

По износостойкости материалы на основе совмещенного связующего в $\sim 1,4-1,8$ раза превосходят материалы на основе чистого ФФС, поскольку введение каучука снижает склонность композита к хрупкому разрушению и, как следствие, повышает его сопротивление усталостному изнашиванию. Кроме того, каучук образует тонкую эластичную пленку на поверхности волокон и снижает внутренние напряжения на границе их раздела со связующим. Увеличение скорости скольжения сопровождается повышением интенсивности изнашивания композитов, что может быть связано с ростом температуры и снижением механических характеристик фрикционного материала (см. рисунок 2). Наибольшей износостойкостью обладает композит № 3 с повышенным содержанием адгезива (2 масс. %) и каучука (10 масс. %), которые повышают прочность и сопротивление композита усталости (кривая 3 на рисунке 2). Важно, что I_h этого композита слабо зависит от скорости скольжения.

Коэффициент трения всех композитов незначительно возрастает с увеличением нормальной нагрузки (контактного давления p). Так, в интервале $p = 0,5 \dots 1,6$ МПа f изменяется не более чем на 20 %. Однако при этом существенно изменяется интенсивность их изнашивания: повышение p в том же интервале сопровождается ростом I_h в 3–5 раз (см. рисунок 2). Влияние нагрузки на I_h связано с действием ряда факторов. В частности, при увеличении нагрузки возрастает коэффициент трения и, как следствие, увеличиваются наиболее опасные циклически повторяющиеся растягивающие напряжения за контактными площадками внедрившихся выступов. При этом температура в контакте повышается пропорционально давлению до 200–250 °С, что приводит к падению прочности, уменьшению модуля упругости и твердости композита и вызывает увеличение контактных деформаций поверхностного слоя и глубины внедрения выступов контртела. В результате возрастает интенсивность усталостного и абразивного изнашивания композитов.

Таким образом, наиболее износостойким и менее чувствительным к изменению нормальной нагрузки является композит № 3. Низкие значения I_h этого материала во всем интервале нагрузок обусловлены более высокими прочностными характеристиками и сопротивлением усталости. Стабильность коэффициента трения при изменении скорости скольжения и нормальной нагрузки у композитов на основе совмещенного связующего значительно выше, чем у композитов на основе чистого фенолоформальдегидного связующего.

УДК 621.891:629.4.077–592.59

ФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ТЕПЛОВОЗА

П. Н. БОГДАНОВИЧ, М. Ю. КОДНЯНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. Н. БУРЦЕВ

*Солигорский институт проблем ресурсосбережения
с опытным производством, Республика Беларусь*

Безопасность движения подвижного состава зависит от стабильности служебных характеристик гасителя колебаний тепловоза при изменяющихся режимах нагружения. В настоящее время для изготовления фрикционной накладки, определяющей плавность и эффективность гашения колебаний, применяют композиты на основе реактопластов. Однако повышение скорости движения подвижного состава требует создания новых материалов, коэффициент трения которых по металлу слабо зависит от скорости скольжения и колебаний нагрузки. Поэтому представляют интерес исследования, направленные на повышение механических и триботехнических свойств фрикционной накладки.

Механические характеристики материала определялись по ГОСТ 4651-2014 на разрывной машине «TIME WDW-100E». Триботехнические испытания проводилось на машине трения СМТ-1 по схеме вал – частичный вкладыш. Образцы вырезались в виде сегментов из колец высотой 10 мм, внутренним диаметром 40 мм, наружным – 60 мм. Площадь их поверхности трения составляла $2,0 \cdot 10^{-4}$ м². Контртело было изготовлено из чугуна в виде ролика наружным диаметром 40 мм и высотой 10 мм, а образцы – из композитов на основе фенолоформальдегидного связующего (ФФС), содержащих базальтовое волокно, бронзовые частицы и сажу. Для повышения прочности и износо-

стойкости композита и снижения степени зависимости коэффициента трения от режимов нагружения базальтовые волокна двух из партий образцов предварительно обрабатывались адгезивом.

Установлено, что обработка волокон и частиц наполнителя адгезивом приводит к увеличению прочности композита. Так, при содержании адгезива $C_a = 1$ масс. % его предел прочности повышается в 1,9 раза, а при $C_a = 3$ масс. % этот показатель увеличивается в 3,4 раза. Причина в том, что при обработке не только увеличивается адгезия ФФС к волокнам и частицам наполнителей, но и снижается внутренние напряжения в объеме изделия.

Композит, не содержащий адгезива, отличается низкой стабильностью коэффициента трения. Так, f возрастает от 0,18 при скорости скольжения $v = 1,2$ м/с до 0,85 при $v = 2,5$ м/с (кривая 1 на рисунке 1, а). С повышением v температура в зоне трения увеличивается. Это приводит к снижению твердости композиционного материала и, как следствие, к росту площади фактического контакта и глубины внедрения выступов контртела. В итоге увеличивается как молекулярная, так и механическая составляющие f .

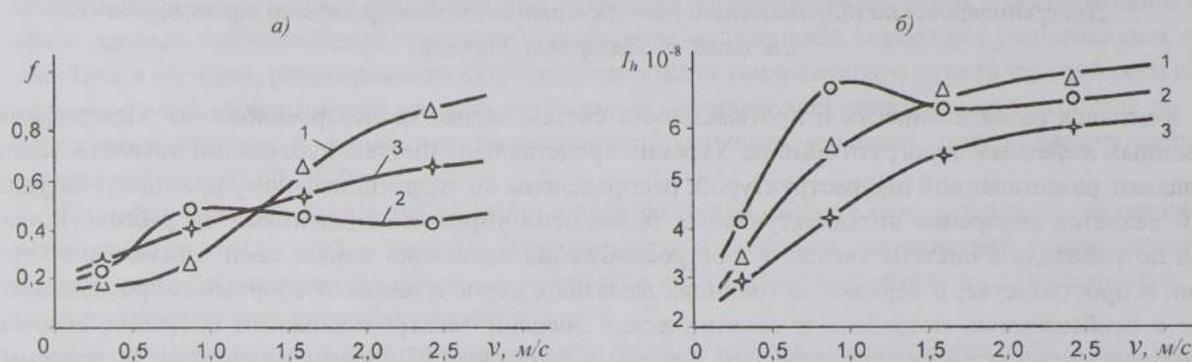


Рисунок 1 – Влияние скорости скольжения на коэффициент трения (а) и интенсивность изнашивания (б) композита при $p = 1$ МПа: 1 – $C_a = 0$; 2 – $C_a = 1$ масс. %; 3 – $C_a = 3$ масс. %

Для композита с $C_a = 1$ масс. % характерна менее выраженная зависимость $f(v)$: в интервале $v = 0,3 \dots 0,8$ м/с f увеличивается до 0,48 и далее практически не зависит от скорости скольжения (кривая 2). Стабилизация f связана с плавлением адгезива на пятнах контакта и снижением по этой причине сопротивления сдвигу, что компенсирует влияние температуры на механические свойства композита и молекулярную составляющую трения. Таким образом, благодаря конкурирующему влиянию двух факторов (снижение сопротивления сдвигу и увеличение фактической площади контакта) обеспечивается стабильное значение f в широком интервале скоростей. При этом f достигает требуемого для фрикционных материалов значения 0,4. Если $C_a = 3$ масс. %, увеличение скорости скольжения вызывает монотонное повышение коэффициента трения (кривая 3). Однако зависимость $f(v)$ менее ярко выражена, чем у материала, не содержащего адгезив. Такое содержание адгезива способствует образованию более “толстой” пленки на поверхности трения и большего числа фрикционных связей. В результате сила трения и температура в контакте повышаются.

С увеличением скорости скольжения I_h композитов всех составов монотонно повышается (см. рисунок 1, б) вследствие роста коэффициента трения и увеличения контактных деформаций, ускоряющих появление и аккумуляцию дефектов, а впоследствии – возникновение микротрещин усталости. При этом увеличивается вклад адгезионного изнашивания композита. Определяющее влияние f на I_h композита подтверждается подобием кривых зависимостей $f(v)$ и $I_h(v)$. Наибольшей износостойкостью обладает материал, содержащий 3 масс. % адгезива, что обусловлено его более высокой прочностью.

С повышением нагрузки p коэффициент трения монотонно растет по причине увеличения площади фактического контакта и молекулярной составляющей трения, а также вследствие увеличения глубины внедрения выступов контртела. Введение адгезива повышает износостойкость композита, особенно при $p > 1,2$ МПа. В этом случае разрушение адгезионных связей происходит по пленке адгезива, разделяющей выступы сопрягаемых тел, что снижает вклад адгезионного изнашивания, который при высоких p и отсутствии адгезива может превышать вклад усталостного изнашивания. В области малых значений p доминирующим является усталостное изнашивание. Поэтому пленка

адгезива, повышающая контактные деформации композита и усталостное изнашивание и снижающая адгезионное изнашивание, оказывает слабое и неоднозначное влияние на суммарное значение I_n .

Учитывая, что адгезив способствует стабилизации коэффициента трения и росту сопротивления композита изнашиванию, можно в качестве фрикционного материала на основе ФФС рекомендовать композиты, содержащие 1–3 масс. % адгезива.

УДК 621.331

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Д. А. БОСЫЙ

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
им. акад. В. Лазаряна, Украина*

Учитывая разветвленность и протяженность систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог, которые на Украине представлены шестью субъектами хозяйствования, обладают разветвленной инфраструктурой, распределены по территориальному принципу, актуальным является внедрение интеллектуальных технологий управления режимами их работы. Конечный потребитель в системе тягового электроснабжения постоянно меняет свои параметры во времени и пространстве, и нередко на границах железных дорог возникают спорные вопросы, связанные с особенностью потребления электрической энергии электроподвижным составом, несовершенством системы учета электрической энергии и режимами напряжения в системе электроснабжения. По состоянию на 2015 год все шесть железных дорог Украины получают электрическую энергию с оптового рынка, пользуясь при ее передаче сетями смежных лицензиатов, которые распределены по административно-территориальному принципу, что дополнительно вносит сложности при решении или поиска причин в спорных вопросах.

Под режимом работы системы тягового электроснабжения подразумевается непрерывный технологический процесс передачи, распределения и потребления электроэнергии, который характеризуется величинами напряжения, токов, углов сдвига фаз, коэффициентов мощности и потерь электроэнергии на всем пути ее передачи и преобразования. Любое преобразование электрической энергии в системах тягового электроснабжения обусловлено процессами выпрямления или трансформации электроэнергии на тяговых подстанциях и непосредственно на электроподвижном составе. Для большинства подстанций, системы постоянного тока характерной является двухступенчатая трансформация. Известны также отдельные случаи питания трехфазных выпрямителей по принципу глубокого ввода. Именно для системы постоянного тока выполняется более эффективное преобразование электроэнергии, чем для системы переменного тока. На переменном токе тяговые подстанции выполняют одинарную трансформацию полученной из первичной сети электроэнергии, а дальнейшее ее преобразование к напряжению, пригодному для питания электропривода, выполняется из энергии однофазного переменного тока преобразователями электроподвижного состава.

Выполнение оптимизационных расчетов системы тягового электроснабжения невозможно без составления аналитических моделей в пространственно-временных координатах. Именно пространственно-временное представление всех электрических величин, которые необходимы для расчетов систем тягового электроснабжения, позволяет построить интеллектуальные системы управления режимами систем тягового электроснабжения.

Пространственно-временная модель системы тягового электроснабжения основывается на аналитическом описании основных электрических процессов функциями двух переменных, взаимосвязь между которыми определяется графиком движения поездов, что определяет местонахождение каждого поезда с номером n в любой момент времени t . Используя другие исходные данные, определяют кусочно-заданные функции двух переменных, которые представляют собой зависимость распределения токов и падения напряжения в контактной сети во времени и пространстве. Произ-