

УДК 539.6 + 681.3.06

ББК 30.82

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ
МНОГОСЛОЙНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО
НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ НА
БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА**

Колесников В. И.¹, Мясникова Н. А.², Жукова Ю. В.³
*(ФГБОУ Ростовский государственный университет пу-
тей сообщения, Ростов-на-Дону)*

Буйло С. И.⁴

*(НИИМиПМ Южного федерального университета,
Ростов-на-Дону)*

Иваночкин П. Г.⁵

(Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону)

В настоящий момент в пробной эксплуатации находится новая система лубрикации, основанная на создании на боковой поверхности рельса многослойного антифрикционного наномодифицированного покрытия, обладающего свойствами блокировки негативных сегрегационных явлений. Разработка методов мониторинга состояния такого покрытия, определение трибологических свойств рельсов и степени изнашивания покрытия составляют содержание настоящей работы.

¹ Владимир Иванович Колесников, ректор, академик РАН, доктор технических наук, профессор (rek@rgups.ru).

² Нина Алексеевна Мясникова, кандидат физико-математических наук, доцент (myasnikova@rgups.ru).

³ Юлия Викторовна Жукова, аспирант (Julia_z77@mail.ru).

⁴ Сергей Иванович Буйло, заведующий отделом, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (bsi@math.sfedu.ru).

⁵ Павел Григорьевич Иваночкин, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, доцент (Ivanochkin_p_g@mail.ru).

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, система лубрикации, трибометрический комплекс, акустическая эмиссия.

Применяемые в мире способы лубрикации железнодорожного пути основаны, как правило, на использовании материалов на основе углеводов, которые оказывают отрицательное воздействие на демпфирующие свойства конструкции железнодорожного пути и загрязняют окружающую среду. В настоящий момент в пробной эксплуатации находится система лубрикации, основанная на создании на боковой поверхности рельса многослойного антифрикционного наномодифицированного покрытия, обладающего блокировкой сегрегационных явлений [3, 6].

Покрытие состоит из подложки (силового каркаса), представляющей собой слой с высокой шероховатостью при значительном улучшении физико-механических характеристик и антифрикционного слоя из наноструктурированного полимерного композиционного материала. Нанесение антифрикционной компоненты на силовой каркас обеспечивает низкие значения коэффициента трения при относительно высокой износостойкости пары трения. Силовой каркас представляет собой нанесенный на поверхность рельса методом электроискрового легирования слой металла (ВК-6, Ст 65Г) толщиной 100–200 мкм, см. рис 1.

В качестве антифрикционного слоя многослойного покрытия используются антифрикционные композиции на основе наномодифицированного политетрафторэтилена (ПТФЭ) марки Ф4МБП, наполненного наноразмерными наполнителями в количестве 1–5% (на основе шпинели магния, шпинели хрома, шпинели марганца). ПТФЭ обладает низким коэффициентом трения, что позволяет использовать его в качестве связующего при создании антифрикционного покрытия на металле. Исходя из квантово-химических расчетов энергии взаимодействия атомов различных элементов, находящихся на свободной поверхности и на границах между зернами в железе, была разработана присадка, входящая в состав антифрикционного покры-

тия и содержащая соединения, блокирующие негативные сегрегационные явления (БТМ) [4].

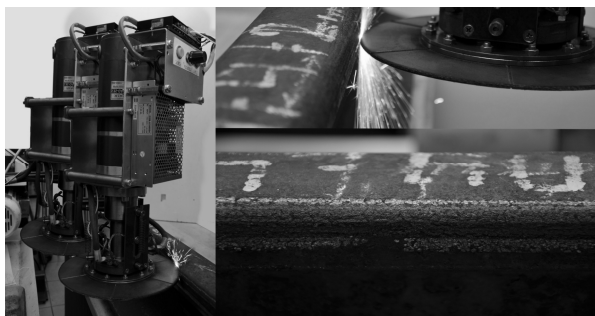


Рис. 1. Нанесение силового каркаса многослойного покрытия

Поскольку использование таких покрытий испытывается впервые, то методы диагностики антифрикционных свойств модифицированной поверхности аналогов не имеют. Антифрикционные свойства модифицированной поверхности существенно зависят от ее химического состава [5]. В связи с этим предлагается разработать методы анализа состояния покрытия, способные к работе при движении диагностических комплексов. Получаемая информация позволит оценивать трибологические свойства боковой поверхности рельсов и степень износа антифрикционного покрытия.

В рамках выполняемого проекта создан трибометрический переносной комплекс, предназначенный для выборочного определения коэффициента трения на боковой поверхности головки рельса, см. рис. 2. Точность измерения коэффициента трения не превышает 0,02. Трибометрический комплекс включает в себя раму, выполненную с возможностью экстренного съема с рельса, тележку и оборудование для регистрации и обработки данных. Тележка имеет возможность передвижения в пределах рамы и снабжена тензодатчиками.



Рис. 2. Трибометрический переносной комплекс

Оборудование для регистрации и обработки данных содержит ПЭВМ, тензоусилитель, соединенный с ПЭВМ и тензодатчиками роликового трибометра. Прибор надежно работает на рельсах любой степени износа. Устройство надежно фиксируется на головке рельса (для фиксирования используются неизнашиваемые и малоизнашиваемые поверхности головки рельса). Прибор во время работы не контактирует с системой крепления рельса к полотну пути.

Прибор имеет рычажную систему, позволяющую надежно фиксировать ролик по нормали к исследуемой поверхности с возможностью свободного перемещения ролика вдоль рельса в следующих границах:

- боковая поверхность полностью;
- верхняя часть головки рельса на величину не менее 10 мм от боковой поверхности.

Ролик выполнен из бандажной стали марки 1 ГОСТ 3998-71. Рабочая поверхность ролика имеет диаметр 60 мм и толщину 1 мм, усилие прижима ролика к испытываемой поверхности 60 Н. Усилие прижима ролика постоянно при его перемещении по всей траектории.

Программное обеспечение прибора предусматривает два уровня доступа к управлению прибором: пользовательский и экспертный. Эффективная работа с прибором на пользовательском уровне не требует от оператора специальной подготовки, выходящей за рамки объема информации, изложенной в техническом описании и руководстве по эксплуатации. Обработка и анализ экспериментальной информации в этом режиме доступа осуществляется автоматически.

Экспертный уровень предполагает наличие специальных знаний по вопросам определения (измерения) коэффициента трения и предназначен для настройки параметров прибора (в том числе тензодатчиков) и анализа результатов измерений, достоверность обработки которых в пользовательском режиме вызывает сомнения.

Для оценки особенностей фрикционного взаимодействия пары «колесо – рельс с покрытием» был также применен метод акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики. Суть метода АЭ состоит в анализе чрезвычайно слабого ультразвукового излучения, сопровождающего любые изменения структуры исследуемого материала. Механизм излучения упругих импульсов в процессах трения имеет междисциплинарный характер, сложную физико-химико-механическую природу, которую, по нашему мнению, можно представить следующим образом: Известно, что в процессах трения между непосредственно соприкасающимися неровностями контактирующих поверхностей образуются и разрываются адгезионные связи, разрыв которых является актом химического взаимодействия, который, естественно, сопровождается излучением упругого импульса и, следовательно, может рассматриваться в качестве физико-химической природы элементарного акта акустической эмиссии (акта АЭ).

Ранее нами установлено, что в ходе широкого класса физико-химических процессов действительно излучаются сигналы АЭ регистрируемого уровня, и имеются хорошие перспективы создания количественных методов оценки кинетики исследуемых процессов по параметрам сопутствующего акустического излучения [1]. При этом механизме неважно, существует ли

между неровностями третье тело (смазочный материал). При наличии смазки молекулы смазочного материала просто принимают участие в адгезионном взаимодействии, что не меняет саму природу акта АЭ. Однако при отсутствии смазки следует ожидать излучения АЭ намного более высокого уровня вследствие преобладания «физико-механического» механизма АЭ, теперь уже в процессе деформации самого материала неровностей.

Давно известно, что реальный контакт между металлами осуществляется только по вершинам неровностей, площадь контакта которых составляет малую часть от номинальной площади. Вследствие этого, уже под влиянием малых нагрузок вершины неоднородностей деформируются, что тоже неизбежно должно приводить к излучению актов АЭ достаточно высокого уровня вследствие изменения внутренней структуры деформируемого объема материала.

Практическое применение метода АЭ в задачах диагностики пар трения встречает существенные затруднения. Это связано как со сложностью и междисциплинарностью самого явления АЭ, так и с отсутствием методов и приборов, учитывающих *принципиально случайный характер* процессов, порождающих АЭ. Так, наши исследования показывают, что практически все отечественные и зарубежные АЭ диагностические комплексы, включая и такие известные системы, как *Spartan* и *A-Line 32D*, теряют более 90% событий АЭ при высокой интенсивности источников АЭ внутри тела.

Для устранения этого недостатка нами предложен и развивается принципиально новый междисциплинарный подход, позволяющий восстановление истинного (излученного внутри тела) потока актов АЭ по регистрируемым сигналам АЭ [2]. Такой подход ранее нами был уже использован при разработке методов диагностики прочности ответственных изделий машиностроения, авиационной, ракетно-космической техники и позволил заметно повысить достоверность результатов диагностики.

Суть подхода состоит в определении требуемых характеристик исследуемого процесса по плотностям (или функциям распределения) данных параметров, общий вид которых устанавливается исходя из физической природы эффекта акустической эмиссии. При этом параметры конкретного распределения оцениваются по еще не перекрывшимся импульсам, а затем распределение экстраполируется в область сильного искажения и перекрытия принимаемых сигналов эмиссии. К сожалению, в процессе исследования пар трения обнаружилось настолько сильное искажение и перекрытие сигналов АЭ, что непосредственное применение такого подхода не обеспечивало необходимую точность и достоверность процедуры восстановления. Вследствие этого метод пришлось модифицировать и процедуру восстановления проводить не по интенсивности импульсов, а по интенсивности потока осцилляций регистрируемых сигналов на поверхности исследуемой пары трения.

На экспериментальном стенде нами исследована связь параметров акустической эмиссии (АЭ) в широком ультразвуковом (30–500 кГц) диапазоне частот с особенностями фрикционного взаимодействия пары ролик-колодка различных материалов, в том числе включая многослойное наноструктурированное антифрикционное покрытие. Установлена существенная (до 10...100 раз) разница амплитудных и энергетических параметров сопутствующего акустического излучения различных материалов при незначительном различии спектрального состава АЭ на установившихся стадиях трения. На начальных стадиях разрушения покрытия у всех исследованных образцов зарегистрировано существенное изменение амплитудных параметров излучения. Так, у ролика без покрытия на этой стадии появлялся заметный (до четырёх раз) разброс амплитуд импульсов АЭ, у ролика с электроискровым покрытием амплитуда импульсов АЭ увеличивалась до 10 раз, а у ролика с многослойным наноструктурированным антифрикционным покрытием это увеличение составляло до двух раз. Кроме того, перед разрушением покрытий в спектрах регистрируемой АЭ появлялось большое количество дискретных частот излучения во всей рабо-

чей полосе от 30 до 500 кГц. Предварительные результаты восстановления потока актов АЭ по регистрируемым осцилляциям сигналов АЭ с использованием нашей оригинальной методики показали существенное увеличение потока актов АЭ на начальной стадии разрушения покрытия, см. рис. 3, 4.

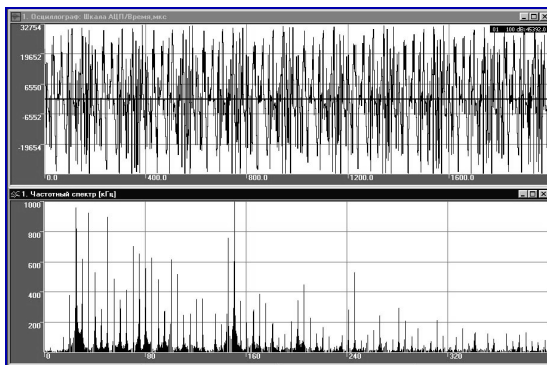


Рис. 3. Акустико-эмиссионное исследование особенностей фрикционного взаимодействия пары «ролик-колодка» – форма и спектральный состав сигналов АЭ на начальных стадиях фрикционного взаимодействия

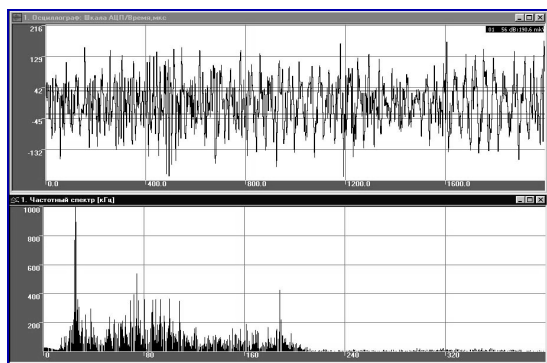


Рис. 4. Акустико-эмиссионное исследование особенностей фрикционного взаимодействия пары «ролик-колодка» – форма и спектральный состав сигналов АЭ на стадии разрушения электроискрового покрытия

Полученные результаты являются ключевыми в вопросе разработки мобильной системы комплексного мониторинга состояния верхнего строения пути в целях обеспечения безопасности движения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект «офи-м-2011-РЖД» №11-08-13152).

Литература

1. БУЙЛО С.И., КУЗНЕЦОВ Д.М. *Акустико-эмиссионный контроль и диагностика кинетики физико-химических процессов в жидких средах* // Дефектоскопия. – 2010. – №9. – С. 79–83.
2. БУЙЛО С.И. *Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики*. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 192 с.
3. КОЛЕСНИКОВ В.И., МИГАЛЬ Ю.Ф., СЫЧЕВ А.П., ИВАНОВИЧ П.Г., МЯСНИКОВА Н.А. *Технологии создания самосмазывающихся материалов и подшипников* // Научные технологии для инновационной индустрии южного макрорегиона: Сб. научных статей. Ростов-на-Дону: изд-во ЮНЦ РАН. 2011. – С. 106–119.
4. КОЛЕСНИКОВ В.И., БУЛГАРЕВИЧ С.Б., КОЗАКОВ А.Т., СИДАШОВ А.В., БОЙКО М.В. *Экспериментальное и теоретическое исследование сегрегационных явлений на сопряженных поверхностях и межкристаллитных границах материалов трибосистемы колесо-рельс-тормозная колодка* // Вестник Южного научного центра РАН. – 2007. – Т. 3, №3. – С. 9–20.
5. КОЛЕСНИКОВ В.И., КОЗАКОВ А.Т., МИГАЛЬ Ю.Ф. *Исследование процессов трения и изнашивания в системе колесо-рельс с помощью методов рентгеноэлектронной,*

оже-электронной спектроскопии и квантовой химии // Трение и износ. – 2010. – Т 31, №1. – С. 24–37.

6. KOLESNIKOV V., MYASNIKOVA N., SIDASHOV A., MYASNIKOV P., KRAVCHENKO Ju. *Multilayered antifriction nanostraction covering for lubrication in the tribocoupling “wheel-rail” // Transport problems. – 2010. – V. 5, №4. – P. 71–79.*

DIAGNOSTICS TECHNIQUES FOR MULTILAYER ANTI-FRICTION COATING ON RAIL SIDE HEAD

Vladimir Kolesnikov, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, rector, full member of Russian Academy of Sciences, doctor of science, professor (rek@rgups.ru).

Nina Myasnikova, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, candidate of physical-mathematical sciences, assistant professor (myasnikova@rgups.ru).

Yuliya Zhukova, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, postgraduate student (Julia_z77@mail.ru).

Sergei Builo, Southern Federal University, Rostov-on-Don, head of the department, Doctor of Science, senior researcher (bsi@math.sfedu.ru).

Pavel Ivanochkin, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, leading researcher, Doctor of Science, assistant professor (Ivanochkin_p_g@mail.ru).

Abstract: At the present moment a new system of lubrication is being tested: a side head of a rail is coated with a multilayer anti-friction nanomodified film obeying property of blocking undesired segregation phenomena. We investigate techniques of condition monitoring for such coating. The method is suggested for catastrophic destruction danger diagnostics based on assessment of flow rate and detection of a large number of discrete frequencies in a spectrum of acoustic emission.

Keywords: anti-friction coating, lubrication system, tribometric complex, acoustic emission.