

Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена

А. А. Охлопкова, П. Н. Петрова, С. Н. Попов, С. А. Слепцова

АЙТАЛИНА АЛЕКСЕЕВНА ОХЛОПКОВА — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой высокомолекулярных соединений и органической химии Якутского государственного университета им. М.К. Аммосова, заведующая лабораторией материаловедения Института проблем нефти и газа СО РАН. Область научных интересов: органический синтез, полимерное материаловедение, трибология. E-mail okhlopkova@yandex.ru

ПАВЛИНА НИКОЛАЕВНА ПЕТРОВА — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем нефти и газа СО РАН. Область научных интересов: полимерное материаловедение, трибология. E-mail pravlina@yandex.ru

САВВА НИКОЛАЕВИЧ ПОПОВ — доктор технических наук, заместитель директора Института проблем нефти и газа СО РАН. Область научных интересов: полимерное материаловедение, трибология, герметология. E-mail inm@ysn.ru

САРДАНА АФАНАСЬЕВНА СЛЕПЦОВА — кандидат технических наук, доцент кафедры высокомолекулярных соединений и органической химии Якутского государственного университета им. М.К. Аммосова. Область научных интересов: полимерное материаловедение, трибология. E-mail SSARD@yandex.ru

677000 Якутск, ул. Белинского, 58, Якутский государственный университет им. М.К. Аммосова.

677007 Якутск, ул. Автодорожная, 20, Институт проблем нефти и газа СО РАН.

Введение

Применение антифрикционных самосмазывающихся пластмасс в узлах трения машин (подшипники скольжения, сепараторы подшипников качения, лентопротяжные устройства, зубчатые зацепления и др.) позволяет не только заменить металлы и сплавы, но и повышает надежность и долговечность технических средств, снижает энергозатраты на их изготовление, эксплуатацию, а также улучшает экологическую обстановку при их использовании [1].

Наиболее перспективными материалами в триботехническом плане представляются модифицированные полимеры, содержащие различные наполнители. Положительный эффект наполнения полимеров для улучшения их триботехнических характеристик обусловлен ослаблением межмолекулярных связей в полимере; формированием оптимальной структуры материала; участием наполнителей при трении в качестве ингибиторов изнашивания; повышением работоспособности пленки фрикционного переноса [2, 3].

В данной статье приводятся результаты исследований по разработке новых полимерных материалов триботехнического назначения для изготовления узлов трения технических средств, эксплуатируемых в условиях холодного климата. Приоритетность этого направления определяется тем, что существует острая проблема повышения надежности, безопасности и эффективности

эксплуатации технологического оборудования, трубопроводов, жилищно-коммунальных объектов в регионах Российского Севера. Применяемые в современном отечественном машиностроении уплотнительные материалы не обладают достаточной морозо- и износостойкостью. Низкая работоспособность уплотнений в условиях холодного климата становится причиной от 30 до 50% отказов изделий [4, 5]. Производительность техники в зимний период снижается в среднем в 1,5 раза, наработка до отказа падает в 2—3 раза, фактический срок службы сокращается в 2—3,5 раза [6].

Среди полимеров, применяемых для изготовления деталей узлов трения, наиболее предпочтительным комплексом физико-механических и триботехнических свойств обладает политетрафторэтилен, он используется в узлах трения наиболее ответственных технических систем. Ценным свойством композиционных материалов на основе политетрафторэтилена является работоспособность в широком интервале температур при сохранении низких и стабильных значений коэффициента трения (0,1–0,2) и обеспечении плавного скольжения [4, 7, 8], что важно при эксплуатации техники в экстремальных условиях.

Фактором управления триботехническими свойствами полимеров может служить модифицирование их надмолекулярной структуры [1, 9, 10]. В работах [11, 12] в качестве модификаторов надмолекулярной структуры

политетрафторэтилена применяли различные классы ультрадисперсных керамик: нитриды, простые, двойные, тройные оксиды и оксинитриды переходных металлов со средним размером частиц от 4 до 100 нм. Введение ультрадисперсных керамик, которые способны создавать ансамбли в среде материала по типу кластеров, инициирует процессы структурообразования и изменяет механизм кристаллизации политетрафторэтилена [13, 14]. Формируется армированная полимерная система, отличающаяся повышенными прочностными и триботехническими свойствами.

Структура и термодинамические свойства политетрафторэтилена, модифицированного ультрадисперсной керамикой

Трансформация надмолекулярной структуры политетрафторэтилена при введении ультрадисперсной керамики обусловлена влиянием твердой поверхности частиц наполнителя на подвижность макромолекул и образованием в граничной области адсорбированных слоев полимера [15—17]. В результате структурообразование полимера протекает по-разному в объеме полимерного связующего и вблизи фазовой границы в зависимости от концентрации наполнителя.

Исследования структуры политетрафторэтилена, модифицированного ультрадисперсной керамикой, методом электронной микроскопии (рис. 1) показали, что введение керамических частиц с развитой удельной поверхностью (50—200 м²/г) вызывает существенное изменение процесса кристаллизации и приводит к образованию надмолекулярных структурных элементов, нехарактерных для исходного полимера. Объектами для

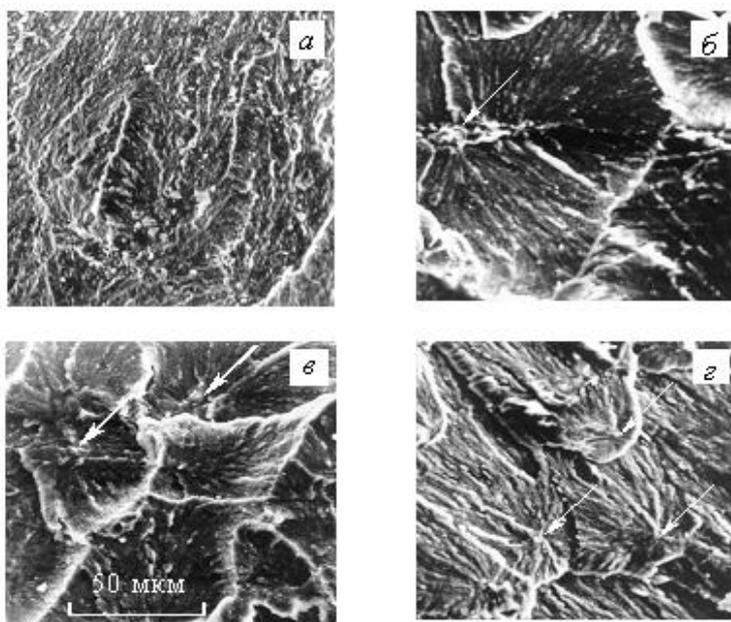


Рис. 1 Микрофотографии сколов образцов политетрафторэтилена (ПТФЭ) и композитов на его основе:

а — ПТФЭ; б — ПТФЭ+SiO₂; в — ПТФЭ+ Al₂O₃; г — ПТФЭ+TiO₂. Содержание керамики 2 % (масс.)

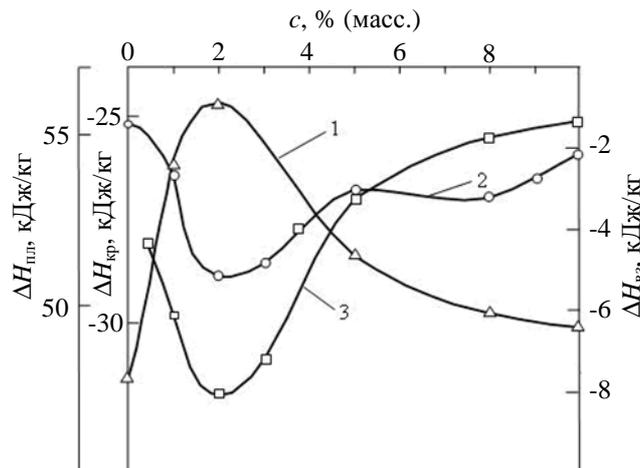


Рис. 2. Зависимость изменения энтальпий плавления $\Delta H_{пл}$ (1), кристаллизации $\Delta H_{кр}$ (2) образцов политетрафторэтилена, наполненного оксидом алюминия, и энергии взаимодействия макромолекул с Al₂O₃ $\Delta H_{вз}$ (3) от содержания наполнителя

структурных исследований служили низкотемпературные хрупкие сколы полимерных композитов, полученные при температуре жидкого азота. Частицы ультрадисперсной керамики являются центрами кристаллизации, на основе которых вырастают структурные образования в форме симметричных многогранников. В отличие от известных композитов, содержащих традиционные наполнители типа кокса и дисульфида молибдена, структура композиционных материалов с ультрадисперсной керамикой более совершенная, мелкосферолитная, с высокой плотностью упаковки структурных элементов [13, 17]. Так, например, структура композита, содержащего оксид алюминия, с высокой удельной поверхностью (200 м²/г), а следовательно, и с большой поверхностной активностью, построена из совершенных надмолекулярных элементов одинакового размера и небольшого диаметра (17—20 мкм). Формирование сферолитов в политетрафторэтилене подтверждается данными исследования методом оптической микроскопии в поляризованном свете [13].

На примере образцов политетрафторэтилена, модифицированного Al₂O₃, методом дифференциальной калориметрии была проведена количественная оценка тепловых эффектов фазовых переходов, происходящих при введении наполнителя, а также энергии взаимодействия полимера с Al₂O₃ (рис. 2).

Максимальное значение величины $\Delta H_{пл}$ для композита, содержащего 2 % (масс.) ультрадисперсного Al₂O₃, (кривая 1 на рис. 2) свидетельствует о существовании критической концентрации высокодисперсных наполнителей, при которой образуется наибольшее число

межмолекулярных связей между полимерной цепочкой и адсорбционно-активными участками на поверхности частиц наполнителя [19].

Увеличение энтальпии кристаллизации (кривая 2) свидетельствует о повышении скорости кристаллизации полимера при введении в его состав ультрадисперсной керамики. Влияние наполнителя на кристаллизацию полимеров характеризуется двумя основными факторами: формированием на поверхности раздела полимер-наполнитель адсорбированных участков, способствующих началу кристаллизации и повышением вязкости композиционной системы при увеличении содержания наполнителя, что препятствует протеканию процессов кристаллизации. При малых содержаниях наполнителя скорость кристаллизации возрастает, поскольку частицы наполнителя играют роль зародышей кристаллизации, с увеличением концентрации наполнителя процесс кристаллизации затормаживается, поскольку преобладающим становится фактор увеличения вязкости системы [15], что и подтверждается характером изменения энтальпии кристаллизации.

Известно [20], что об интенсификации процессов кристаллизации полимеров в присутствии высокодисперсных частиц наполнителя можно судить по повышению экзотермических пиков кристаллизации при охлаждении образцов. На основании анализа экзотермических кривых кристаллизации политетрафторэтилена при различном содержании в нем наполнителя можно заключить, что введение активных частиц ультрадисперсной керамики до 2 % (масс.) способствует повышению скорости кристаллизации полимера с образованием однородных сферолитов с четкими границами раздела.

Для оценки влияния энергетического состояния поверхности частиц наполнителя на адгезию к полимерному связующему была измерена энтальпия взаимодействия Al_2O_3 с политетрафторэтиленом. Абсолютная максимальная величина $\Delta H_{вз}$ достигается при содержании наполнителя 2 % (масс.) (кривая 3). Снижение $\Delta H_{вз}$ с увеличением содержания наполнителя, по-видимому, связано с тем, что при увеличении концентрации наполнителя свыше 2 % (масс.) происходит агрегирование наночастиц, приводящее к уменьшению активности поверхностных слоев наполнителя, что подтверждают рентгеноспектральные исследования образцов полимерного композиционного материала [13].

Таким образом, существование взаимосвязи между энтальпиями плавления, кристаллизации, внутримолекулярного взаимодействия и структурой полимерного композиционного материала от-

крывает возможности управления физико-механическими и триботехническими свойствами композитов на основе политетрафторэтилена, наполненных ультрадисперсной керамикой, в процессе их формирования путем варьирования содержания наполнителя.

Поляризационные эффекты модифицированного политетрафторэтилена

Использованная в работе ультрадисперсная керамика синтезирована по технологиям плазмо- и механохимии. Синтез осуществляется в сильно неравновесных условиях, что обуславливает наличие на поверхности частиц нескомпенсированных связей, реакционных центров, дефектов и др. [21]. Развитая поверхность керамического вещества оказывает влияние как на решеточную, так и на электронную его подсистему, возникающие при этом аномалии в поведении электронов, фотонов и других элементарных возбуждений влекут за собой изменение физических свойств ультрадисперсной керамики по сравнению со свойствами соответствующих массивных кристаллов [22].

Для выявления закономерностей взаимодействия «политетрафторэтилен—ультрадисперсная керамика» были проведены исследования по определению поверхностного заряда керамических частиц и его поляризующего влияния на полимер. Методом термостимулированной деполяризации установлено, что частицы ультрадисперсной керамики несут естественный поляризационный заряд [23]. Измерения показали также, что частицы оксида алюминия, отличающиеся высокой дисперсностью и развитой удельной поверхностью, имеют повышенный поляризационный заряд по сравнению с частицами оксинитрида алюминия-кремния [12, 24]. При наполнении политетрафторэтилена ультрадисперсной керамикой происходит поляризация полимера с формированием граничного слоя, от толщины которого зависит механизм кристаллизации связующего.

На рис. 3 приведены спектры токов термостимулированной деполяризации политетрафторэтилена и композита на его основе с ультрадисперсной керамикой.

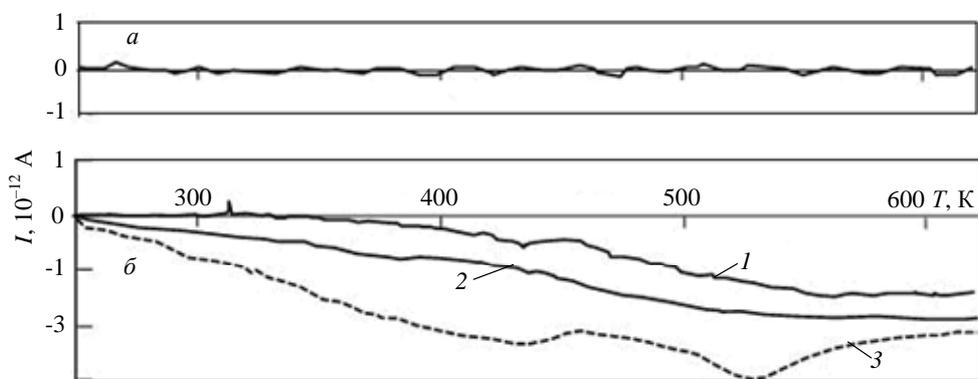


Рис. 3. Спектры токов стимулированной деполяризации политетрафторэтилена (ПТФЭ) и композитов на его основе:

a — ПТФЭ; *б* — ПТФЭ, наполненный оксинитридом Al-Si (1), оксидом алюминия (2), активированным Al_2O_3 (3)

Таблица 1

Удельная теплоемкость, доля межфазных слоев и толщина граничного слоя в наполненном ультрадисперсной керамикой политетрафторэтилене (ПТФЭ) в зависимости от степени наполнения.

Обозначения: c_n — содержание наполнителя; τ — время активации; C_p — удельная теплоемкость; b — доля межфазных слоев; δ — толщина граничного слоя

Материал	c_n , %(масс.)	τ , с	C_p , кДж/(кг·К)	b	δ , Å
ПТФЭ (исходный образец)	—	—	0,934	—	—
ПТФЭ + оксинитрид Al-Si	1	0	0,894	0,043	200
	2	0	0,842	0,098	234
	2	120	0,805	0,138	323
	5	0	0,785	0,159	140
ПТФЭ + Al ₂ O ₃	1	0	0,845	0,079	266
	2	0	0,804	0,124	309
	2	120	0,779	0,158	434
	5	0	0,768	0,163	215

Видно, что исходный полимер электрически нейтрален. Введение в полимер частиц ультрадисперсной керамики, обладающих естественным электрическим зарядом, приводит к возникновению поляризационных эффектов в композиционном материале. В наполненном политетрафторэтилене регистрируется стабильный ток термостимулированной деполяризации, соответствующий релаксации заряда, наведенного в поле частиц наполнителя. Спектр токов для полимерного композита, наполненного активированным наполнителем, характеризуется повышенной силой тока, что свидетельствует о наведении достаточно высокого поляризационного заряда при включении в полимер активированного наполнителя. Это связано с большой удельной поверхностью частиц и наличием в кристаллической решетке активированного наполнителя активных реакционных центров и дефектов, являющихся ловушками носителей заряда.

На основании экспериментально полученных значений удельной теплоемкости полимерного композиционного материала в зависимости от степени наполнения и поляризационного заряда частиц ультрадисперсной керамики рассчитана толщина граничного слоя и доля межфазных слоев в композите (табл. 1). Анализ этих данных показывает, что увеличение концентрации ультрадисперсной керамики приводит к снижению удельной теплоемкости полимера, что связано с переходом некоторой части макромолекул из объема в граничные слои вблизи твердой поверхности. Доля полимера, находящегося в граничном слое, увеличивается с повышением содержания керамики в системе, однако полученная зависимость не симбатна: по мере повышения содержания керамики доля межфазных слоев стремится к некоторому предельному значению. Максимальная толщина граничного слоя достигается при содержании наполнителя 2 %(масс.) [24].

Механическая активация ультрадисперсной керамики способствует существенному (в 1,5 раза) росту толщины граничного слоя, особенно в случае оксида алюминия. Очевидно, интенсивное формирование гранич-

ного слоя при использовании этого наполнителя обусловлено высоким поляризационным зарядом на частицах оксида алюминия.

На основании проведенных исследований были развиты представления о физико-химических процессах формирования полимерных композиционных материалов, наполненных ультрадисперсной керамикой, установлены закономерности влияния поляризационного заряда частиц наполнителей на структуру и рабочие характеристики композитов [24, 25].

Показано, что ультрадисперсная керамика изменяет механизм кристаллизации полимеров благодаря наличию на частицах поляризационного заряда, в поле которого происходит поляризация и структурирование связующего. Поляризационный механизм дополняет традиционные представления о физико-химической природе наполнения полимеров и позволяет объяснить высокую эффективность ультрадисперсных керамических наполнителей [12, 25].

Трибохимические и триботехнические исследования полимерных композиционных материалов

Известно [26], что существенную роль в износе полимерных материалов играют трибохимические процессы. Методом масс-спектрометрии исследованы трибохимические реакции, протекающие при трении композитов на основе политетрафторэтилена с ультрадисперсным наполнителем при различных концентрациях и химической природе наполнителя.

О характере трибохимических реакций можно судить по зависимости полного ионного тока износа от температуры [13] (рис. 4). Первый широкий максимум отражает выделение низкомолекулярных (m/z до 431) фрагментов полимерной цепи. Активное выделение этих продуктов в низкотемпературной области (до 670 К) свидетельствует об интенсивной трибодеструкции наполненного политетрафторэтилена. Наиболее высокая интенсивность газовыделения наблюдается в реакциях композитов, содержащих 10 %(масс.) керамики. Для

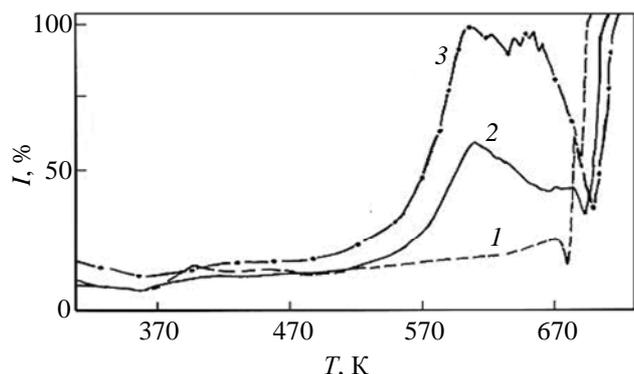


Рис. 4. Зависимость полного ионного тока, обусловленного продуктами износа политетрафторэтилена (ПТФЭ) и композитов на его основе:

1 — ПТФЭ; 2 — ПТФЭ + Si₃N₄-Al₂O₃-AlN (2 % масс.); 3 — ПТФЭ + Si₃N₄-Al₂O₃-AlN (10 % масс.)

этого состава полимерного композиционного материала зарегистрирована мультиплетность пика на температурной зависимости полного ионного тока, что указывает на трибодеструкцию сшитых фрагментов макромолекулы [27].

На основании полученных результатов установлены следующие закономерности износа полимерных композиционных материалов [27, 28].

1. Трибохимические превращения в исходном политетрафторэтилене затрагивают С-С-связи, при этом выделяются крупные фрагменты макромолекул.

2. Введение в политетрафторэтилен до 2 % (масс.) ультрадисперсной керамики повышает интенсивность трибохимических реакций. Наряду с деструкцией протекают процессы структурирования, скорость которых зависит от химической природы наполнителя, выполняющего каталитическую роль в реакциях сшивки мак-

ромолекул. При увеличении содержания наполнителя до 10 % (масс.) трибохимические процессы усиливаются, захватывая связи С-Ф, что зафиксировано масс-спектрометрическими исследованиями продуктов трибодеструкции полимерных композитов [13, 28]. Увеличение концентрации активных радикальных и ионных фрагментов, образующихся в результате трибохимического распада полимерного связующего, сопровождается интенсификацией процессов структурирования с участием ультрадисперсной керамики и формированием вблизи поверхности трения слоев полимерных композиционных материалов, отличающихся высокой структурной организацией.

Химическая природа керамики определяет не только интенсивность трибохимических реакций, но и морфологию поверхностных слоев композитов. Показано, что в процессе трения активные частицы керамики локализуются на поверхностях трения, содержание которых растет с увеличением концентрации наполнителя, о чем свидетельствуют исследования химического состава и топографии поверхностей трения.

Введение механоактивированных частиц ультрадисперсной керамики приводит к формированию политетрафторэтилена сетчатой структуры на поверхности трения. Этот слой выполняет роль защитного экрана, локализирующего контактные деформации и предохраняющего материал от изнашивания.

Разработанные антифрикционные материалы на основе политетрафторэтилена и активированных синтетических ультрадисперсных керамик и природных наполнителей (цеолиты, алмазные отходы) [13] характеризуются повышенными износостойкостью (в 100—370 раз) и деформационно-прочностными характеристиками (на 20—30 %) по сравнению с исходным полимером (табл. 2).

Таблица 2

Деформационно-прочностные и триботехнические характеристики модифицированного политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Обозначения: σ — предел прочности на растяжение; ϵ — относительное удлинение при разрыве; I — скорость износа; f — коэффициент трения

Состав	σ , МПа	ϵ , %	I , 10 ⁻⁶ кг/ч	f
ПТФЭ	20—22	300—320	70—75	0,04
ПТФЭ+CoAl ₂ O ₄ (2—5 % масс.)	19—25	330—400	0,2—2,6	0,15—0,18
ПТФЭ + Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃ -AlN (2—5 % масс.)	18—25	275—330	0,8—8,0	0,17—0,19
ПТФЭ + Si ₃ N ₄ -Y ₂ O ₃ -YN (2—5 % масс.)	19—24	260—310	0,4—3,6	0,16—0,18
ПТФЭ + Si ₃ N ₄ -B ₂ O ₃ -BN (2—5 % масс.)	16—18	200—250	0,4—2,6	0,16—0,18
ПТФЭ + 2MgO-2Al ₂ O ₃ -5SiO ₂ (1—2 % масс.)	22—23	310—320	6,0—6,4	0,18—0,19
ПТФЭ + Cr ₂ O ₃ (2 % масс.)	22—24	320—330	1,8—2,8	0,22
ПТФЭ + ZrO ₂ (2 % масс.)	22—24	300—320	2,8—3,2	0,20
ПТФЭ + Al ₂ O ₃ (0,5—2 % масс.)	24—26	350—450	0,2—0,4	0,10
ПТФЭ + MgAl ₂ O ₄ (2—5 % масс.)	21—22	330—340	0,2—0,4	0,15

Заключение

В результате комплексного исследования механизма формирования наполненных систем на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсной керамики сформулированы следующие физико-химические принципы разработки триботехнических материалов:

— наличие естественного поляризационного заряда на частицах ультрадисперсной керамики, в поле которого происходит кристаллизация полимера;

— управление структурой материалов путем регулирования надмолекулярной структуры связующего и формирования трехмерных кластерных структур из нанометровых частиц наполнителя;

— особые поверхностные свойства и высокая поверхностная энергия обеспечивают адсорбционную активность частиц ультрадисперсной керамики к полимеру и, как следствие, приводят к интенсивному структурообразованию в связующем с образованием структурных элементов с высоким уровнем адгезии на границе раздела фаз полимер-наполнитель;

— регулирование трибохимических реакций на фрикционном контакте и процессов формирования кластерной структуры из координированных частиц наполнителя на поверхности трения.

Разработанные материалы успешно используются в узлах трения различных машин, эксплуатируемых на предприятиях АК «Золото Якутии», ОАО «Алмазы России-Саха», ГК «Якутуголь», нефтегазодобывающих организациях НАК «Саханефтегаз» и др., в том числе в технике зарубежного производства – карьерных автосамосвалах «М-200» и «НД-1200», экскаваторах «Марион» и бульдозерах «Комацу».

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-08-00931а).

Авторы благодарны д.т.н. Л.С. Пинчуку и д.т.н. В.А. Гольдаде (Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси) за проведение измерений зарядового состояния частиц ультрадисперсной керамики и композитов и д.х.н. А.П. Краснову (Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН) за проведение трибохимических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника, 1976, 432 с.
2. Briscoe V.J. Fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes. London: NATO ASI series, 1990, p. 167—181.
3. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. М.: Машиностроение, 1993, 454 с.
4. Черский И.Н. Поведение полимеров при низких температурах. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1974, с. 3—4.
5. Шокин Ю.И., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Шабанов В.Ф. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, №5, с.100—114.
6. Попов С.Н. Дисс. ... докт. техн. наук, Новосибирск, 1996, 250 с.
7. Перелечко И.И. Свойства полимеров при низких температурах. М.: Химия, 1977, 277 с.
8. Вигли Л.А. Механические свойства материалов при низких температурах. М.: Мир, 1974, 373 с.
9. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в трибологии. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004, 262 с.
10. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В. И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. М.: Машиностроение, 2005, 240 с.
11. Охлопкова А.А., Адрианова О.А., Попов С.Н. Модификация полимеров ультрадисперсными наполнителями. Якутск: ЯФ изд-ва СО РАН, 2003, 224 с.
12. Охлопкова А.А., Виноградов А.В., Пинчук Л.С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. Гомель: ИММС НАНБ, 1999, 164 с.
13. Охлопкова А.А. Дисс....докт. техн. наук, Гомель, 2000, 295 с.
14. Okhlopkova A.A., Sleptsova S.A. Mechanics of composite materials, 2003, v. 39, № 2, p. 123—128.
15. Лунатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова Думка, 1980, 260 с.
16. Соломко В.П. Химия и технол. высокомолекул. соед., 1975, т. 7, с. 115—156.
17. Адрианова О.А. Дисс....докт. техн. наук, Москва, 2000, 337 с.
18. Привалко В. П., Новиков В. В., Яновский Ю. Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. Киев: Наукова Думка, 1991, 232 с.
19. Толстая С.Н. Успехи коллоидной химии, 1973, с. 348—353.
20. Соломко В.П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры. Киев: Наукова Думка, 1980, 263 с.
21. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1986, 304 с.
22. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лаповок В.Н. Физические явления в ультрадисперсных металлических средах. М.: Энергоатомиздат, 1984, 224 с.
23. Pinchuk L.S., Goldade V.A. Zotov S.V., Okhlopkova A.A., Vиноградов A.V. Int. Journal Polym. Mater., 2000, v. 46, p. 11—25.
24. Охлопкова А.А., Пинчук Л.С., Зотов С.В. и др. Ж. эксперим. и теор. физики, 2000, т. 70, № 2, с. 38—42.
25. Петрова П.Н., Слепцова С.А., Попов С.Н., Аввакумов Е.Г. Ж. структ. химии, 2004, т. 45, с. 172—177.
26. Краснов А.П. Автореф. дисс. ... докт. хим. наук, Москва, 1988, 40 с.
27. Охлопкова А.А., Виноградов А.В., Устыч Ю.Н., Краснов А.П. Трение и износ, 1997, т. 17, № 1, с. 114—120.
28. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Попов С.Н., Аввакумов Е.Г. Химия в интересах устойчивого развития, 2004, № 12, с. 627—636.