УДК 539.6+541.64+681.3.06

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПРЕСС-МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ[1]

Колесников В. И.[2]***, Сычёв А. П.***[3]***, Мясникова Н. А.***[4]***, Лапицкий В. А.***[5]***, Мясников Ф. В.***[6]

MECHANICAL AND FRICTION CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE ANTIFRICTION PRESS-MATERIAL FOR HIGH-GRAVITY LOADED FRICTION UNITS

Kolesnikov V. I., Sychev A. P., Myasnikova N. A., Lapitsky V. A., Myasnikov F. V.

New antifriction materials are designed on the basis of synthetic organic fibers and epoxy binding, which make it possible to obtain high-strength and heat-resistant antifriction presses-materials. For obtaining antifriction items of compound configuration (for example, perforated binary materials) the methods of modifying of the filling surface are developed. This allows us to increase adhesive ability of this surface and improve strength and friction characteristics of the material. The structure and kinetics of filming of friction transfer at metal-binary material friction is studied, which creates the base for developing new high-performance self-lubricating polymer compositions.

Keywords: composite material, wearing, friction characteristic, adhesive interaction, binary material, modifying of a surface, friction transfer.

Прогресс на транспорте связан с проблемой повышения износостойкости узлов трения, в решении которой важную роль играет создание новых полимерных композитов и смазочных материалов с заданными свойствами. Однако диапазон использования этих материалов сравнительно невелик и не отвечает требованиям производства. Одна из причин — отсутствие научно обоснованных методов определения фрикционных и адгезионных характеристик металлополимерных трибосопряжений, максимально учитывающих специфические свойства полимерных композитов, прежде всего их способность накапливать электрические заряды, генерировать активные продукты деструкции и образовывать в узле трения самосмазывающиеся пленки.

Повышенное внимание ученых к изучению узлов трения вызвано специфическими условиями эксплуатации подвижного состава, ростом скоростей движения в сочетании с высокими требованиями к оборудованию. Для снижения потерь на трение и изнашивание необходимо выявить причины выхода из строя трибосопряжений и разработать методы управления трибомеханическими, трибоэлектрическими, трибохимическими и т. п. процессами, протекающими на фрикционном контакте.

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ (07-08-00697).

[2]Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д-р тех. наук, профессор, ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, заведующий кафедрой теоретической механики; e-mail: rec@rgups.ru.

[3]Сычёв Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. транспорта, энергетики и новых композиционных материалов Южного научного центра РАН; e-mail: sap@rgups.ru.

[4]Мясникова Нина Алексеевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: myasnikova@rgups.ru

[5]Лапицкий Александр Валентинович, аспирант кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: sap@rgups.ru

[6]Мясников Филипп Васильевич, аспирант кафедры теоретической механики Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: zzk@rambler.ru

Таблица 1. Механические и трибологические свойства композиционного материла, полученного на основе эпоксидного связующего и органического волокна

№ п/п	Наименование показателя	Величина показателя по примерам						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Текучесть по спирали, мм	600	800	700	650	750	900	700
2	Возможность получения изделий сложной конфигурации	Возможно получение изделий любой конфигурации компрессионным и литьевым прессованием						
3	Предел прочности, МПа – при статическом изгибе, при 20^0C – при статическом изгибе, при 200^0C	350 160	320 170	340 190	310 180	440 210	380 200	420 220
4	Предел прочности, МПа – при сжатии, при 20^0C – при сжатии, при 200^0C	300 160	250 140	200 180	310 150	370 160	410 180	400 210
5	Удельная ударная вязкость, КДж/м^2	210	200	215	190	180	210	200
6	Коэффициент трения (V=0,5 м/с, P=1 МПа)	0,12	0,10	0,13	0,14	0,14	0,11	0,16

Создание новых конструкций узлов трения, постоянно растущие требования к эксплуатационным характеристикам машин и механизмов обуславливают необходимость разработки композиционных антифрикционных материалов. Триботехнические композиционные материалы на основе полимеров занимают важное место среди материалов, применяемых для изготовления фрикционных деталей. Это объясняется тем, что многие актуальные запросы триботехники удается удовлетворить путем применения специальных полимерных материалов, способных длительно эксплуатироваться без смазки, при повышенных температурах и в других экстремальных условиях [1].

Применяемый в настоящее время для изготовления деталей препрег на основе синтетических органических волокон и эпоксидного связующего позволяет получать высокопрочные и термостойкие антифрикционные пресс-материалы. Для получения антифрикционных изделий сложной конфигурации используется эпоксидный пресс-материал, получаемый путем вальцевания твердой смеси эпоксидных смол с наполнителем, состоящим из рубленого стекловолокна и графита [2]. Недостатками этих материалов являются сравнительно невысокие прочностные показатели, обусловленные разрушением в процессе вальцевания стекловолокна до размеров 200–500 микрон, а также появление абразивных частиц стекловолокна при длительной работе антифрикционных изделий.

Авторами разработаны новые композиционные антифрикционные пресс-материалы на основе органических волокон и эпоксидного связующего с высокими прочностными показателями, высокой теплостойкостью, а также технология изготовления, обеспечивающая возможность создания изделий любых конфигураций как компрессионным, так и литьевым прессованием, включая использование реактопластавтоматов. Этот материал предназначен для изготовления антифрикционных изделий сложных конфигураций (например, перфорированный бинарный материал), подвергаемых высоким механическим нагрузкам. Он может использоваться также в качестве конструкционного и электроизоляционного материала в электротехнике, электронике, в самолетостроении и в других отраслях. В табл. 1 приведены механические и трибологические свойства полученных пресс-материалов.

Трибологические испытания разработанных композиционных материалов (КМ) проводились на лабораторных машинах трения. Простота испытательного оборудования, экспрессность методов, сравнительно небольшая стоимость испытаний делают их наиболее рациональными при определении и уточнении отдельных трибологических характеристик материалов. Из-за сложности явлений, сопровождающих процессы трения и износа, при проведении лабораторных испытаний по определению фрикционно-износных характеристик материалов, для получения наиболее достоверных результатов необходимо проводить испытания на различных машинах трения, совокупность технических па-

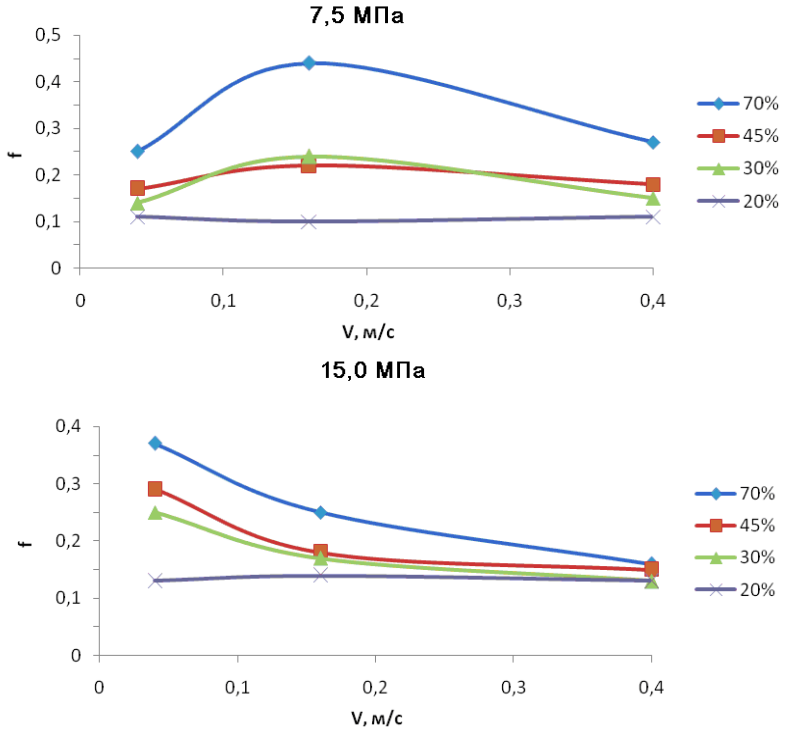

Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от скорости относительного скольжения для образцов КМ с различным содержанием волокон при нагрузке 7,5 и 15 МПа

раметров которых наиболее полно отвечала бы реальным условиям нагружения узла.

Трибологические характеристики КМ были исследованы на стандартных машинах трения СМТ-1, ИИ-5018; испытания КМ при трении с большими коэффициентами перекрытий проводились на модернизированной машине МИ-1М; при моделировании процессов трения реального трибосопряжения использовалась машина трения возвратно-поступательного движения 77МТ.

Антифрикционные и износостойкие свойства КМ были исследованы при нагрузках 0,5÷15 МПа и скоростях скольжения 0,01÷1,0 м/с. Указанные скоростные и нагрузочные режимы соответствуют условиям работы узлов и деталей подвижного состава, эксплуатируемого на сети РЖД, в частности, узлов трения электровоза ЧС-4т — втулки пантографа, втулки межтележечного сочленения, втулки подвески тягового редуктора, шарового вкладыша боковой опоры; электровоза ЧС-8 — втулки межтележечного сочленения, центральной шаровой опоры; электровоза ВЛ-80 — втулки каретки токоприемника; электропоезда ЭР-9п — скользуна боковой опоры. Содержание связующего одинаково для всех образцов.

На рис. 1 и 2 приведены зависимость коэффициента трения и износа исследуемых образцов КМ с различным содержанием волокон от скорости относительного скольжения.

В табл. 2–4 приведены зависимости коэффициентов трения и износа от скорости скольжения при удельных давлениях 5,0, 10,0, 15,0 МПа для КМ с армирующими волокнами различной природы.

Как уже отмечалось, разработанный композиционный материал может быть использован в качестве наполнителя в бинарных материалах [3], где основную нагрузку берет на себя металл (сталь, латунь, бронза), а высокие антифрикционные характеристики обеспечиваются твердым смазочным материалом, расположенным в пазах, углублениях, отверстиях перфорации. Для создания такого композита необходимо решить проблему надежного закрепления материала твердой смазки в отверстиях и углублениях силового каркаса, что определяется адгезионным взаимодействием поверхности твердого смазочного наполнителя с матрицей.

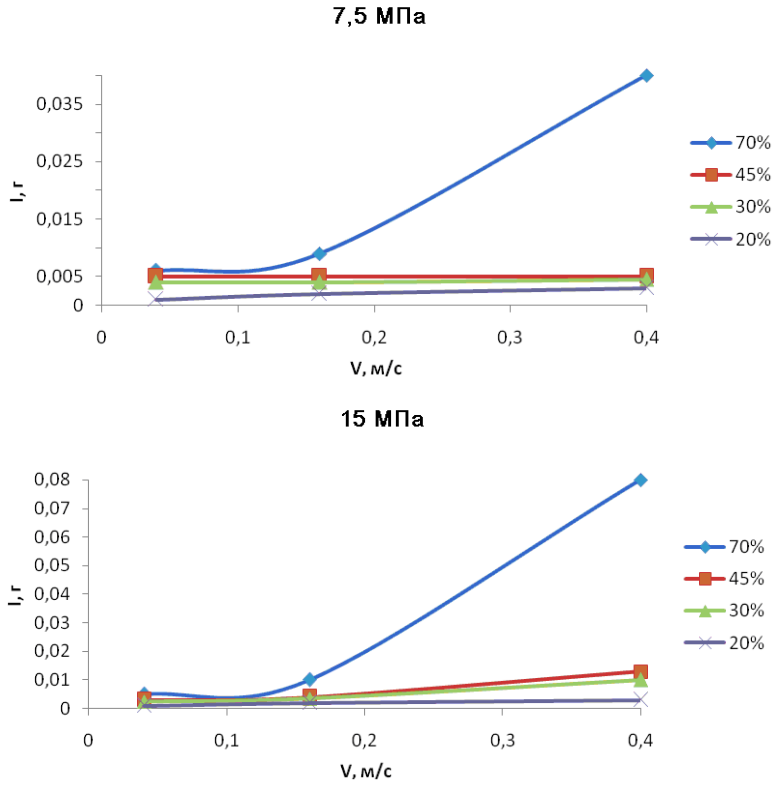

Рис. 2. Зависимость износа от скорости относительного скольжения для образцов КМ с различным содержанием волокон при нагрузке 7,5 и 15 МПа

Таблица 2. Зависимость коэффициента трения (f), износа (J) от скорости относительного скольжения при удельной нагрузке 5,0 МПа для КМ с армирующими волокнами различной природы

Армирующее волокно	Параметр	Скорость скольжения, м/с					
		0,004	0,008	0,016	0,05	0,1	0,2
Аримид	f	0,05	0,06	0,10	0,13	0,11	0,14
	$J \times 10^{-3}$кг	0,35	1,0	2,75	3,90	5,10	6,10
Оксалон	f	0,02	0,40	0,07	0,10	0,13	0,15
	$J \times 10^{-3}$кг	0,25	0,45	0,7	2,3	3,05	6,54
СВМ	f	0,02	0,09	0,1	0,12	0,16	0,23
	$J \times 10^{-3}$кг	0,35	0,85	0,90	1,05	3,40	8,15

Таблица 3. Зависимость коэффициента трения (f), износа (J) от скорости относительного скольжения при удельной нагрузке 10,0 МПа для КМ с армирующими волокнами различной природы

Армирующее волокно	Параметр	Скорость скольжения, м/с					
		0,004	0,008	0,016	0,05	0,1	0,2
Аримид	f	0,07	0,08	0,09	0,15	0,13	0,12
	$J \times 10^{-3}$кг	1,25	1,95	3,80	7,65	10,7	12,75
Оксалон	f	0,04	0,06	0,10	0,16	0,15	0,12
	$J \times 10^{-3}$кг	0,50	0,60	1,00	1,95	5,10	7,50
СВМ	f	0,06	0,07	0,08	0,10	0,13	0,13
	$J \times 10^{-3}$кг	0,65	0,75	1,60	4,50	5,70	9,60

Таблица 4. Зависимость коэффициента трения (f), износа (J) от скорости относительного скольжения при удельной нагрузке 15,0 МПа для КМ с армирующими волокнами различной природы

Армирующее волокно	Параметр	Скорость скольжения, м/с					
		0,004	0,008	0,016	0,05	0,1	0,2
Аримид	f	0,07	0,08	0,09	0,13	0,12	0,10
	$J \times 10^{-3}$кг	1,60	5,44	8,25	28,05	5,05	62,0
Оксалон	f	0,04	0,05	0,8	0,13	0,12	0,1
	$J \times 10^{-3}$кг	0,85	3,30	5,30	7,30	19,30	53,60
СВМ	f	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12
	$J \times 10^{-3}$кг	1,30	1,70	2,15	7,65	17,85	–

Для создания прочной адгезионной связи на границе раздела между металлической матрицей и полимерным наполнителем были выбраны способы модифицирования поверхности полимера, оптимизированы режимы обработки этой поверхности, а также разработаны методы контроля качества модифицированной поверхности наполнителя, основанные на совместном применение методов ЭСХА и ИК Фурье НПВО спектроскопии. Модифицирование позволило значительно повысить адгезионную способность поверхности наполнителя. Для низкополярных полимеров модифицирование поверхности является единственной возможностью создания прочного адгезионного соединения. Было показано, что наиболее стабильное состояние поверхности и лучшие адгезионные свойства получаются при обработке ее в плазме тлеющего разряда. Проведена обработка поверхности в плазме тлеющего разряда в вакуумной камере установки «Булат 6,6» в среде остаточного воздуха. Оптимизирован режим обработки поверхности в зависимости от давления остаточного воздуха в вакуумной камере, а также от электрических параметров тлеющего разряда по усилию расслаивания адгезионного соединения.

Используя современные методы исследования поверхности, разработаны методики исследования фрикционной пленки переноса на поверхности металлического образца методами ЭСХА и ИК-Фурье НПВО спектроскопии. Из анализа рентгеноэлектронных спектров можно получить информацию о качественном и количественном элементном составе и химических связях в поверхностных слоях толщиной в несколько нанометров. Из анализа спектров ИК-Фурье НПВО можно получить информацию о компонентном составе поверхности и распределении этих компонент по глубине образца на толщинах от долей до единиц микрометров. Основные преимущества ИК-спектроскопии с Фурье преобразованием обусловлены уменьшением времени на получение требуемой информации, повышением оптической пропускной способности, высокой точностью при определении характеристических частот полос спектра, простотой изменения спектральных диапазонов, наличием ЭВМ, возможностью применения математических методов обработки информации (разностные методы, дифференцирование, разрешение кривых, метод отношений и факторный анализ). Применение комплекса методов позволяет расширить и углубить представления о протекающих на поверхности трибосопряжения процессах. ИК-спектры снимались на ИК Фурье-спектрометре Series Nicolet 380 с приставкой НПВО и программным обеспечением EZ OMNIC в диапазоне частот 600–4 000 см$^{-1}$. Рентгеноэлектронные α-спектры — на системе исследования поверхности SPECS с использованием Al и Mg $K_{\alpha g}$ линий. Трибологические испытания при исследовании пленки фрикционного переноса проводились на машине трения возвратно-поступательного движения 77МТ. Такая конструкция машины трения позволяет через определенные временные интервалы контролировать состояние поверхности трибосопряжения, то есть наличие и кинетику формирования пленки фрикционного переноса, не нарушая эту поверхность.

Исследования наличия и стабильности фрикционной пленки в зоне трибоконтакта проводились в начальный промежуток времени через 20–30 с, а по истечении 5 мин. через каждые 10 мин. методом ИК Фурье-спектроскопии НПВО (поскольку этот метод позволяет контролировать поверхность

трибосопряжения, не нарушая ее) и методом ЭСХА спектроскопии после окончания трибоконтакта. Получено, что перенос полимера на металлическую поверхность происходит поочередно от компонент полимерного композита, поскольку в ИК-спектрах первоначально появляются полосы связующего, и лишь через 2–4 мин. трибоконтакта становятся заметны валентные колебания наполнителя, интенсивность которых возрастает со временем трибосопряжения, причем время появления этих полос и их интенсивность зависят от степени модифицирования наполнителя. Отсюда аналогично можно сделать вывод о слоистой структуре пленки фрикционного переноса, то есть о поочередном выходе ее компонент [4]. Непосредственно к металлу прилегает слой из эпоксидной смолы и лишь на него ложится пленка наполнителя, свойства которой зависят от степени модифицирования наполнителя. Эти пленки снижают коэффициент трения, ослабляют износ, прежде всего, уменьшая кажущуюся шероховатость сопряженной поверхности. Раскрытие механизма фрикционного переноса создает базу для разработки новых высокоэффективных самосмазывающихся полимерных композиций. Таким образом, современными спектроскопическими методами исследования поверхности изучен механизм и кинетика образования пленки фрикционного переноса полимерного композита на поверхность контртела. Связь пленки фрикционного переноса с металлом может иметь химическую природу. Трибологические исследования разработанных бинарных антифрикционных самосмазывающихся материалов, модифицированных в плазме тлеющего разряда, и изучение поверхностей трибосопряжения показали, что пленка фрикционного переноса на поверхности металлического контртела содержит соединения, способные функционировать в трибосопряжении несколько часов, постоянно возобновляясь в пленке за счет химических реакций при трении.

С нашей точки зрения разработанные материалы весьма перспективны для использования в тяжелонагруженных узлах трения грузовых вагонов, где износ может превышать 0,1–0,2 мм и более. К наиболее тяжелонагруженным сопряжениям подвижного состава относится пятник-подпятник грузового вагона. Учитывая, что потери от преждевременного выхода из строя пятника-подпятника грузового вагона не ограничиваются только стоимостью его ремонта, но и сопровождаются непроизводительным простоем вагона и увеличением износа гребней колес и рельсов, вопрос повышения износостойкости сопряжения пятник-подпятник является весьма актуальным. Кроме того, прорабатывается возможность применения металлополимерных материалов при восстановлении таких узлов трения грузовых вагонов, как букса колесной пары и боковины тележки.

Литература

1. *Колесников В. И.* Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. М: Наука. 2003. 280 с.
2. Решение о выдаче патента РФ по заявке № 2006. 103545/04 (003873) от 06.02.2006 г.
3. *Колесников В. И., Мясникова Н. А., Кравченко В. Н.* Фундаментальные основы разработки новых металлополимерных материалов для узлов трения // Изв. Вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки. Спецвыпуск. 2007. С. 12–16.
4. *Колесников В. И., Мясникова Н. А.* Разработка антифрикционных самосмазывающихся композиционных материалов на основе явления фрикционного переноса // Вестник РГУПС. 2004. № 3. С. 22–25.

Ключевые слова: композиционный материал, износ, трибологические характеристики, адгезионное взаимодействие, бинарный материал, модифицирование поверхности, фрикционный перенос.

Статья поступила 16 февраля 2009 г.
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону
Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
© Колесников В. И., Сычёв А. П., Мясникова Н. А., Лапицкий В. А., Мясников Ф. В., 2009