

# Триботехнические и виброакустические характеристики тормозной системы



Игорь КОЛЕСНИКОВ

Igor V. KOLESNIKOV

**Атомы примесных легирующих элементов колеса и тормозной колодки участвуют в сегрегационных процессах, протекающих под влиянием силовых и температурных нагрузок при эксплуатации техники.**

**В статье приведены результаты экспериментальных исследований виброакустических характеристик тормозной системы с колодками композиционными и чугунными.**

*Ключевые слова:* железная дорога, колесо-рельс, трибология, виброакустика, тормозная система, колодки чугунные и композиционные, эксперимент.

*Колесников Игорь Владимирович – кандидат технических наук, проректор Ростовского государственного университета путей сообщения.*

**П**отери, обусловленные изнашиванием узлов в системе колесо-рельс, эквивалентны более 10% топливно-энергетических ресурсов и в значительной степени определяют эффективность и надежность подвижного состава.

В нашей стране на подвижном составе применяются как чугунные, так и композиционные тормозные колодки. Несмотря на последних по сравнению с чугунными – малый вес, высокая тормозная эффективность, значительная сопротивляемость истиранию [1], при эксплуатации вагонов с пластмассовыми колодками весьма часты случаи большого «намазывания» металла колеса на колодку. Предполагалось, что одной из причин этого явления может быть наводороживание металла.

Для подтверждения гипотезы сначала был проведен расчет температурного поля сопряжения колесо-тормозная колодка. При этом учитывалось, что участок поверхности катания бандажа то находится под колодкой, то охлаждается во время движения между ними, т. е. температурное поле бандажа определялось при изменении типа граничных условий. С целью нахождения температурного поля в погранслоях трибо-системы применили метод С. А. Ломова.

Суть его – в регуляризации сингулярно-возмущенных задач с помощью перехода в пространство безрезонансных решений, которое индуцируется исходной задачей. Это индуцированное пространство определяется по спектральным характеристикам исходного оператора, что дает возможность использовать спектральную теорию операторов. Метод позволяет строить решения для случая, когда предельная задача качественно отличается от исходной, или возмущенной, всевозможных неравномерностей в физических системах, в частности когда в поверхностной зоне трения контактного контакта возникают градиенты со смежной своего направления.

Расчеты показали наличие подповерхностного максимума у нестационарной составляющей температурного поля. Это означает, что в определенном интервале углов максимальное значение температуры достигается не на поверхности, а внутри колеса, и в зоне трения создается отрицательный температурный градиент [2].

Аналитические исследования позволили уточнить, что подповерхностный максимум возможен не только в случае смены типа граничных условий, но и при нестационарном нагружении металлополимерных сопряжений. Причем величина и расположение этого максимума определяются как внешними факторами (величиной импульса, формой и частотой его приложения, скоростью скольжения и размерами образца, условиями теплообмена), так и внутренними – механическими и теплофизическими свойствами материала.

Экспериментальные исследования по разработанной методике и на созданной нами установке с применением поверхностных акустических волн и инфракрасной пирометрии на основе сегнетоэлектриков подтвердили наличие температурного максимума при соответствующих условиях.

Известно, что при трении в результате термомеханической деструкции полимеров в зоне контактирования с металлом выделяются различные по своей природе твердые, жидкие и газообразные продукты, среди которых большое количество водорода. Водород, в свою очередь, адсорбируется и активно поглощается контактирующей поверхностью металла, что ведет к его разрушению и переносу твердых частиц

с этой поверхности на более мягкий полимерный материал. Диффундируя в приповерхностную область, водород попадает в образовавшиеся при деформации трещины. Молизуясь в них, водород создает внутренние расклинивающие давления до  $127,4 \text{ МН/м}^2$ , превышающие предел прочности материала. По расчетным данным при воздействии колеса с рельсом реализация касательных напряжений также осуществляется на некоторой глубине от поверхности. В совокупности эти факторы вызывают расклинивающее действие адсорбированного водорода на трещину, что способствует развитию последней в этой зоне и преждевременному разрушению металлического контртела. Это и проявляется в «намазывании» металла на сопряженную с колесом поверхность трещинной колодки.

Разрушение поверхностного слоя металла происходит как в результате его охрупчивания, так и восстановительных реакций с участием водорода. Расчеты показали, что максимум концентрации водорода практически совпадает с максимумом температуры в объеме металла; величина концентрации в точке максимума не зависит от уровня концентрации и абсолютной величины нерабочей поверхности образца. При температурах в зоне трения  $200\text{--}600^\circ \text{C}$  водород способен реагировать с углеродом стали и карбидом железа по реакции  $\text{FeC} + 4\text{H} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{Fe}$ . Появляющийся на границах зерен и фаз метан дополнительно способствует возникновению микротрещин в объеме стали. Обезуглероживание сплава и появление новой фазы – чистого железа снижают прочностные свойства стали. Область обезуглероженности в районе усталостной трещины обнаружена и в нашем варианте.

Проведенные нами экспериментальные исследования доказали, что повреждения колес в виде выщербин на поверхности катания как пассажирских, так и грузовых вагонов занимают главенствующее положение и причиной их, помимо истирания и разрушающего действия водорода в зоне трения колесо-колодка, является наличие зернограничной сегрегации.

Один из прямых способов наблюдения сегрегаций – это метод Оже, или электронной спектроскопии, позволяющий исследовать



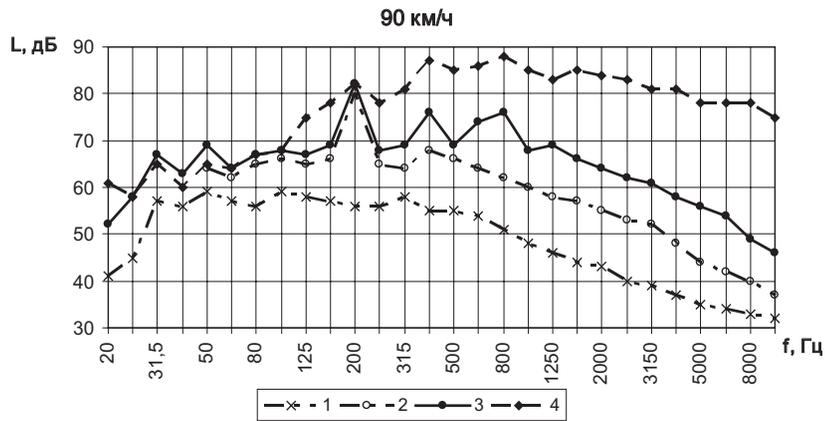


Рис. 1. Спектры шума при скорости движения 90 км/ч: 1 – шум системы вентиляции; 2 – шум привода; 3 – шум системы с композитными колодками; 4 – шум системы с чугунными колодками.

довать элементный состав на границах зерен стали железнодорожного колеса, выведенного из эксплуатации из-за многочисленных типичных дефектов его рабочей поверхности.

В ходе исследований на поверхности катания колеса обнаружены элементы тормозной колодки (S, P), которые могут снижать прочность поверхности колеса из-за эффекта сегрегации на границе зерен. Прослеживается миграция атомов марганца с рабочей поверхности колеса в результате металлопереноса на поверхность композитной полимерной тормозной колодки. То есть нарушается заданный металлургами компонентный баланс в приповерхностной области колеса, что может благоприятствовать сегрегационным тенденциям примесных элементов, в частности серы, на границах зерен.

Опираясь на полученные результаты, мы можем ставить следующую задачу: **каким образом уменьшить вредное воздействие атомов разупрочняющих элементов на износостойкость стали?** Один из способов решения этой задачи – введение в состав металла атомов, увеличивающих энергию связи между зернами и тем самым нейтрализующих действие атомов разупрочняющих элементов. Такие дополнительные атомы в зависимости от их активности могли бы полностью или частично вытеснить своих антагонистов с зернограницной поверхности.

Помимо решения триботехнических задач в последнее время уделяется большое

внимание и проблемам шумообразования тормозной системой.

По данным работ Х. Р. Эйлерса [3] уровни звука тормозной системы с колодками из серого чугуна могут достигать 104 дБА при скорости движения состава 140 км/ч и 90 дБА – если используются композиционные колодки. Шум тормозов представляется наиболее опасным по воздействию на людей, находящихся на перронах и в помещениях вокзалов. Действительно, при подходе к вокзалам скорости движения поездов уменьшаются и, следовательно, снижается интенсивность звукового излучения акустической системы рельс-колесо. Зато тормозная система становится одним из основных источников, формирующих внешнее звуковое поле.

Несмотря на существующие исследования в этом направлении, процесс шумообразования тормозной системы и прежде всего спектральный его состав изучены недостаточно. Выделить особенности шумообразования при натурных испытаниях чрезвычайно трудно. Поэтому в статье приведены результаты экспериментальных исследований виброакустических характеристик тормозной системы с чугунными и композиционными колодками на специальном стенде ОАО «ВНИИЖТ».

Основными источниками шума, выявленными на стенде являются система вентиляции, электродвигатель, редуктор, колесная пара и тормозные колодки. В ходе измерений использовался акустический комплект «Ассистент», с помощью кото-

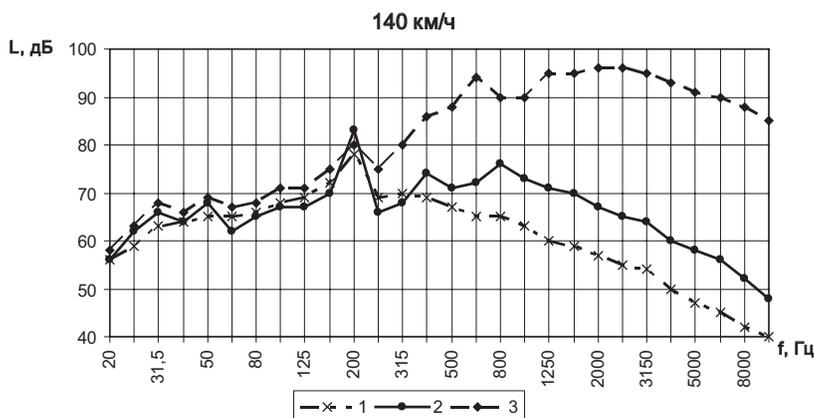


Рис. 2. Спектры шума при скорости движения 140 км/ч: 1 – шум привода; 2 – шум системы с композитными колодками; 3 – шум системы с чугунными колодками.

рого фиксировались уровни звука (дБА), третьоктавные уровни звукового давления (дБ) и виброскорости (дБ). При измерениях микрофон ориентировался в зону трения колеса-колодки и устанавливался на расстоянии 1 м. Вибрацию фиксировал пьезоакселерометр с магнитным креплением, который ставился не на саму колодку (вследствие ее высокой температуры), а на кронштейн в непосредственной близости от нее.

Измерения проводились для скоростей движения 90 и 140 км/ч, в каждой точке делалось по 5–6 повторных замеров в начале, середине времени торможения и конце процесса. Для выявления закономерностей шумообразования, представляющего собой совокупность одновременно звучащих источников, измерения спектров шума производились в следующем порядке:

- включена только система вентиляции;
- работает вентиляция и привод, при этом происходит холостое вращение колесной пары;
- измерения в процессе режима торможения.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 1 и на рис. 1, 2.

Анализ измерений показал, что в спектрах шума наглядно проявляются два частотных диапазона – низкочастотный 20–200 Гц и средне- и высокочастотный 250–10000 Гц.

Уровни звукового давления системы вентиляции не превышают 60 дБ, а спектр шума имеет равномерное распределение интенсивности звукового излучения в полосе частот 31,5–315 Гц. На более высоких частотах наблюдается равномерный спад интенсивности, составляющий 2–3 дБ на 1/3 октавы. Фактически система вентиляции не оказывает влияния на шумообразование.

Низкочастотная часть спектра практически полностью определяется звуковым излучением привода стенда. Уровни звукового давления привода превышают уровни шума вентиляционной системы на 6–10 дБ в области частот 31,5–160 Гц и на 8–14 дБ в диапазоне 250–10000 Гц. Наличие ярко выраженного пика на частоте 200 Гц объясняется шумом редуктора с частотой, равной частоте пересопрежения зубьев, что четко согласуется с данными исследований шума и вибрации редукторных систем [4].

Уменьшение уровней звука системы с композитными колодками в сравнении с чугунными составляет 16–18 дБА при скорости движения 90 км/ч и 16–22 дБА – при скорости 140 км/ч (см. таблица 1). Следует отметить, что процесс шумообразования системы колесо-колодка проявляется в широкой полосе частот 250–10000 Гц.

При измерениях, соответствующих скорости движения 90 км/ч, эффективность в снижении шума у композитных колодок – 10–30 дБ. Причем наблюдается





Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований виброакустических характеристик стенда

Частота, Гц	Скорость движения 90 км/ч							Скорость движения 140 км/ч						
	Фон	Композиц. начало торм.	Композиц. середина торм.	Композиц. конец торм.	Чугун. начало торм.	Чугун. середина торм.	Чугун. конец торм.	Фон	Композиц. начало торм.	Композиц. середина торм.	Композиц. конец торм.	Чугун. начало торм.	Чугун. середина торм.	Чугун. конец торм.
20	41	52	50	50	60	59	58	52	56	52	54	59	63	58
25	45	58	57	57	58	60	58	52	61	59	58	61	57	60
31,5	54	67	65	65	65	63	63	56	66	68	65	64	70	65
40	56	63	62	62	60	61	62	54	63	65	64	61	62	63
50	56	69	67	66	65	68	68	60	68	65	64	67	66	66
63	56	64	64	64	63	66	64	61	63	65	63	66	66	65
80	57	67	66	67	67	68	68	60	65	64	66	67	67	67
100	57	68	67	67	69	72	72	60	68	68	68	72	72	71
125	59	66	66	66	75	75	74	61	67	65	65	72	76	76
160	59	69	69	68	77	78	83	62	70	70	70	75	77	79
200	59	82	82	82	82	83	83	64	84	84	84	77	77	79
250	58	68	68	67	79	79	77	66	72	70	69	75	83	77
315	58	69	69	68	81	81	82	60	69	70	70	80	87	83
400	61	74	72	72	87	89	86	65	74	71	69	86	84	86
500	62	69	69	68	85	87	84	62	71	71	68	86	85	81
630	63	74	69	69	86	88	85	65	72	72	68	88	92	82
800	61	76	69	67	88	88	85	66	77	75	72	94	91	87
1000	60	68	65	65	85	85	82	70	73	71	66	90	90	87
1250	63	69	66	66	83	83	81	70	71	69	66	90	92	87
1600	62	66	64	64	85	86	82	64	70	68	64	95	90	83
2000	60	64	63	62	84	85	81	66	67	66	63	95	89	82
2500	57	62	61	61	83	83	80	60	65	64	61	96	89	81
3150	57	61	60	60	81	83	80	62	64	63	60	95	86	81
4000	54	58	56	56	81	82	79	56	60	60	57	93	85	80
5000	52	56	54	54	79	80	75	65	58	58	54	91	85	78
6300	50	54	53	53	79	80	75	52	56	55	53	90	85	77
8000	43	49	47	47	79	80	75	42	51	50	47	89	85	78
10000	39	46	45	44	75	77	71	40	48	49	45	85	81	76
12500	34	43	43	42	77	77	71	40	45	47	42	83	79	75
16000	29	42	43	41	76	76	71	40	45	48	41	81	80	74
20000	26	40	40	38	73	75	68	30	44	48	39	80	79	73
Уровни звука, дБА	70	80	78	77	96	95	93	73	82	81	81	104	100	97

тенденция к уменьшению интенсивности шумообразования по мере увеличения частоты (2–4 дБ на 1/3 октавы). Спектр шума с чугунными колодками имеет равномерное распределение интенсивности звукового излучения в широкой полосе частот 1250–2500 Гц (разница между уровнями звукового давления составляет 1–1,5 дБ, что отвечает классу точности измерительной аппаратуры) и 3150–8000 Гц (здесь разница в уровнях не превышает 2 дБ).

Аналогичные закономерности зафиксированы и при режиме работы стенда, соответствующему скорости движения 140 км/ч.

В этом случае эффективность в снижении шума тормозной системы с композитными колодками еще больше и составляет 20–38 дБ в средне- и высокочастотной части спектра 500–10000 Гц (рис. 2).

Эффективность композиционных колодок проявляется и в ультразвуковом диапазоне 12500–20000 Гц, где она 30–35 дБ при скорости движения 90 км/ч и 34–36 дБ – при скорости 140 км/ч (см. таблицу 1).

Закономерности шумообразования тормозной системы подтверждаются результатами измерения вибраций (рис. 3), в частности тем, что в широкой полосе

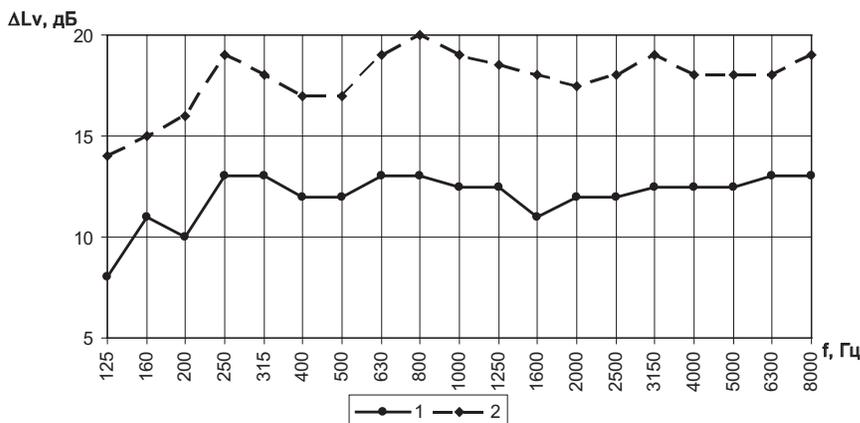


Рис. 3. Увеличение уровней виброскорости: 1 – при скорости движения 90 км/ч; 2 – при скорости 140 км/ч.

частот 250–8000, как и уровней шума, имеет место практически равномерное увеличение уровней виброскорости при указанных ранее режимах работы стенда.

Экспериментальные исследования подтверждают данные работы [3] по уровням звука тормозной системы с чугунными колодками (104 дБА). В то же время уровни звука у системы с композитными колодками на стенде существенно ниже и составляют 82 дБА (при скорости 140 км/ч), а не 90 дБА, что установлено авторами работы [3].

## ВЫВОДЫ

1. При разработке мероприятий по повышению износостойкости колеса в системе колесо-тормозная колодка следует принимать во внимание установленные нами обменно-диффузионные и сегрегационные процессы, а также определять

способы блокировки выхода атомов одних элементов на зернограничную поверхность с помощью атомов других элементов.

2. Подтверждена высокая эффективность в снижении шума тормозной системы с композиционными колодками, его уровни не превышают предельно допустимых значений во всем нормируемом частотном диапазоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин С. М. Нагрев и износ колесной стали при трении по композиционным материалам // Вестник ВНИИЖТ. – 1969. – № 4.
2. Задорожный А. И., Колесников И. В. Аналитический расчет радиального температурного поля во фрагменте пакетного многодискового тормоза // Вестник РГУПС. – 2011. – № 4.
3. Эйлерс Х. Р. и др. Потенциал и пределы возможностей колодочного тормоза // Железные дороги мира. – 2004. – № 4.
4. Чукарин А. Н. Исследование шума подшипников редуктора токарно-револьверного станка модели 1 Н318 // Металлорежущие станки: Сб. статей – Ростов-н/Д., 1981.

## TRIBOTECHNICAL AND VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE BRAKING SYSTEM

**Kolesnikov, Igor V.** – Ph. D. (Tech), pro-rector of Rostov-on-Don State University of Railway Engineering.

*The atoms of foreign, alloying elements of the wheel and of the brake block participate in segregation processes caused by loading and temperature during transport vehicles' operation. The author publishes the results of pilot researches on vibroacoustic characteristics of the brake system using respectively composite and cast-iron brake blocks.*

**Key words:** railway, rail-wheel, tribology, vibroacoustics, brake system, cast-iron and composite brake blocks, experiment.

Координаты автора (contact information): Колесников И. В. – kolesnikoviv@rgups.ru.

