

ISSN 0201-727X



ВЕСТНИК

**РОСТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

**№ 4
2010**

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Зиновьев В.Е.</i> К вопросу адгезии и качества поверхностного слоя субстрата клеевого соединения	5
<i>Озябкин А.Л., Александров А.А.</i> Выбор информационных каналов для динамического мониторинга аномальных термодинамических процессов в контакте «колесо – рельс»	9
<i>Пронников Ю.В., Багиев Ю.И.</i> Теоретическое обоснование выбора звукопоглощающего материала для кабин электроподвижного состава и ограждающих конструкций на участках обкатки двигателей подвижного состава	20

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

<i>Буйносов А.П.</i> Определение допустимой разности диаметров бандажей колесной пары электропоездов	25
<i>Козубенко А.В., Гребенников Н.В.</i> Компьютерная модель экипажной части грузового тепловоза	35
<i>Колыхалин В.М.</i> Прогнозирование уровня шума ударов колес о стыки рельсового транспорта по одномерной реализации	42
<i>Носырев Д.Я., Муратов А.В., Петухов С.А.</i> Расчетно-экспериментальная оценка эффективности использования сжиженного нефтяного газа в качестве добавки к дизельному топливу в тепловозных дизелях	45
<i>Петрушин А.Д., Гребенников Н.В., Пиотровский А.П.</i> Выбор типа электродвигателя безредукторного исполнения для электропоезда	49

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Бычков Е.Д.</i> Оценка состояний элементов телекоммуникационной сети в системе иерархического управления с использованием теории нечетких множеств	54
<i>Гвоздев Д.С., Храмов В.В.</i> Оценка вероятности распознавания подвижных единиц железнодорожного транспорта	61
<i>Ефанов Д.В.</i> О методе выявления логических ситуаций в системе технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики	66
<i>Иванченко В.Н., Сепетый А.А., Чернов А.В.</i> Логико-алгебраический метод диагностики однократных ошибок в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики	71

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

<i>Боцвин Д.В.</i> Концептуальная модель организации перевозочной деятельности контейнерной компании	80
--	----

В прочностном поведении адгезионного соединения важную роль играет характер распределения в нем напряжений, являющийся функцией толщины и некоторых других свойств элементов, составляющих соединение. Следовательно, прочность адгезионного соединения может также варьировать за счет изменения геометрических или механических параметров поверхностного слоя. Хотя природа процессов, протекающих при обработке поверхности субстратов, различна, но все методы обработки направлены на повышение поверхностной энергии субстрата. К сожалению, этими факторами часто пренебрегают при объяснении поведения адгезионного соединения.

Анализируя приведенные данные и рассуждения, а также опираясь на опыт других работ [1–5], можно сделать ряд выводов:

- достижение достаточной адгезионной прочности и эксплуатационной надежности металло-полимерного соединения возможно при условии реализации максимальной поверхности контакта и обеспечения активного взаимодействия адгезива и субстрата на границе раздела;
- вязкость полимерного состава должна быть в момент нанесения такой, чтобы время заполнения капилляров и полостей на поверхности субстрата было достаточно малым в сравнении с временем нарастания вязкости клея в процессе отверждения;
- хорошего смачивания поверхности субстрата можно достичь, если краевой угол стремиться к нулю;
- на гистерезис смачивания поверхности субстрата существенное влияние оказывают качество поверхности, наличие загрязнений и вязкость полимерного состава;
- основные показатели качества поверхности имеют ряд оптимальных значений, при которых достигается максимально большая площадь соединения, но не происходит противодействия смачиванию полимером поверхности субстрата;
- необходимо решить вопрос о грамотном и технологичном удалении воздушных и инородных включений из полимерного уплотняющего слоя;
- представляется интересным с точки зрения математического аппарата связать показатели качества поверхности, значения гистерезиса смачивания и прочности собранного соединения.

Библиографический список

- 1 Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М. : Химия, 1974. – 391 с.
- 2 Ковачич, Л. Склеивание металлов и пластмасс / Л. Ковачич. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
- 3 Карташов, Э.М. Структурно-статическая кинетика разрушения полимеров / Э.М. Карташов, Б. Цой, В.В. Шевелев. – М. : Химия, 2002. – 736 с.
- 4 Ван Кревелен, Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Д.В. Ван Кревелен. – М. : Химия, 1976. – 416 с.
- 5 Каган, Д.Ф. Многослойные и комбинированные пленочные материалы / Д.Ф. Каган, В.Е. Гуль, Л.Д. Самарина. – М. : Химия, 1989. – 288 с.
- 6 Липатов, Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – М. : Химия, 1991. – 260 с.
- 7 Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М. : Высш. школа, 1979. – 352 с.
- 8 Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М. : Химия, 1984. – 280 с.
- 9 Новые методы исследования полимеров : сб. статей / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев : Наукова думка, 1975. – 200 с.

УДК 625.032.3 : 681.3.06 + 06

А.Л. Озябкин, А.А. Александров

ВЫБОР ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АНОМАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

Наиболее напряжённые условия взаимодействия системы «гребень колеса подвижного состава – боковая поверхность рельса» складываются при вписывании подвижного состава в кривые участки пути. Здесь, в зависимости от условий вписывания в кривую, исправности колесных пар и элементов тележки грузового вагона удельные нагрузки в зоне контакта могут достигать до 3,5 ГПа. Значительные нагрузки в сочетании со скоростями скольжения приводят к повышению температуры в контакте, величина которой может быть сопоставима с температурой плавления материала колеса и рельса.

Процессы трения существенно зависят от более чем пятидесяти нелинейно-взаимосвязанных между собой факторов [1], а также от динамических параметров системы, из-за чего генерируемый тепловой поток в контакте нестационарен. Высокая температура в контакте приводит к изменению физико-механических свойств фрикционных пар и, следовательно, сказывается на стабильности рабочих характеристик узла трения. Температура и градиент температуры ускоряют все химические процессы, уменьшают толщину разделяющего слоя смазочного материала, приводят к десорбции и деструкции защитных смазочных слоев и пленок, снижают механическую прочность материалов, вызывают внутренние напряжения, коробление, усиливают деформационные, адгезионные процессы, изменяют структурные, фазовые состояния и т.д. В то же время термодинамика в контакте напрямую зависит от количества микронеровностей, вступивших во фрикционное взаимодействие, которые в совокупности образуют фактическую площадь касания (ФПК). Анализ априорной информации, а также данные натурных и модельных испытаний позволяют сделать вывод, что величина ФПК контактирующих поверхностей трения нелинейно зависит от большого числа факторов и в процессе эксплуатации узлов трения может меняться на порядок и более.

Динамика изменения ФПК приводит к интенсификации процессов, протекающих в трибослое, и в свою очередь – к интенсификации изменения значений ФПК. Данные динамические процессы взаимосвязаны и, в конечном счёте, определяют условия контактирования поверхностей трения и, соответственно, триботехнические параметры открытых узлов трения (величину и стабильность коэффициента трения, вид износа, величину и стабильность интенсивности изнашивания). Так, например, при вписывании грузового вагона в кривые малого радиуса в контакте «гребень колеса – боковая поверхность головки рельса» возникают условия схватывания второго рода, т.е. термического повреждения материала колеса и рельса в зоне их фрикционного контакта в зависимости от условий вписывания в кривую, исправности колесных пар и элементов тележки грузового вагона происходит увеличение давлений и, соответственно, температур в контакте гребня колеса и боковой поверхностью рельса.

Как показали данные теоретических и экспериментальных исследований, а также эксплуатационных испытаний, увеличение контактных давлений и максимального уровня объемной температуры в контакте гребня колеса с рельсом связано с различными факторами, приводящими в итоге к увеличению угла набегания при вписывании в кривых. В качестве причин, вызывающих увеличение угла набегания можно назвать следующее: разность диаметров колес колесных пар, неисправность шкворневого узла и узла опирания кузова на скользуны и многие другие. Совокупность вышеперечисленных факторов приводит к возникновению дополнительных моментов, стремящихся развернуть колесную пару в колее или препятствуют её свободному вписыванию [2].

Таким образом, значительные нагрузки при уменьшении ФПК приводят к возрастанию температуры в контакте, а высокая температура, в свою очередь, приводит к формированию условий термомеханических повреждений поверхностей. Поэтому для обеспечения безопасности движения подвижного состава в криволинейных участках пути необходимо осуществлять мониторинг термодинамики контакта «гребень колеса – боковая поверхность рельса». Т.к. по железным дорогам осуществляются массовые грузовые перевозки, причем скорости и массы составов которых в ближайшей перспективе предполагается увеличить согласно Стратегии развития ОАО «РЖД» до 2015 г. [3], то для грузового подвижного состава контроль температуры в контакте «гребень колеса – боковая поверхность рельса» является актуальной задачей.

Температуру в зонах контакта трущихся поверхностей практически не возможно измерить, т.к. термодинамические процессы протекают на уровне микронеровностей поверхности, которая постоянно подвергается непрерывным изменениям. Согласно работе [4] температура в контакте раскладывается на несколько самостоятельных частей:

$$v_{\max} = v_v + v^* + v_{\text{всп.}}, \quad (1)$$

где $v_{\max}$ – максимальная температура; v_v – объемная температура; v^* – средняя температура поверхности; $v_{\text{всп.}}$ – температура вспышки. Измерить инструментально возможно только объемную температуру. Величину максимальной температуры можно оценить только по косвенным признакам после размыкания контакта (по фазовым превращениям участков взаимодействующих поверхностей, цветам каления или побежалости и т.п.).

Профессором В.В. Шаповаловым выдвинута гипотеза о том, что максимальная температура в контакте не складывается из трех отдельных температур (объемная, поверхностная и температура вспышки), как было сказано выше, а является объемной температурой тела, имеющей три зоны состояния [5, 12]:

- **зона I** – зона асимптотического изменения объёмной температуры от максимальных значений (температура вспышки) до максимальной поверхностной, значения данной температуры могут достигать и превышать температуру плавления контактирующих материалов;
- **зона II** – зона перехода объёмной температуры от максимальной поверхностной к максимальной объёмной в сплошном теле;
- **зона III** – зона асимптотического перехода от максимальной температуры в сплошном теле до её низших значений [6].

Температуры I и II зон теплового состояния трущихся тел определяются параметрами шероховатостей контактирующих тел, при их взаимном смещении, и определяют характеристики фрикционных систем. Теоретический расчёт или экспериментальное исследование прямыми методами теплового состояния I зоны на сегодняшний день являются проблемными, так как оно определяется текущими значениями шероховатостей контактирующих поверхностей и значением ФПК, которые меняются на порядок и более при относительном скольжении трущихся тел. Величину объёмных температур в этой зоне, её градиентное изменение можно определить только на базе существующих математических моделей. При этом значения температур I зоны значительно выше значений температуры в других зонах и вклад её в образовании термомеханических повреждений наибольший [5].

В подтверждение данной гипотезы можно привести результаты, полученные специалистами ВНИКТИ в 2007–2008 г. В рамках научно-исследовательских работ по программе 19.5.002.Р «Оптимизации ширины рельсовой колеи» ВНИКТИ были выполнены испытания по определению максимальной температуры в зоне гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса.

В кривой радиусом 600 м в головке рельса на разной высоте по отношению к гребню колеса устанавливалась изолированная от рельса разомкнутая термопара. При прохождении тепловозом места установки термопары происходило её замыкание. Эксперименты показали, что при прохождении со скоростью 30 км/ч и 70 км/ч поверхностная температура на контакте достигала 580 °C и 637 °C [6].

Как было сказано выше, размеры зоны I (глубина), где реализуются максимальный уровень объёмных температур (температура «вспышки») в сотни раз меньше размеров самой миниатюрной разомкнутой термопары, что исключает возможность получения реальных значений объёмных температур.

Следует также учитывать, что термопара зафиксировала температуру в том месте, где была она установлена, и вероятность того, что зоны установки термопары и возникновения максимальных значений температуры совпадут, составляет доли процента.

Для контроля, диагностирования и прогнозирования термодинамического состояния фрикционного контакта в зоне I разработана методика на базе метода трибоспектральной идентификации триботехнических характеристик [7]. Данная методика позволяет косвенным способом, посредством интегральных характеристик и АФЧХ, идентифицировать условия, характерные для термомеханических повреждений контактирующих поверхностей и оценить максимальный уровень температуры.

Методика заключается в следующем.

Экспериментальные исследования термодинамики состояния фрикционного контакта гребня колеса подвижного состава, в частности грузового вагона, с рельсом выполнялась на стандартной машине трения СМТ-1 [8, 9]. На базе физико-математического моделирования [10] были рассчитаны нагрузочно-скоростные параметры модели контакта «гребень колеса – боковая поверхность рельса».

Для анализа термотрибодинамики фрикционного контакта используются следующие информационные каналы – момент трения, нормальная нагрузка (зафиксированные тензодатчиками) и температура, измеренная хромель-алюмелевой термопарой.

Чтобы получить наиболее информативные трибоспектры, были подобраны следующие параметры обработки сигналов и расчёта передаточных функций: шаг изменения времени 0,01 с, частотное разрешение 0,024 Гц, длина сегмента весовой функции Натола 50 %, перекрытие сегментов 50 %, добротность режекторного фильтра сетевой помехи 4,2.

Обработка экспериментальных данных осуществляется взаимной корреляционной функцией (ВКФ) момента трения и температуры, т.к. ВКФ сигналов характеризует определенную корреляцию явлений и физических процессов, отображаемых данными сигналами, и может служить мерой «устойчивости» данной взаимосвязи при раздельной обработке сигналов в различных устройствах.

С целью выявления идентификационных параметров, по которым можно осуществлять мониторинг и диагностировать факт термомеханического повреждения, по методике ТСИ триботехнических характеристик, был произведен расчёт АФЧХ и на их основе интегральные показатели степени и величины диссипации [10] как на всём частотном диапазоне анализа, так и на заданных интервалах частот, соответствующих собственным гармоникам механической части исследуемого объекта. Это позволило оценить стационарность и устойчивость процессов в контакте, а также определить время зарождения, развития и образования температуры вспышки в контакте с последующим термopовреждением поверхностей.

Одновременно проводилась обработка сигналов по определению устойчивости динамической системы (использовались амплитудно-фазочастотные характеристики Найквиста: запас устойчивости по амплитуде и фазе [9]). Расчёт *относительного показателя потери устойчивости* осуществлялся следующим образом:

- потери устойчивости по амплитуде $\gamma_L = \frac{20 \cdot \lg(-P(\omega))}{120}$, где $P(\omega)$ – вещественная частотная

характеристика;

- потери устойчивости по фазе: максимальный угол составляет 180° , например, величина потери устойчивости по фазе составляет 40° (фазовый сдвиг – 220° ; III квадрант единичной окружности), следовательно, относительный показатель потери устойчивости равен 0,22.

Применение в качестве параметра оценки ВКФ обусловлено сложностью и спецификой процессов, протекающих в трибоконтакте при формировании условий его термоповреждений, которые можно описать следующим образом – в процессе приработки формируется равновесная шероховатость на образцах. В результате взаимного перемещения контактирующих поверхностей взаимодействие микронеровностей приводит к возникновению вынужденных колебаний, образуется частотный трибоспектр. Естественно, что в колебательном движении участвует не только та часть объема поверхности трения, которая ограничена объемом микронеровности, но и прилегающая к ней часть материала пар трения (активный микрообъем материала). В каждый данный момент времени на фрикционном контакте одновременно протекают различные виды износа – механический, усталостный, окислительный, абразивный и другие, при этом какой-то из этих процессов становится ведущим, определяющим выходные трибохарактеристики.

Так, например, во фрикционном контакте гребня колеса грузового вагона с боковой поверхностью головки рельса могут протекать различные по интенсивности тепловые процессы. На отдельных микронеровностях могут формироваться объемные температуры, превышающие температуру плавления материала (температуры «вспышки»), но эти единичные случаи не приводят к существенному изменению параметров трибоспектра.

По мере нарушения равновесной шероховатости напряженно-деформированное состояние активных микрообъемов увеличивается. *В определенный момент времени увеличение массы активного объема при росте объемной температуры на контактирующих поверхностях ФПК, так называемой температуры «вспышки», и объемной температуры шероховатостей, так называемой средней температуры поверхности, приводят к резкому скачку температуры контактирующих тел и термоповреждению приповерхностных объемов материала контактирующих тел. Данное явление объясняется относительно небольшим увеличением теплоемкости приповерхностных трибослоев, которое происходит за счет увеличения масс и активного объема контактирующих тел, но при этом резко увеличиваются диссипация энергии и, соответственно, объемная температура за счет увеличения интенсивности деформирования объемов материала колеса и рельса и процессов внутреннего трения.*

Основная часть генерируемого на вершинах микронеровностей теплового потока приводит к образованию локальных мостиков микросварки. В определенный момент времени происходит лавинообразное нарастание количества активных контактов и их микрообъемов с температурами, превышающими температуру плавления материала, что приводит к увеличению момента трения. Поэтому именно поведение момента трения и температуры контакта, их взаимосвязь будут нам свидетельствовать о формировании условий термоповреждений.

ВКФ момента трения и температуры позволяет определить достоверные интервалы времени термоповреждения (ВКФ больше 75 %). Так, для модели движения груженого грузового вагона в кривой радиусом 300 м со скоростью 70 км/ч временной интервал с корреляционной функцией более 75 % наблюдается с 46,38 с по 46,57 с эксперимента (рис. 1). Обработка сигналов осуществлялась при разной частоте дискретизации. Наиболее информативная ВКФ, вследствие определённой инерционности термодинамических процессов, реализуется при частоте дискретизации 100 Гц.

На графике (рис. 1) наблюдаются экстремумы ВКФ момента трения и температуры на 46,3 с (1); 46,36 с (2), 46,43 (3) и 46,55 с (4). На 46,55 с ВКФ достигает своего максимума, где занимает некоторое стационарное положение, и затем падает. Соответственно моментам изменяется ВКФ, потеря устойчивости по амплитуде и фазе имеет 3 периода: 46,3–46,36 с (5); 46,37–46,42 с (6) и 46,5–46,64 с (7). При этом значение комплексного коэффициента трения за 0,17 с до выбранного интервала ВКФ (более 75 %) имеет минимальное значение (на графике – 8). В дальнейшем, вследствие накопления энергии деформации системой и преобразования равновесной шероховатости, происходит увеличение коэффициента трения, приводящего к потере устойчивости системы на 5-м и 6-м интервале времени и термоповреждению.

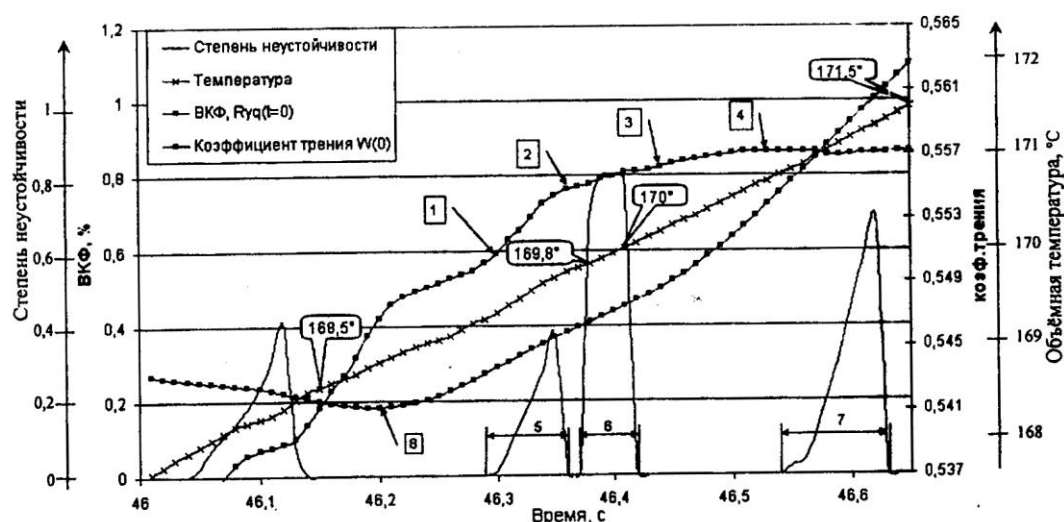


Рис. 1. График изменения коэффициента трения, температуры и относительного показателя потери устойчивости системы:

1, 2, 3, 4 – критические значения ВКФ;

5, 6, 7 – потеря стабильности процессов в контакте по амплитуде или по фазе;

8 – минимальное значение комплексного коэффициента трения

Иллюстрация АФЧХ, происходящих термодинамических процессов, приводится на рис. 2. Анализируемый временной интервал разбивается на несколько характерных этапов. Т.к. ВКФ, годограф Найквиста, АЧХ и ФЧХ практически не различаются при анализе через 0,01 с, то графики приводятся через 0,02–0,04 с.

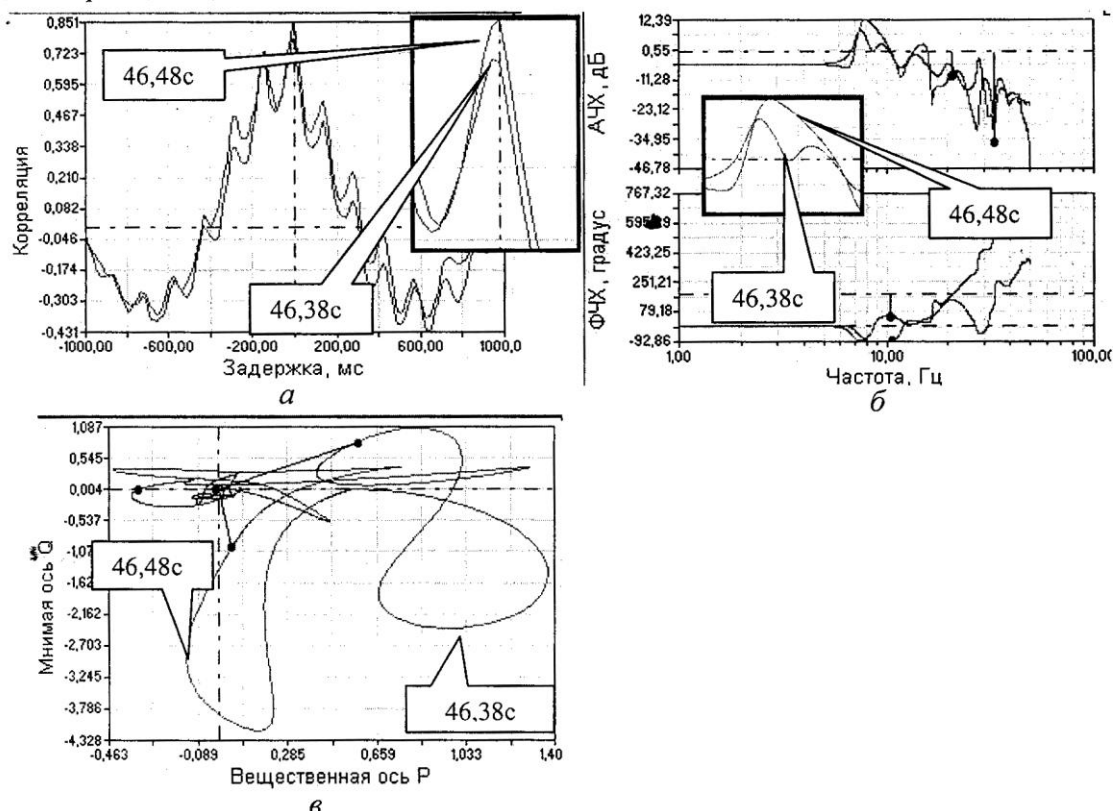


Рис. 2. АФЧХ этапа зарождения термоповреждения:

а – ВКФ момента трения и термпары, б – АЧХ и ФЧХ; в – годограф Найквиста

Первый этап (начало – 46,38 с, конец – 46,48 с)

Приработка образцов и образование равновесной шероховатости наблюдается до 46,3 с эксперимента. После чего постепенно наступает процесс катастрофического разрушения. Взаимное проникновение микронеровностей поверхности ролика и колодки происходит с накоплением тепловой энергии и повышением объёмной температуры.

Это можно наблюдать по годографам Найквиста (рис. 2), позволяющим зафиксировать развитие резонансного процесса на первой собственной частоте механической системы 7–8 Гц. Амплитуда комплексного коэффициента трения увеличивается с 8,34 дБ до 12,39 дБ, что соответствует значениям коэффициента трения на выбранных частотах 2,61–4,16 при возрастании корреляционной функции момента трения и температуры с 78 % до 85 %, что свидетельствует о повышении температуры в контакте.

Интерпретация графиков (рис. 2), иллюстрирующих АФЧХ зарождения термopовреждения:

а) начальный момент времени 46,38 с. ВКФ = 78 %. Запас по амплитуде $A = 9,36$ Гц, наблюдается потеря устойчивости на частоте 10,38 Гц по фазе на $124,98^\circ$. Наблюдается 3 резонансных пика на частотах 7,6 Гц, 9,62 Гц и 15 Гц, амплитуды которых соответственно 8,1, 2,65 и 2,5 дБ. Объемная температура – 169,86 °С.

б) 46,48 с. ВКФ = 85 %. Запас устойчивости по амплитуде $A = 36,09$ дБ на частоте 33,40 Гц и по фазе $93,18^\circ$ на частоте 10,57 Гц. На частотном годографе Найквиста наблюдается наличие резонанса первой собственной частоты механической системы 7,9 Гц ($A = 12,39$ дБ), при этом резонансная частота начинает смещаться в другую частотную область. Объемная температура 170,4 °С.

Таким образом, на первом этапе можно выделить характерные признаки:

- 1) ВКФ увеличивается – от 78 % в 46,38 с до 85 % в 46,48 с;
- 2) динамическая система и трибопроцессы в контакте имеют стабильный характер (запас устойчивости по амплитуде и фазе);
- 3) из нескольких резонансных частот остается одна, амплитуда которой увеличивается на всем временном промежутке (амплитуда от 8,34 дБ до 14,90 дБ);
- 4) увеличение объемной температуры в контакте.

**Второй этап (начало – 46,49 с, конец – 46,54 с),
«уменьшение запаса устойчивости по фазе»)**

На этом этапе происходит дальнейшее повышение температуры в контакте: за счет выделившегося тепла происходит образование сначала локальных мостиков микросварки вершин выступов ролика и колодки. Тепло продолжает генерироваться, что приводит к увеличению количества таких связей. Достижение температуры до максимума приводит к образованию термopовреждений поверхности и возрастание резонанса до максимума. На графике в момент времени 46,54 с температура достигает своего максимального значения – температуры «вспышки». Это сопровождается увеличением сдвига фаз с -85° до -100° и падением запаса устойчивости по амплитуде с 10,98 дБ до 5,69 дБ.

На рис. 3 представлены АФЧХ, которые формируются во время термopовреждения.

Таблица 1

Описание АФЧХ эксперимента с 46,49 с по 46,54 с

Время, с	ВКФ, %	Запас			Объемная температура, °С	Примечание
		Запас или потеря по А	Амплитуда, дБ (А)	Фаза, градус (fi)		
		Запас или потеря по fi				
46,49	86	Запас по А	22,73 на частоте 33,31 Гц	79,27° на частоте 10,73 Гц	170,5	Присутствует ярко выраженная резонансная гармоника 7,89 Гц с А = 14,90 дБ
		Запас по fi				
46,54	86	Запас по А	3,28 на частоте 7,57 Гц	8,21° на частоте 7,85 Гц	170,8	Исходная резонансная частота 8,4 Гц с амплитудой А = 7,07 дБ разделилась на 2 гармоники (8,9 Гц и 7,11 Гц) со сдвигом фаз 14,09° и 169° и амплитудой 5,59 дБ и 2,07 дБ. Развивается новый динамический процесс на гармонике 7,52 Гц, при котором А комплексного коэф. трения падает. Такое поведение АФЧХ свойственно колебательному резонансному звену, т.к. на частоте 7,52 Гц осуществляется совпадение собственных и вынужденных частот колебаний
		Запас по fi				

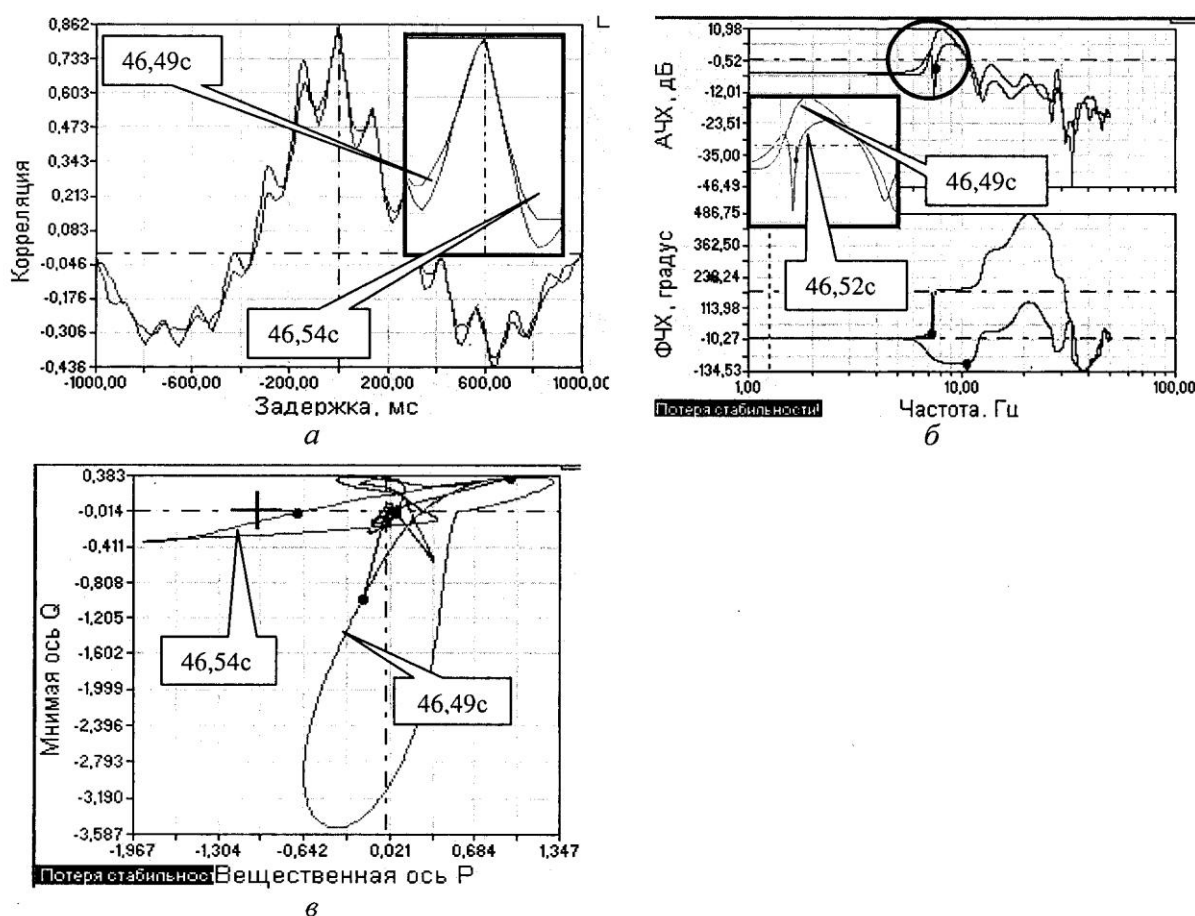


Рис. 3. АФЧХ процесса термовреждения (объемная температура максимальна: а – ВКФ момента трения и термопары; б – АЧХ и ФЧХ; в – годограф Найквиста)

Характерные черты этапа:

- 1) происходит зарождение и выделение из одной доминирующей гармоники двух самостоятельных;
- 2) ВКФ держится стабильно на уровне 86 %;
- 3) объемная температура продолжает увеличиваться;
- 4) за счёт выделяющегося тепла происходит образование локальных мостиков микросварки вершин выступов ролика и колодки.

Третий этап (начало – 46,55 с, конец – 46,57 с) и далее, «потеря устойчивости по амплитуде и фазе», развитие автоколебаний системы

На данном этапе начинается разрыв образовавшихся локальных связей между вершинами микронеровностей. Разрывы связей выражаются в диссипации теплового потока в окружающую среду, потерей устойчивости процессов трения и возникновения автоколебаний (рис. 4).

Характерные черты третьего периода:

- 1) ВКФ постепенно начинает уменьшаться, происходит потеря устойчивости системы (потеря запаса по амплитуде или фазе) и появление автоколебаний;
- 2) существование двух резонансных гармоник, одна из которых уменьшается и поглощается другой;
- 3) результат разрыва образовавшихся мостиков микросварки – возникновение автоколебаний.

Таблица 2

Описание АФЧХ эксперимента с 46,55 с по 46,57 с

Время, с	ВКФ, %	Запас			Объемная температура, °С	Примечание
		Запас или потеря по А	Амплитуда, дБ (А)	Фаза, градус (f_i)		
46,55	86,3	Потеря по А	3,03 дБ на частоте 10,09 Гц	4,94° на частоте 10,93 Гц	170,85	Ширина действия гармоники 8,9 Гц увеличивается. ВКФ достигает своего максимума
		Запас по f_i				
		Потеря по f_i				
46,6	85,8	Запас по А	18,26 дБ на частоте 16,91 Гц	82,15° на частоте 9,88 Гц	171,17	Потеря стабильности по фазе достигает максимума. На АФЧХ происходит слияние двух гармоник в одну на частоте 8,6 Гц и провалом на частоте 6,9 Гц. Возникновение автоколебаний системы
		Потеря по f_i				

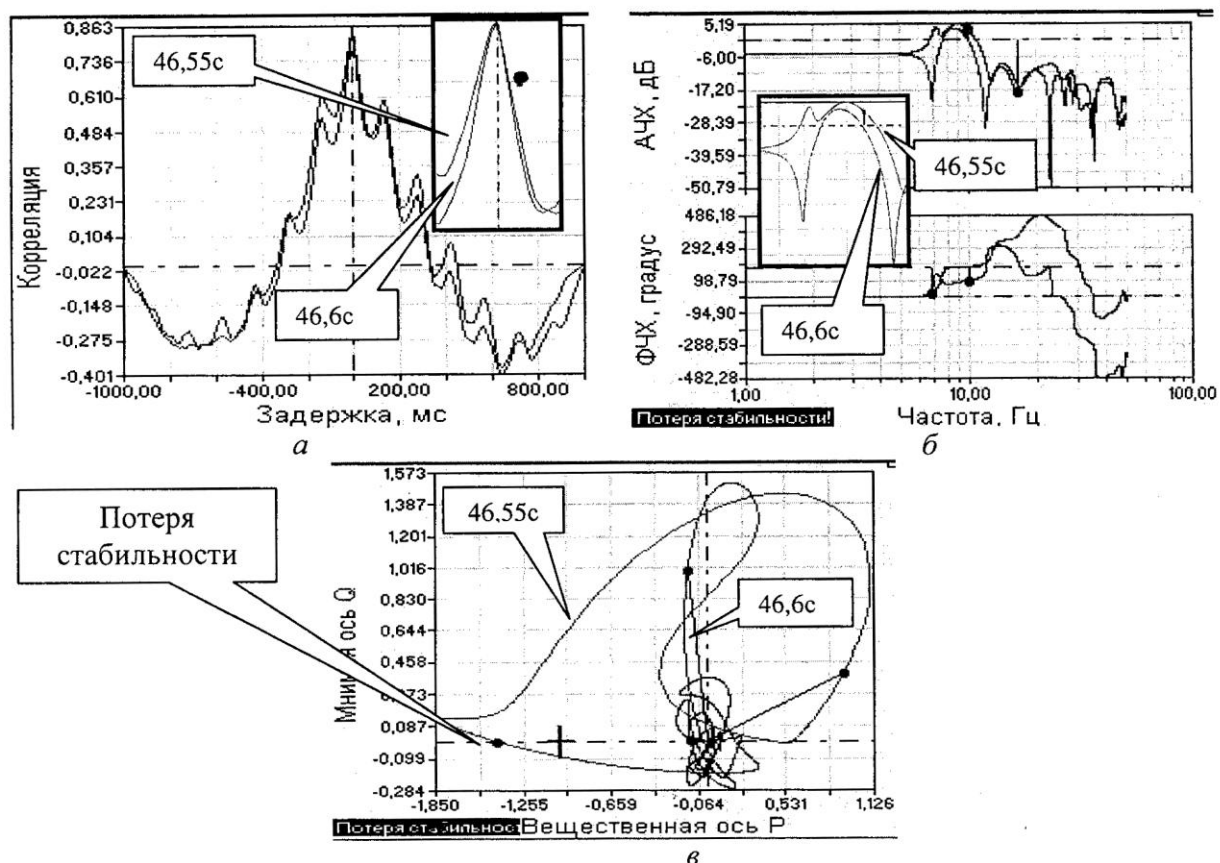


Рис. 4. АФЧХ процессов протекающих после термповреждения:
а – ВКФ момента трения и термопары; б – АЧХ и ФЧХ; в – годограф Найквиста

Проведя анализ АФЧХ исследуемой трибосистемы, можно сделать вывод, что ВКФ момента трения и температуры отображает результат термповреждения, произошедшего несколько ранее. Это объясняется некоторой инерционностью температурных процессов, т.к. выделившийся тепловой поток должен распространиться через материал до места установки термопары.

К тому же следует учесть и тот факт, что термопара сама по себе имеет некоторую инерционность; любые контактные методы всегда искажают температурное поле исследуемого элемента (при любом трении всегда присутствует электрическая составляющая, которая может оказать влияние на токи, создаваемые в термопаре). Поэтому необходим надежный идентификационный канал, который позволит с высокой степенью достоверности диагностировать начало формирования аномального состояния фрикционного контакта (термоповреждения).

Интегральная оценка величины диссипации годографа Найквиста по диапазонам частот, степени неустойчивости и ВКФ представлена на рис. 5, а. На 46,3-й секунде интегральные характеристики величины диссипации уменьшаются до минимума по всем диапазонам частот (0–10; 10–20 и 20–30 Гц), за исключением диапазона 30–50 Гц, что свидетельствует об увеличении сил трения фрикционного взаимодействия поверхностей. Назовём этот момент *временем зарождения неустойчивости по амплитуде или по фазе*, который соответствует зарождению температуры «вспышки» на ФПК и формированию термоповреждения. В отличие от периода зарождения неустойчивости, где происходит плавный рост и потом сразу падение после достижения максимального значения, вторая (основная) потеря устойчивости по фазе практически в два раза больше первой по амплитуде и практически весь промежуток времени существования потери устойчивости остается на максимальном уровне. После чего происходит резкий спад. При этом интегральная характеристика на частотном диапазоне 0–10 Гц принимает минимум и только через 0,04 секунды достигает максимума после прекращения неустойчивости. Появляющиеся в дальнейшем потери устойчивости связаны с протекающими в системе процессами автоколебаний. ВКФ же в рассматриваемые моменты времени еще не достигла своего максимума вследствие инерционности термопары и возможной удаленностью термопары от ФПК.

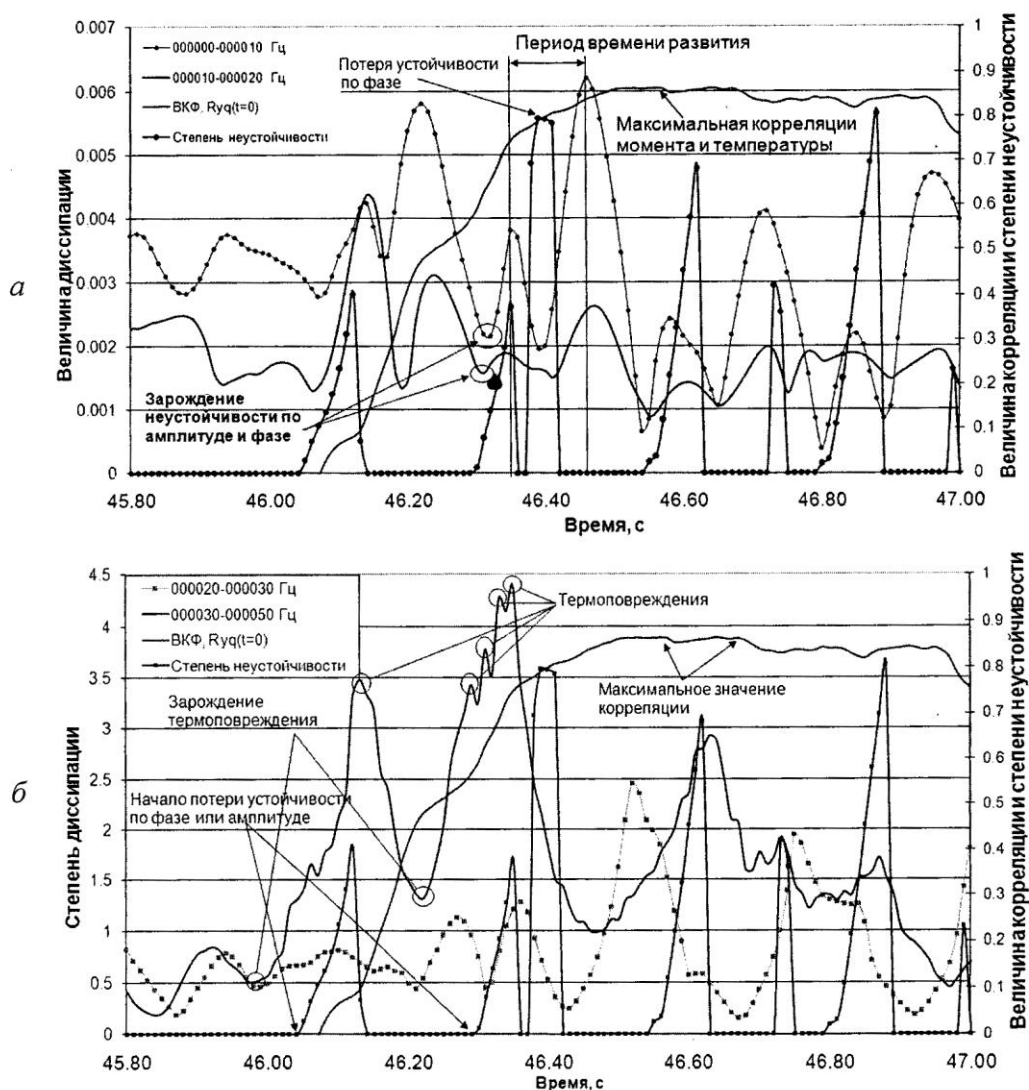


Рис. 5. Интегральные оценки амплитудно-фазочастотных характеристик термотрибодинамики фрикционного контакта по диапазонам частот: а – величины диссипации; б – степени диссипации

Выполненный анализ степени диссипации (3) по частотным диапазонам (рис. 5, б) показывает, что в частотном диапазоне 30–50 Гц наблюдается увеличение степени диссипации более чем в 4 раза с 0,8 до 4,4 по сравнению с 46-й секундой эксперимента. При этом процесс термopовреждения происходит скачкообразно по нарастающей в 4 этапа, охватывающей потерю устойчивости на обоих временных интервалах и опережающей на 0,1 с моменты потери устойчивости. Это свидетельствует о неравномерности формирования равновесной шероховатости трибоконтакта.

Частотный диапазон от 30 до 50 Гц наиболее сильно реагирует на термopовреждения, при этом следует отметить следующий факт. При анализе по ВКФ момента трения и температуры временной интервал с достоверностью более 75 % был от 46,38 с до 46,57 с. Здесь наблюдается незначительное по сравнению со средним уровнем увеличение на всех частотных диапазонах и минимум диапазона 30–50 Гц. Но если обработать данные за 0,38 секунды до начала анализируемого временного интервала, то прослеживается несколько пиков на диапазоне 30–50 Гц. Т.о. интегральная оценка степени диссипации показывает, что в момент времени 46,13 с и 46,35 с произошло первое термopовреждение, а затем еще более мощное второе, при этом величина степени диссипации возросла практически в 6 раз по сравнению с начальным уровнем. Следовательно, для диагностирования термомеханических повреждений идентификационными каналами принимаются частотные диапазоны интегральной оценки степени диссипации. Так, например, решая задачи по динамическому мониторингу контакта гребень колеса – боковая поверхность головки рельса на любом из выделенных частотных диапазонов при росте сигнала степени диссипации более чем в *два-три среднеквадратических отклонения* должна подаваться команда на привод для подачи смазочного материала в контакт.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ВКФ момента трения и температуры как идентификационный канал не может быть использован самостоятельно, т.к. он передает информацию о термическом схватывании, которое уже произошло. Задержка приблизительно 0,2–0,3 секунды обусловлена точностью расположения термопары, инерционностью теплопередающих процессов и не позволяет его принять как самостоятельный идентификационный признак термopовреждений. При этом, как видно по рис. 5 а, б, что интегральные характеристики по степени и величине диссипации на частотных диапазонах 30–50 Гц фиксировали изменения в 3–5 раз, а ВКФ момента трения и температуры достигла своего максимума только через 0,2 секунды после самого термopовреждения.

Таким образом, можно заключить, что рассмотренный идентификационный параметр совместно с ВКФ может использоваться при идентификации как термического, так и атермического схватывания.

Увеличение в несколько раз на каком-то частотном диапазоне величины интегральных характеристик, а затем потеря устойчивости по амплитуде и (или) фазе (см. рис. 5) характерно для схватывания II рода по классификации Б.И. Костецкого [11]. При данном виде повреждения поверхностей происходит возникновение местных металлических связей, их деформации и разрушение, что приводит к образованию трещин, намазыванию материала и отделению частиц с поверхности. Данные процессы становятся преобладающими и сопровождаются нагреванием, размягчением, деформацией и контактированием ювенильных поверхностей. Выделение температуры выше значений, допустимых для данных материалов, приводит к термopовреждениям на ФПК. Косвенным подтверждением правильности сделанных выводов могут послужить фотографии поверхностей трения на оптическом микроскопе (рис. 6), на которых видны области оплавления и наволакивания материала вследствие воздействия высоких температур.

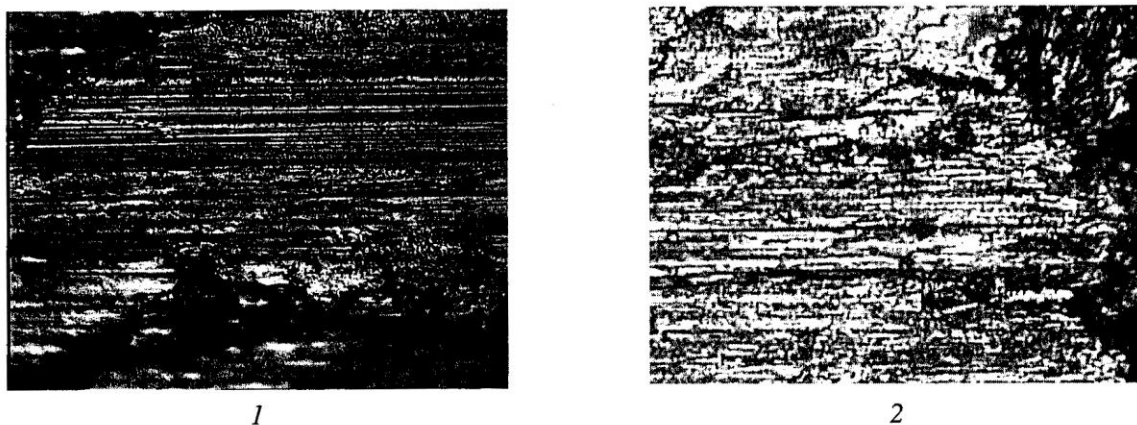


Рис. 6. Фотографии поверхностей трения после испытаний – схватывание II рода (x100):
1 – температура 800–1050 °C; 2 – температура 1050–1250 °C

Режим атермического схватывания (схватывание I рода) характеризуется возникновением локальных металлических связей. Возникновение металлических связей происходит при интенсивной деформации поверхностных объемов металла, обусловленных атермической пластичностью. В этом случае сначала происходит возрастание степени диссипации на каком-либо частотном диапазоне, а лишь потом происходит потеря устойчивости по фазе или амплитуде и с задержкой в 0,2–0,6 секунды возрастание ВКФ момента трения и температуры (рис. 7).

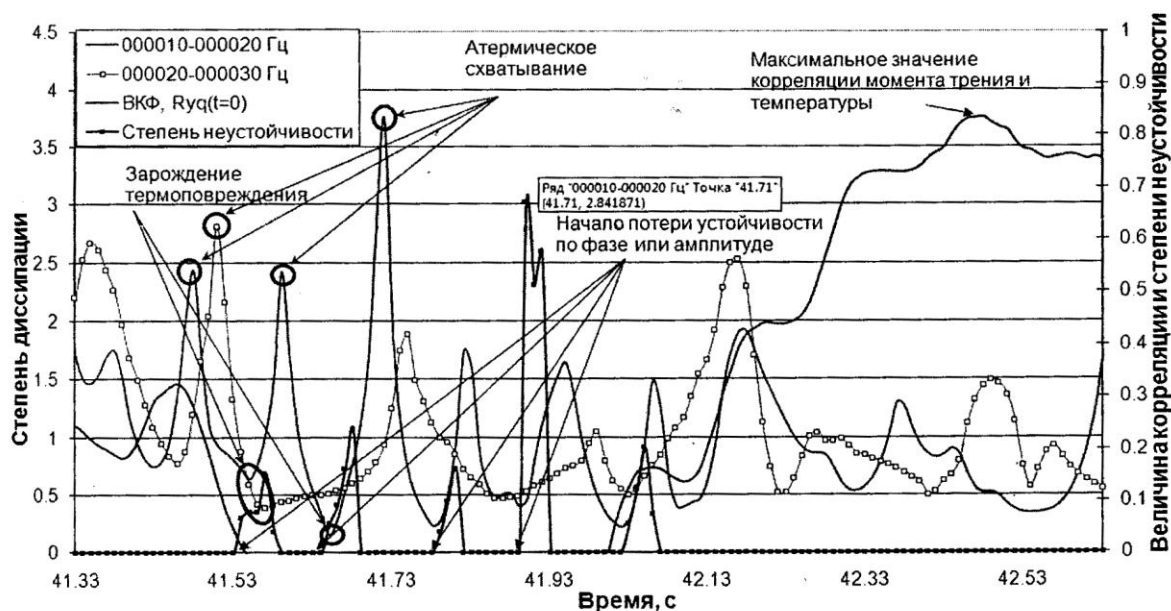


Рис. 7. Интегральная характеристика степени диссипации по диапазонам частот при атермическом схватывании

Основные результаты исследований

1 Собрана база данных амплитудно-фазочастотных характеристик процессов термического и атермического схватывания, позволившая идентифицировать термо-динамические процессы зарождения, развития и последствий термомеханического повреждения.

2 В качестве идентификационных каналов для трибоспектральной идентификации и мониторинга аномальных режимов контактирования необходимо применять интегральные характеристики степени и величины диссипации, вычисленные по частотным диапазонам амплитудно-фазочастотных характеристик. Возрастание интегральных оценок на конкретных частотных диапазонах более чем на три среднеквадратических отклонения от их математического ожидания является сигналом о начале явления схватывания II или I рода и термоповреждении, а также может служить информацией, например, для управления процессами лубрикации контакта «ребро колеса – боковая поверхность головки рельса».

3 Форма частотного годографа Найквиста для идентификации режимов контактирования является второстепенной по сравнению с интегральными оценками степени и величины диссипации.

4 Применение ВКФ момента трения и температуры для диагностирования аномальных режимов контактирования является дополнительным идентификационным каналом, т.к. он обладает высокой инерционностью по времени (запаздывание от 0,2 до 0,5 секунд).

5 С целью обнаружения аномальных процессов в контакте использование данной методики позволяет создать системы для контроля и мониторинга поведения фрикционных систем в реальном масштабе времени. Например, установив и интегрировав в систему ГЛОНАСС датчики на грузонапряженных и опасных участках (кривых малого радиуса), появится возможность контролировать и управлять движением составов в кривых, выявлять колесные пары, подвергшиеся термоповреждениям или имеющие ползуны, а также неисправные («шалые») тележки грузовых вагонов и осуществлять дополнительную диагностику ПС и ВСП. На следующем пункте остановки состава такие тележки и колесные пары будут более детально обследоваться на предмет пригодности для дальнейшего следования или отцепки на обточку. К тому же возможно контролировать наличие третьего тела (смазочного материала) в контакте «ребро колеса – боковая поверхность рельса».

Библиографический список

- 1 **Заковоротный, В.Л.** Динамика транспортных трибосистем / В.Л. Заковоротный, Шаповалов В.В. // Сборка в машиностроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.
- 2 Оптимизация ширины рельсовой колеи: отчёт о НИР (заключ.): РГУПС; рук. В.В. Шаповалов; исполн.: А.А. Александров [и др.]. – Ростов н/Д, 2007. – 162 с.
- 3 Стратегические направления научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД»). – № 964 от 31.08.2007.
- 4 **Чичинадзе, А.В.** Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для тех. вузов / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.
- 5 **Александров, А.А.** Термомеханические повреждения колес вагонов и методы их устранения / А.А. Александров, И.С. Морозкин, О.А. Розман, А.Е. Родин // Вестник РГУПС. – 2008. – № 2. – С. 5–14.
- 6 Результаты испытаний по определению температуры в зонах контакта колеса с рельсом : отчёт о НИР (заключ.) / ОАО «ВНИКТИ»; рук. Ю.А. Панин; исполн. В.С. Халявин [и др.]. – Коломна, 2007. – 15 с.
- 7 **Шаповалов, В.В.** Теоретические основы трибоспектральной идентификации триботехнических характеристик : дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Шаповалов. – М., 1988. – 215 с.
- 8 Методика исследования температурных процессов в контакте «гребень колеса – боковая поверхность рельса» с использованием метода трибоспектральной идентификации / А.А. Александров, Е.С. Окулова, Е.Е. Александрова, П.В. Харламов, О.И. Мелешко // Тр. всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2009». – Ростов н/Д : РГУПС, 2009. – С. 334 – 336.
- 9 **Александров, А.А.** Мониторинг тепловых процессов и определение термоповреждений в контакте «гребень колеса – боковая поверхность рельса» с использованием метода трибоспектральной идентификации / А.А. Александров, П.В. Харламов, Е.А. Александрова // Мат. V всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара : СамГУПС, 2009. – С. 345–347.
- 10 **Заковоротный, В.Л.** Физико-математическое моделирование фрикционных систем / В.Л. Заковоротный, В.В. Шаповалов // Вестник РГУПС. – 2006. – № 3. – С. 20–25.
- 11 **Костецкий, Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах : учебник для техн. вузов / Б.И. Костецкий. – 2-е изд. – Киев : Техника, 1970. – 394 с.
- 12 **Шаповалов, В.В.** Проблемы транспортной триботехники : физико-математическое моделирование мобильных фрикционных систем. Ч. 1 / В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 2009. – № 10. – С. 23–28.

УДК 628.517.2 : 629.13.001 + 06

Ю.В. Пронников, Ю.И. Багиев

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ КАБИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА УЧАСТКАХ ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Несмотря на различие функционального назначения кабин машинистов и звукозащитных конструкций на участках обкатки двигателей внутреннего сгорания на электровагоноремонтных предприятиях, выбор звукопоглощающего материала может осуществляться с единых позиций. Действительно, и кабины машинистов, и звукозащитные ограждения двигателей на участках обкатки представляют собой тонкостенные оболочки, по форме близкие к прямоугольным параллелепипедам.

В данной статье рассматривается формирование шума для таких конструкций, обусловленное воздействием воздушной доли шума. Расчет процессов шумообразования основан на данных работы Л.П. Борисова и Д.Р. Гужаса [1] с учетом особенностей компоновки источников шума в виде

$$L_1 = L_{p_1} + 20 \lg r + 10 \lg \left(\frac{1}{S} + \frac{4\psi_1}{B_1} \right) - 3\text{И} + 10 \lg \frac{4\psi_2 S}{B_2},$$

где S – площадь задней стенки кабины, м^2 ;

индексы «1» и «2» относятся к помещению с источниками шума и кабины соответственно;

L_{p_1} – октавные уровни звукового давления источника шума;

3И – звукоизоляция соответствующей конструкции, дБ;

ψ – коэффициент диффузности ограждения или производственного помещения;

B – постоянная помещения или ограждения.