

УДК 621.893.539.62

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ ПРИ ТРЕНИИ В ВОДНЫХ СРЕДАХ, СОДЕРЖАЩИХ СВОБОДНЫЙ АБРАЗИВ.

В. Я. ШЕРБА^а, В. П. КИРИЛЕНКО^б, В. Я. ПРУШАК^а, А. Л. ЗАЙЦЕВ^{б+}

Изучены триботехнические свойства ряда термопластичных и терморезистивных полимеров, а также композитов на их основе в условиях трения об абразивную прослойку из карбида кремния. Основным фактором, определяющим износостойкость полимерного материала при трении со свободным абразивом и смазывании водой, является твердость. Износ металла и коэффициент трения характеризуются экстремальной зависимостью от твердости полимера. Установлено, что причина этого явления обусловлена различной шаржируемостью поверхности трения абразивными частицами и металлооксидными продуктами изнашивания. Показано, что путем модифицирования терморезистивного связующего активными наполнителями органического и минерального происхождения можно в широких пределах изменять триботехнические характеристики металлополимерной пары трения.

Ключевые слова: свободный абразив, износостойкость, шаржирование, твердость, водная смазка.

Введение. Уплотнительные элементы, подшипники скольжения, а также абразивный инструмент при трении в присутствии смазочного материала или смазочно-охлаждающей жидкости в ряде случаев подвергаются воздействию свободного абразива, который может содержаться в исходной жидкости, присутствовать в ней как результат изнашивания одной из трущихся поверхностей или попадать в зону трения из окружающей среды. В этом случае триботехнические свойства материалов сопряжения существенно изменяются вследствие проникновения абразивных частиц в зону трения и реализации трения контактирующих поверхностей об абразивную прослойку.

Изнашивание материалов при трении со свободным абразивом характеризуется сложным комплексом процессов, зависящих от соотношения механических свойств взаимодействующих материалов, нагрузки, формы и размеров частиц абразива, смазывающих свойств жидкости и т.д. [1]. В зависимости от свойств контактирующих материалов может наблюдаться шаржирование поверхностей абразивом, вследствие его внедрения и закрепления в поверхностном слое, что приводит к изменению характера фрикционного взаимодействия. Применительно к полимерным материалам данный процесс, по-видимому, будет иметь первостепенное значение, вследствие низкой твердости полимерного материала по сравнению с металлом. Триботехнические характеристики композиционных материалов на полимерной основе при трении со свободным абразивом могут зависеть от типа полимерного связующего, его адгезионной способности к наполнителю, стойкости к воздействию жидкой окружающей среды и механических свойств.

Характеристики износостойкости пар трения полимер – металл необходимы для конструирования узлов трения, работающих в условиях трения со свободным абразивом и жидким смазочным материалом. Однако, в настоящее время имеется явный недостаток экспериментальных данных по этому вопросу. В этой связи, целью данной работы явилось

^а Институт проблем ресурсосбережения, Солигорск.

^б Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого АН Беларуси. 246652, Гомель, Кирова, 32а.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

изучение фрикционных свойств и особенностей абразивного изнашивания ряда полимеров при трении с металлом и смазывании водой, содержащей свободный абразив.

Методика экспериментальных исследований. В качестве объектов исследования выбраны полимерные материалы, отличающиеся химическим строением и физико-механическими свойствами: полиэтилен низкого давления (ПЭНД, ГОСТ 16338-88), полипропилен (ПП, ТУ 6-05-1105-85), поливинилбутираль (ПВБ, ГОСТ 9439-88), сополимер формальдегида с диоксолоаном (СФД, ТУ 6-05-1543-82), фенолформальдегидная смола (ФФС, ГОСТ 901-78) эпоксифенольная смола (ЭФП), полиуретан (ПУ, марки ВИТУР-М), полиамид (ПА-6, ОСТ 6-06-09-79), полисульфон (ПС), некоторые смеси полимерных материалов и композиции на их основе, содержащие износостойкие добавки и наполнители. Трение осуществлялось по серому чугуна (СЧ-24-44, ГОСТ 1412-78), твердостью 8,0 ГПа, со структурой мелкопластинчатого перлита и наличием включений завихренного графита. Абразивом служил карбид кремния зеленый (КЗ, ГОСТ 3647-80), твердостью 25 ГПа и максимальным размером зерен 120 мкм. Средний размер абразивного зерна составлял 60 мкм.

Триботехнические испытания проводили при смазывании дистиллированной водой, давлении 0,20 МПа и скорости скольжения 2,7 м/с на установке, реализующей трение вращения торцов двух цилиндрических образцов. Коэффициент взаимного перекрытия был равен единице. Время испытаний составляло 20 мин, содержание свободного абразива в жидкой смазке 2,5 об.%. Введение абразива в зону трения производилось засыпанием навески карбида кремния (5 г) в испытательную камеру после приведения испытуемых материалов в статический контакт. В процессе экспериментов фиксировались линейный износ, скорость линейного изнашивания сопряжения, сила трения и температура смазочного материала. Износ полимерного материала и металлического контртела оценивался взвешиванием на аналитических весах с последующим пересчетом массового износа в объемный и линейный износ. Определение микротвердости и оптические исследования поверхностей трения проводились на микроскопе Neophot-2 в отраженном свете.

Результаты исследований и их обсуждение. Классические исследования закономерностей изнашивания металлов, выполненные в работах [1-3], показывают, что характеристики трения в условиях абразивного изнашивания подчиняются линейной зависимости от твердости. Однако, как было установлено в работе [4], триботехнические характеристики полимерных материалов при гидроабразивном изнашивании связаны более сложной зависимостью с механическими характеристиками. В этой связи, были изучены зависимости коэффициента трения, линейного износа металла и объемного износа полимера от микротвердости (рисунок).

Линейный износ металлического контртела характеризуется экстремальной зависимостью от твердости полимера. Износ чугуна возрастает с ростом микротвердости полимера, а после достижения максимума при $H = 100...200$ МПа падает (рисунок, а), достигая минимального значения для фенолформальдегидной и эпоксифенольной смол. При определенной твердости полимерного материала (ПП, ПВБ, ПА) наблюдается повышенный износ чугунного контртела. Минимальный износ контртела при трении в присутствии свободного абразива обеспечивают термореактивные полимеры. Использование термопластов, обладающих низкой микротвердостью за исключением ПУ, приводит к повышенному износу металла.

Объемный износ полимерных материалов (рисунок, б) связан линейной зависимостью с логарифмом микротвердости. Исключением является полиуретан. Для таких полимеров, как ПЭНД, ПУ, ПА, ПВБ характерен положительный объемный износ, который вызван внедрением в поверхностный слой этих полимеров карбидов кремния. Повышенный износ характерен для ПС, ФФС и ЭФП, имеющих относительно высокую твердость.

Зависимость коэффициента трения от твердости полимера описывается кривой с максимумом, соответствующим твердости 100–110 и 200–300 МПа. Реактопласты как и высокоэластичный полиуретан характеризуются относительно низким коэффициентом трения, достигающим 0,12–0,13. Полимеры, которые подвержены гидролизу, имеют высокий или повышенный коэффициент трения (СФД, ПС, ПВБ).

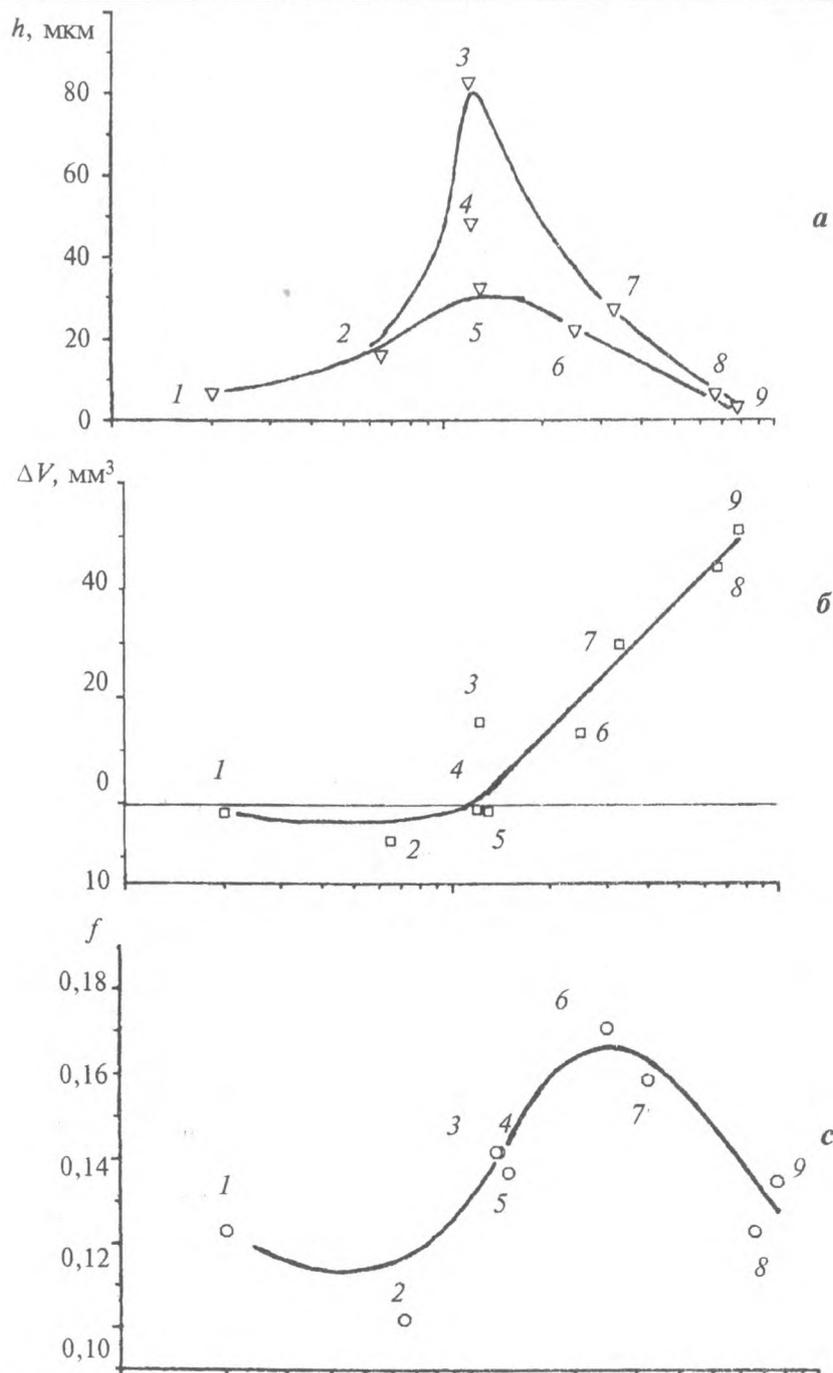


Рис. Зависимость триботехнических характеристик пары трения металл — полимер от твердости полимера: а — линейный износ чугуна СЧ-24-44; б — объемный износ полимера; в — коэффициент трения. 1 — ПУ; 2 — ПЭНД; 3 — ПП; 4 — ПВБ; 5 — ПА; 6 — СФД; 7 — ПС; 8 — ЭФП; 9 — ФФС.

Полученные данные показывают, что при трении со свободным абразивом износ полимерных материалов можно описать линейной зависимостью от логарифма микротвердости. Другие триботехнические параметры сложным образом зависят от ряда факторов, наиболее важным из которых является шаржирование полимера.

Данный вывод подтверждается оптическими исследованиями поверхностей трения полимерных материалов. Основным процессом, сопровождающим трение в присутствии свободного абразива, является внедрение в поверхностный слой полимерного материала абразивных частиц, которое характерно для всех исследованных полимерных материалов. В поверхностный слой ПП внедряются мелкие карбиды кремния размером 17–30 мкм, оксиды железа, а также частицы чистого железа размером не более 20 мкм.

Аналогичный вид имеют поверхности трения ПЭНД и ПА. Однако на них обнаруживается значительно меньшее количество металлооксидных включений.

Внедрение зерен SiC, размеры которых соответствуют фракции абразива со средним и максимальным размером, характерно для ПУ, ПЭНД, ПВБ, СФД, ПС и ФФС. Количество внедренных абразивных зерен зависит от природы полимерного материала и определяется его химическими свойствами. Для всех исследованных полимеров наблюдается определенная взаимосвязь между количеством внедренных абразивных зерен и износом металла. Чем больше шаржирование поверхности трения крупными зернами – тем ниже износ металла. В тоже время интенсивное шаржирование металлооксидными продуктами изнашивания и мелкими абразивными частицами ведет к повышенному изнашиванию металла. Внедрение абразивных частиц в поверхностный слой полимера сопровождается образованием дорожек скольжения и канавок, высота которых совпадает с средним размером абразивных частиц. Это способствует изменению процесса фрикционного взаимодействия: из абразивного взаимодействия оно переходит в трение скольжения и частично в гидроабразивное трение с элементами качения и скольжения крупных абразивных зерен в канавках и вне дорожки скольжения. По этой причине резко уменьшается интенсивность изнашивания металла до тех пор, пока процесс гидроабразивной эрозии не приведет к удалению внедренных в поверхностный слой полимера абразивных частиц.

Для реализации повышенного износа металла полимерная связка должна иметь оптимальные механические характеристики и оказывать коррозионное воздействие на поверхность металла. В этой связи перспективно использование смесей полимеров на основе фенольных смол, которые легко подвергаются химическому модифицированию. Модифицирование фенольного олигомера осуществлялось полимерами, которые могут оказывать коррозионное действие посредством образования активных свободных радикалов [5]. К таким полимерам относятся ПП, ПА, ПВБ и ЭФП.

Представленные в табл. 1 данные показывают, что для применения в качестве связующего шлифовального инструмента, наиболее эффективны смеси на основе ФФС, модифицированной ПА и ПП. Повышение приработочного износа достигается благодаря ряду причин. Для модифицированного полимера изменяется количество и фракционный состав внедренных в поверхностный слой композита частиц абразива. Так, при трении, в объем ФФС внедряются зерна размером 60–70 мкм. В случае ее модификации ПА внедряются в основном частицы размером до 50 мкм, а ПП – около 10 мкм. При этом концентрация абразивных частиц в поверхностном слое композита значительно выше, чем в слое немодифицированного полимера. Кроме этого, модификация ПА изменяет химическую активность связующего: амидные группы снижают коррозионную стойкость металла, что способствует росту интенсивности изнашивания. Модифицирование ФФС термопластами приводит к уменьшению твердости полимерной связки. Этот недостаток устраняется путем выбора дисперсного наполнителя. Для оценки эффективности действия наполнителей при трении со смазкой в присутствии свободного абразива использовали оксиды железа, кремния, свинца, мел, феррит бария, окись хрома, алюмосиликаты кальция и некоторые другие соединения. Результаты триботехнических испытаний представлены в табл. 2. Анализ экспериментальных данных показал, что скорость изнашивания обрабатываемой детали зависит от состава композита.

Таблица 1. Триботехнические характеристики пары полимер–металл при трении в присутствии свободного абразива

Материал	Износ пары трения, мг		Коэффициент трения	Скорость изнашивания, в период приработки, мг/мин.	
	чугун	композит		чугун	композит
ПА	59,5	+1,6	0,137	10,0	2,9
ПВБ	89,2	17,2	0,142	5,9	4,7
ПП	150,0	2,0	0,150	14,4	6,2
ФФС	12,4	64,6	0,136	37,2	0,5
ФФС+50%ПА6	31,6	44,2	0,095	59,2	1,6
ФФС+50%ПВБ	20,5	38,1	0,102	38,4	0,8
ФФС+50%ПП	25,1	31,2	0,145	125,5	1,3
ФФС+ЭДС	12,1	53,2	0,123	36,3	0,7

При наполнении полимера ферритом бария, оксидом свинца, оксидом железа скорость изнашивания контртела максимальна. Ряд наполнителей способствует повышению производительности инструмента, однако не позволяет решать наиболее важную задачу — повышение износостойкости композита. Аналогичные результаты получены при шлифовании абразивосодержащим композитом твердых сплавов и сталей.

Таблица 2. Триботехнические характеристики композиционных материалов, наполненных дисперсными наполнителями, в присутствии воды и свободного абразива

Состав композиционного материала	Линейный износ чугуна, мкм	Скорость изнашивания чугуна, мг/мин	Суммарный линейный износ пары трения, мкм	Коэффициент трения
ФФС+SiC	9,5	1,05	140	0,154
ФФС+ПА+SiC	4,6	0,47	32	0,161
ФФС+ПВБ+ SiC	6,5	0,63	0	0,114
ФФС+ПВБ+SiC+Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +Fe ₂ O ₃	7,4	0,86	43	0,140
ФФС+BaFe ₃ O ₄	15,5	1,76	1300	0,194
ФФС+CaCO ₃	4,6	0,48	63	0,116
ФФС+Fe ₂ O ₃	27,4	1,18	1970	0,164
ФФС+CaAl ₂ SiO ₄	9,8	1,06	472	0,168
ФФС+PbO	21,0	4,60	293	0,095
ФФС+отходы алмазного производства	17,5	2,00	1000	0,182
ФФС+TiO ₂	14,0	1,60	790	0,154
ФФС+стекловолокно	3,5	0,36	137	0,116
ПП+SiC	5,6	0,60	10	0,154

Примечание: содержание наполнителя — 50%.

На основании выявленных особенностей изнашивания металлов, полимерных материалов и композиций на их основе был разработан композит, содержащий абразивный наполнитель, связующее и комплексную добавку. Шлифовальный инструмент, изготовленный из данного композита обеспечивает отсутствие переноса продуктов изнашивания и трибокоррозии на рабочую поверхность инструмента и характеризуется низкой шаржируемостью. Это обеспечивает высокое качество обработки металлов и сплавов при шлифовании в присутствии свободного абразива и смазывании водой.

Обозначения

h — линейный износ металлического контртела; V — объемный износ полимерного материала; f — коэффициент трения; H_{μ} — микротвердость.

Литература

1. Хрушов М. М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Москва: Наука (1970)
2. Доценко В. А. Изнашивание твердых тел. Москва: ВНИИТЭМР (1990)
3. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. Москва: Машиностроение (1976)
4. Тененбаум М. М. Гидроабразивная износостойкость материалов. // Трение и износ, 3 (1982), №1, 76-82
5. Логвиненко П.Н., Дмитриева Т.В., Исаев В.М. Влияние механохимически активированных взаимодействий компонентов на технологические свойства полимерсодержащих СОЖ. // Трение и износ, 5 (1984), №6, 1059–1063

Поступила в редакцию 12.03.96

Scherba V.Ya., Kirelenko V.P., Prushak V.Ya., Zaitsev A.L. Friction characteristics of polymers and composite materials in three body abrasion with water lubricant.

Thermoplastic and thermoreactive polymer friction properties in the process of three body abrasion with silicon carbide were studied. Wear of metal and friction coefficient are described by extreme dependencies from microhardness. The reason of this phenomena due to different abrasive particles and metaloxides wear products impact into the friction surfaces.