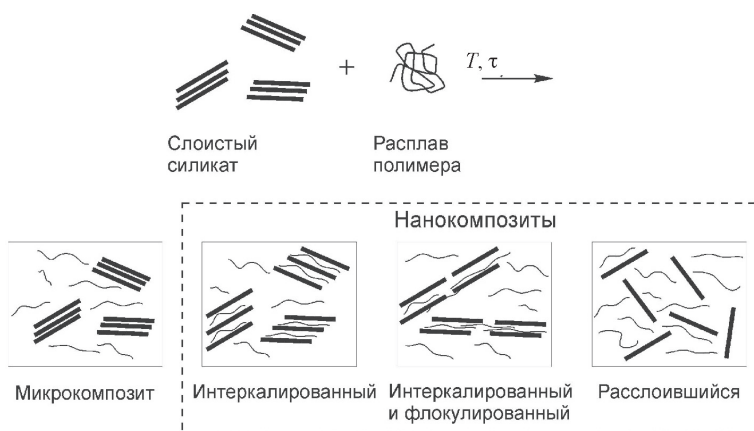


Рис. 6. Структура наноккомпозитов, полученных диспергированием слоистого глинистого минерала в расплаве полимера

Наноккомпозиты триботехнического назначения

Основная трудность при получении наноккомпозитов заключается в склонности ультрадисперсных частиц к агрегации, а частиц металла — еще и к окислению. Поэтому используются специальные технологии получения наноккомпозита, предусматривающие особые условия введения частиц и обеспечивающие требуемое их распределение в полимерной матрице.

К настоящему времени наиболее широко изучены полимер-глинистые наноккомпозиты. Методы их получения делятся на три основные группы: введение полимера или форполимера из раствора, полимеризация (поликонденсация), смешение в полимерном расплаве.

Исходные слоистые силикаты обычно содержат гидратированные Na^+ и K^+ ионы. Поэтому для обеспечения хорошей смачиваемости полимерами (в т. ч. слабополярными) поверхность слоистого минерала модифицируют посредством обменных реакций с катионными ПАВ, включающими, как правило, первичные, вторичные, третичные или четвертичные катионы аммония или алкилфосфония. Хемосорбция ионогенных ПАВ снижает поверхностную энергию силиката и улучшает его смачиваемость полимером, приводя одновременно к повышению объема галерей (увеличению межслоевого зазора). На рис. 5 приведена схема формирования наноккомпозитов путем прямого внедрения полимерного расплава в межслоевое пространство слоистого глинистого минерала, частицы которого обработаны специальным ПАВ.

В зависимости от уровня межфазного взаимодействия обычно получают три различных типа полимер-глинистых наноккомпозитов (рис. 6):

- интеркалированные наноккомпозиты (включение полимера в слоистую структуру происходит при обеспечении кристаллографической регулярности последней);
- интеркалированные и флокулированные наноккомпозиты (с нарушенной регулярностью кристаллов);

– расслоившиеся нанокompозиты (отдельные слои хаотически распределены в объеме полимера).

Тип получаемого нанокompозита определяется природой и концентрацией глинистого минерала, природой полимера и ПАВ, а также условиями компаундирования в расплаве.

Весьма привлекательно применение для управления триботехническими свойствами полимеров новых аллотропных форм углерода — фуллеренов, углеродных нанотрубок, графенов. Удовлетворительное распределение углеродных наноматериалов в объеме как неполярных (полипропилен), так и полярных термопластов (полиамид 6, поликарбонат, полиимид) обеспечивается компаундированием в расплаве при использовании преимущественно двухшнекового экструдера и повышенных скоростей сдвига. Для улучшения распределения углеродных наноматериалов в объеме полимерной матрицы используются комбинированные технологии: обработка полимера и нанонаполнителя растворителем с последующим его испарением и компаундированием в расплаве, совместное диспергирование нанонаполнителя с порошкообразным полимером с помощью ультразвука в легко испаряющейся жидкости, использование специальных компатибилизаторов для улучшения распределения наночастиц в полимерном расплаве.

Металлсодержащие полимерные нанокompозиты (полимерные материалы, содержащие частицы металлов, их солей, оксидов, металлоорганических и других соединений), с частицами по размерами, сопоставимым с размерами макромолекул получают импрегнированием, осаждением и соосаждением, сорбцией из растворов, напылением, микрокапсулированием, диспергированием в растворах и расплавах полимеров, сорбцией металлокомплексных соединений с последующим их разложением и т. п.

Для получения металлсодержащих полимерных нанокompозитов наиболее технологичными являются методы, основанные на введении наночастиц непосредственно в расплав термопласта, смешении наночастиц с тонкодисперсными (нанодисперсными) порошками полимеров с последующим плавлением и прессованием материала,

разложении нетермостабильных солей и других соединений металлов в полимерном расплаве.

Заключение

В середине XX в. возрос интерес к полимерам и материалам на их основе благодаря особенностям их структуры, специфическим механическим свойствам и возможностям управления этими свойствами. Однако при использовании полимеров часто возникали проблемы, связанные с их ползучестью, существенной зависимостью свойств от температуры, низкими теплопроводностью и атмосферостойкостью. Понадобились десятилетия, чтобы определить область современного машиностроения, в которой полимеры применимы в качестве триботехнических материалов, наиболее часто в виде покрытий и твердых смазок. Последние используются либо в чистом виде, либо в составе композиций или слоистых структур.

Дальнейший прогресс в науке о трении и изнашивании полимеров и композиционных материалов на их основе возможен на основе решения проблем, связанных с раскрытием микромеханизмов процессов, которые протекают в поверхностных слоях трущихся тел. Важным становится изучение структурных изменений в поверхностных слоях, происходящих на молекулярном уровне, и исследование трибохимических реакций. Необходимо также разработать методы регулирования структуры и триботехнических свойств полимеров на основе физических предпосылок и концепций.

Следует отметить, что современные приборы, которыми вооружены исследователи (атомно-силовые микроскопы, приборы для измерения поверхностных сил и т. п.), позволяют им решить многие проблемы в области трения и изнашивания полимеров.

Прогресс в машиностроении, несомненно, откроет новые возможности для применения полимерных материалов и сделает исследование их механических и триботехнических свойств актуальной и продуктивной областью науки и технологии.

Данная работа была частично поддержана грантами Белорусского фонда фундаментальных исследований Т11СРБ-003 и Т11ПЛШ-004.

Литература

1. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1976. — 432 с.
2. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 368 с.
3. Tribology of Polymeric Nanocomposites / editors: K. Friedrich, A.K. Schlarb. — Amsterdam: Elsevier, 2008. — 551 p.
4. Polymer Tribology / editors: S.K. Sinha, B. J. Briscoe. — London: ICP, 2009. — 697 p.