



Бехер Сергей Алексеевич родился в 1977 г. В 2000 г. получил степень магистра по специальности «Физика» в НГУ, в том же году поступил в аспирантуру СГУПС по специальности «Методы контроля и диагностика в машиностроении». В 2004 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация».



Кочетков Антон Сергеевич родился в 1983 г. Окончил СГУПС в 2005 г. по специальности «Стандартизация и сертификация» и поступил в аспирантуру СГУПС по специальности «Методы контроля и диагностика в машиностроении».

УДК 629.4.027:620.179

С.А. БЕХЕР, А.С. КОЧЕТКОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ВАГОНА В ДВИЖЕНИИ

В работе рассчитаны распределения деформации в материале шейки рельса при комплексном воздействии боковых и вертикальных сил, разработан способ их измерения с использованием тензометрической аппаратуры. Проведены исследования динамических сил в системе колеса и рельса с дефектами поверхности катания.

Исследование взаимодействия подвижного состава с верхним строением пути является комплексной научно-технической задачей. Практическая ценность ее решения заключается, в частности, в разработке принципов диагностики ходовых частей проходящего подвижного состава по оценке параметров воздействия на рельс.

Для создания диагностической системы необходимо определить условия проведения измерений, в результате предварительных исследований выбрать информативные характеристики, экспериментально исследовать методы измерений и установить требования к аппаратуре, разработать алгоритмы обработки экспериментальных данных и критерии оценки технического состояния диагностируемых объектов.

Решение поставленной задачи должно основываться на обобщении результатов выполненных ранее исследований. Для уточнения закономерностей и теоретических расчетов распределения механических напряжений в объекте исследования необходимо провести натурные эксперименты в пути, разработать методы расчета диагностических параметров.

Научные исследования динамического взаимодействия подвижного состава с верхним строением пути проводились во ВНИИЖТе в 80-х гг. под руководством профессора Н.Н. Кудрявцева [1]. Экспериментально доказано возникновение дополнительного силового воздействия на путь колес с дефектами поверхности катания, выполнена оценка влияния неровностей колес на повреждения буксовых узлов, установлены зависимости величины динамической силы от скорости подвижного состава для каждого типа дефекта. Неровность на поверхности колеса оценивали по силовому показателю — коэффициенту динамической перегрузки, определяемому отношением динамической нагрузки колеса на рельс к статической нагрузке. Максимальные коэффициенты от 7,2 до 10,6 соответствовали колесам с неравномерным прокатом, для выщербин и наваров значение коэффициента динамики не превышало 8.

В результате выполненных исследований ВНИИЖТом разработан и внедрен на пунктах технического обслуживания сетевого значения детектор дефектных колес (ДДК), предназначенный для силового контроля неровностей колес. Аппаратура ДДК относится к напольным средствам автоматической диагностики технического состояния вагонов на ходу поезда и предназначена для выявления колесных пар с дефектами поверхности катания, вызывающими недопустимые динамические перегрузки необрессоренных элементов вагонов. Работа ДДК основана на измерении специальными тензометрическими устройствами вертикальных сил, действующих между колесом и рельсом при их динамическом взаимодействии, и сравнении измеренных значений с допустимыми нормируемыми уровнями. Для грузовых вагонов используются два диагностических сигнала: суммарная вертикальная сила и пиковое значение силы при ударе, каждый из которых имеет два критических уровня. Превышение нижнего нормированного уровня любым из этих значений вызывает появление сигнала «тревога I», при котором производится осмотр колесной пары. Решение о ее замене принимает осмотрщик вагонов. Превышение верхнего уровня приводит к ситуации «тревога II», при котором проводят обязательную замену колесной пары.

Для измерения значений сил в месте воздействия колеса и рельса известен метод Шлупфа [2], основанный на тензометрических измерениях и позволяющий оценить отдельно вертикальные и боковые силы, воспринимаемые рельсом. Вертикальная нагрузка оценивается по симметричным деформациям, измеряемым с внутренней и внешней сторон рельса. Определение боковых сил сводится к оценке изгибающих моментов в разных по высоте точках шейки рельса:

$$M_A = Y_b h_1 - Qe, \quad (1)$$

$$M_C = Y_b h_2 - Qe, \quad (2)$$

где Q — вертикальная сила, Н; Y_b — боковая сила, Н; e — эксцентриситет приложения вертикальной силы, м; h_1 и h_2 — высоты точек измерения деформаций A и C соответственно, м; M_A и M_C — изгибающие моменты в точках A и C соответственно. Тогда выражения для боковой силы и эксцентриситета примут следующий вид:

$$Y_b = \frac{M_A - M_C}{h_1 - h_2}, \quad (3)$$

$$e = \frac{M_A h_2 - M_C h_1}{(h_2 - h_1)Q}. \quad (4)$$

Точки A и C выбирают так, чтобы моменты сопротивления горизонтальных сечений, проходящих через эти точки, были равны, а наклеенные вертикально на шейку рельса датчики в точках A и C испытывали деформации, пропорциональные действующим моментам M_A , M_C . Это достигается подбором одинаковой толщиной шеек рельсов по оси в точках A и C . При этом между сигналами с датчиков и значением боковой нагрузки обеспечивается линейная зависимость.

Установленные на участке рельса преобразователи деформаций регистрируют суммарное воздействие колеса на рельс. Поэтому для решения задачи диагностирования ходовых частей подвижного состава необходимо разработать методику разделения составляющих динамического воздействия: вертикальных и боковых сил, смещения места контакта колеса и рельса.

В настоящей работе для исследования закономерностей распределения деформаций в рельсе под нагрузкой проходящего поезда построена математическая модель рельса со шпалами длиной $L = 2$ м. Нагрузка прикладывалась точно на поверхности катания. Методом конечных элементов выполнен расчет механических напряжений (рис. 1) для трех характерных случаев приложения нагрузки: симметричное приложение вертикальной нагрузки, смещение точки приложения вертикальной нагрузки от продольной плоскости симметрии рельса, боковая сила. Рассчитаны зависимости механических напряжений от координаты прикладываемой нагрузки по длине рельса для трех горизонтальных сечений шейки.

Зависимости деформаций средней части шейки рельса (рис. 2) от продольной координаты места контакта существенно отличаются для рассматриваемых способов приложения нагрузки величиной 50 кН.

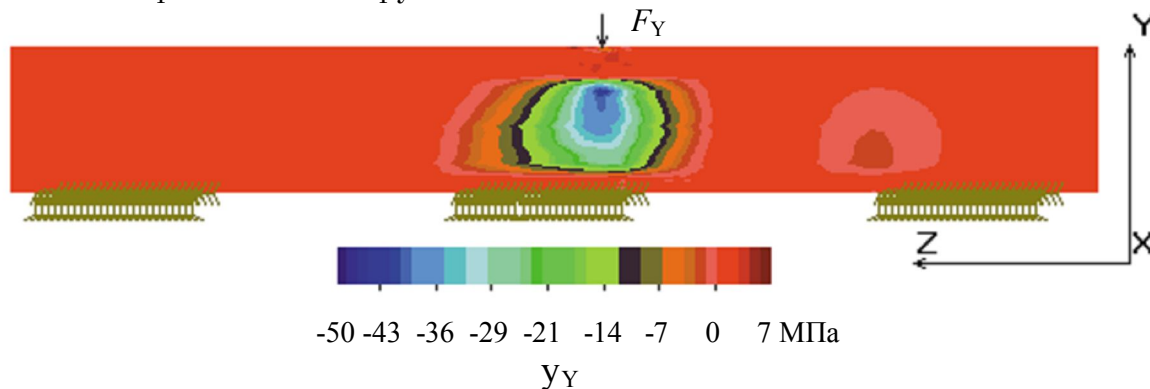


Рис. 1. Расчетное распределение механических напряжений σ_y в рельсе под действием точечной вертикальной силы

Вертикальная сила без бокового смещения (см. рис. 2, z) вызывает деформации, симметричные с обеих сторон шейки рельса (кривая 3 на рис. 2, a). Ширина кривой изменения деформаций по уровню e^{-1} соответствует ширине шпалы и равна 200 мм.

Смещение точки приложения силы в поперечном направлении от продольной оси рельса (см. рис. 2, z) приводит к появлению антисимметричных деформаций (кривые 2 и 4 на рис. 2, a) с противоположных сторон шейки. Данное явление

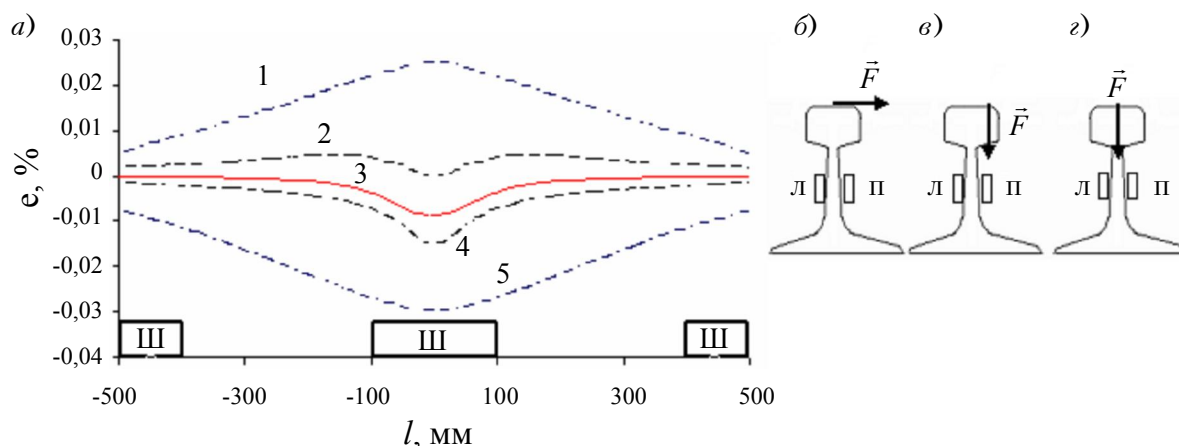


Рис. 2. Зависимость вертикальных деформаций ε середины шейки рельса в точке $l = 0$ мм от продольной координаты l приложения силы $\vec{F}$ — а и способы приложения силы на поверхность катания рельса — б, в, г: 1 и 5 — деформации в точках л и п на схеме б; 2 и 4 — деформации в точках л и п на схеме в; 3 — деформация в точках л и п на схеме г; Ш — шпалы

связано с появлением изгибающего момента, вызванного несимметричным приложением вертикальной силы.

Линейность упругих деформаций исследуемой модели позволяет применить принцип суперпозиции для разделения составляющих деформаций от вертикальной силы и момента силы:

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon_{\text{п}}}{2}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_M = \frac{\varepsilon_{\text{л}} - \varepsilon_{\text{п}}}{2}, \quad (6)$$

где ε_F , ε_M — составляющие деформаций от вертикальной силы и изгибающего момента, %; $\varepsilon_{\text{л}}$, $\varepsilon_{\text{п}}$ — деформации с левой и правой сторон рельса (см. рис. 2, в), %.

Боковая сила (см. рис. 2, б) от колеса на рельс создает изгибающий момент, величина которого изменяется по высоте рельса. Его максимальное значение достигается в точке с наибольшим плечом в нижней части рельса. Дальнейший характер момента силы проявляется в увеличении (по сравнению с аналогичными зависимостями для вертикальной силы) ширины кривой деформаций (кривые 1 и 5 на рис. 2, а) до 800 мм.

Для обработки результатов измерения параметров динамического воздействия подвижного состава на путь с использованием тензометрического метода необходимы значения коэффициентов пропорциональности между деформациями шейки рельса и величиной силы. В рамках рассмотренной модели установлены следующие значения коэффициентов:

- для симметричной вертикальной силы $K_V = 1,7 \cdot 10^{-4} \% / \text{кН}$;
- для боковой силы $K_B = 6,1 \cdot 10^{-4} \% / \text{кН}$.

Условия экспериментального исследования деформаций во многом определяются конечной целью поставленной задачи. Это могут быть стандартные рабочие режимы, циклические испытания, многовариантные внештатные нагружения. Условия измерения, в свою очередь, предъявляют требования к техническим и

метрологическим характеристикам аппаратуры, занятой в эксперименте. Для определения сил воздействия колес движущегося подвижного состава на рельс необходима быстродействующая тензометрическая система с частотой дискретизации аналого-цифрового преобразования данных больше 2 кГц, автоматическим уравниванием измеряемого сигнала, низким уровнем собственных шумов (менее 2 мкВ). После проведения эксперимента необходимы достоверные методы обработки измерительной информации, цель которых выделить составляющие динамических сил, классифицировать их по природе возникновения.

Для проведения комплекса экспериментальных работ на действующем пути авторами разработано и изготовлено четырехканальное устройство измерения сигнала с тензометрического преобразователя. Общий коэффициент усиления составил 4000, уровень собственных шумов — 1,5 мкВ, частота дискретизации АЦП — 10 кГц. В качестве измерительных преобразователей использовались фольговые тензорезисторы с номинальным сопротивлением 400 Ом и базой 20 мм.

Датчики устанавливали на обоих рельсах пути с двух противоположных сторон шейки рельса вертикально и горизонтально. В результате обработки полученных измерений установлена линейная корреляция амплитуды деформаций шейки рельса и массы вагонов проходящего поезда с коэффициентом 3,6 о.е.д./т ($\pm 6\%$). Выделены боковые и вертикальные силы (рис. 3), действующие на рельс от каждого пройденного колеса, что позволяет соотнести их величины с нормативами допустимого воздействия на путь по условиям: предотвращения распора и сдвига под поездом как звеньевого, так и бесстыкового пути, предотвращения вползания гребня колеса на рельс.

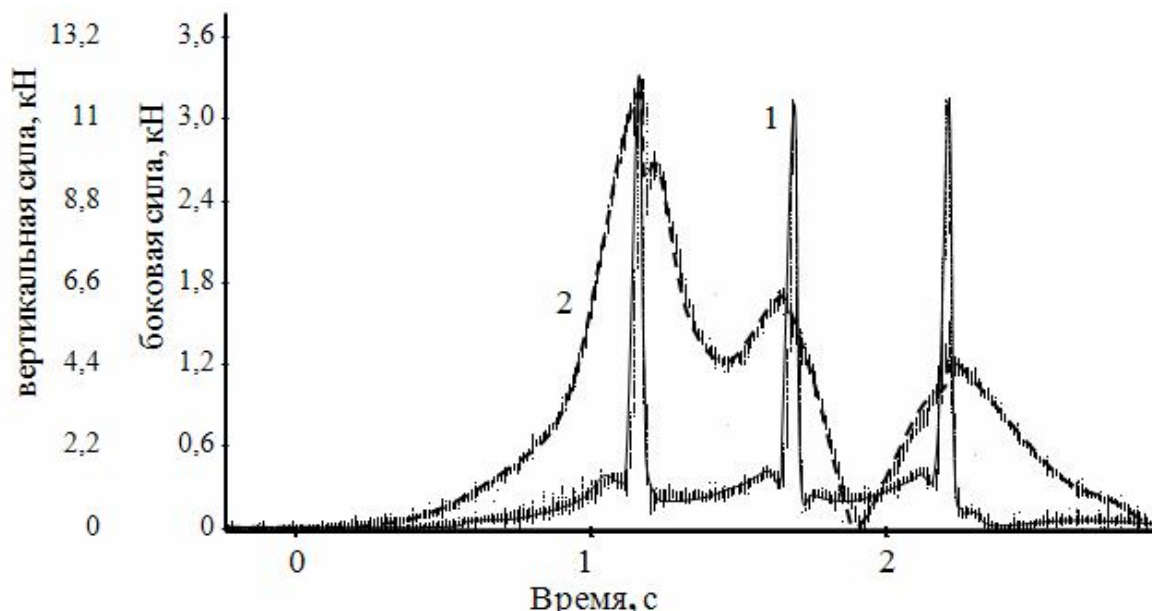


Рис. 3. Зависимости вертикальной (1) и боковой (2) силы, действующих на рельсы, от времени при движении маневрового локомотива

Анализ экспериментальных данных, полученных на бездефектном объекте и объекте с дефектом поверхности катания глубиной 2 мм и протяженностью 14 мм (рис. 4) позволил обнаружить повышение уровня динамических сил в системе колесо — рельс. Амплитудное значение вертикальных деформаций шейки при прохождении по дефекту превышало среднее значение в 1,8 раза.

Динамический удар колеса о рельс в зоне расположения дефекта приводит к подпрыгиванию колеса, проявившемуся на экспериментальных зависимостях в виде вертикальных колебаний с частотой 550 Гц (кривая 2 на рис. 4, б) и уменьшении более чем в 10 раз боковой силы (кривая 1 на рис. 4, б).

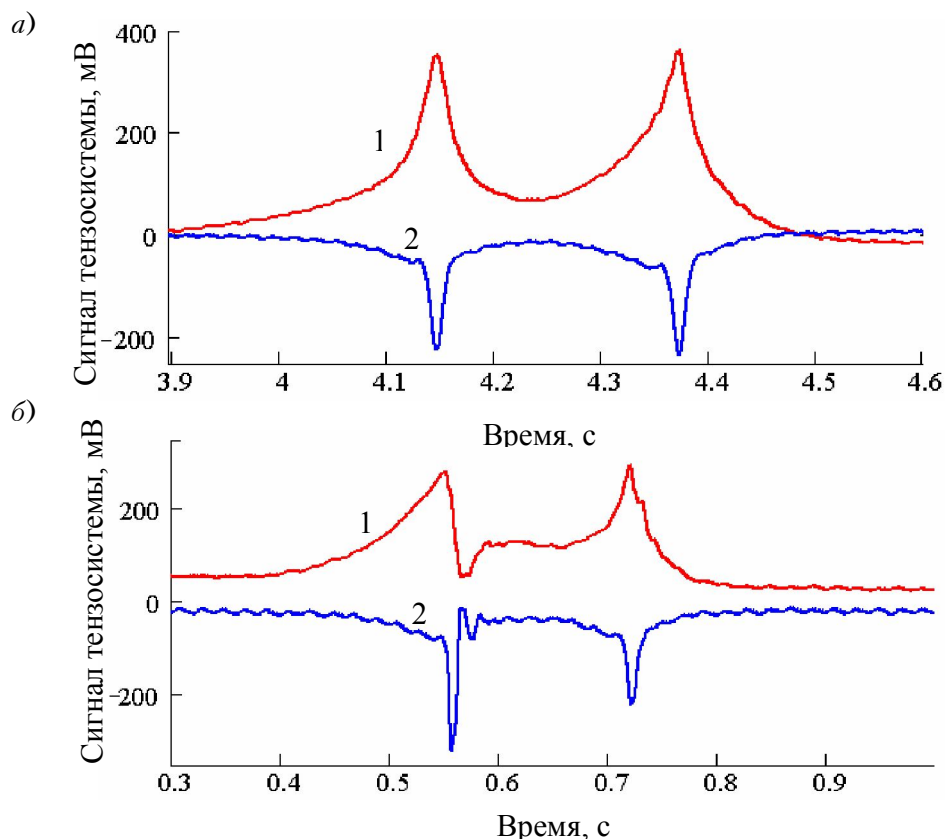


Рис. 4. Зависимость сигнала тензосистемы от вертикальной силы (1) и боковой силы (2):
а — бездефектное колесо; б — колесо с дефектом поверхности катания

В результате выполненных исследований разработан и экспериментально опробован способ определения величины боковых и вертикальных сил в системе колесо—рельс при прохождении поезда, рассчитаны необходимые значения коэффициентов. Проведены испытания макета тензометрического измерительного устройства в пути, по величине динамического воздействия колеса на рельс обнаружен дефект поверхности глубиной 2 мм и длиной 14 мм.

Дальнейшее научное развитие исследования предполагает совершенствование расчетной модели пути, создание дополнительных измерительных каналов тензосистемы, автоматизацию системы обработки и накопления измерительной информации, организацию экспериментов на различных скоростях с подвижным составом, имеющим различные типы и виды дефектов колес и другие неисправности ходовых частей.

Литература

1. Кудрявцев Н.Н., Кривошеев В.Н., Данченко О.А. Исследование неровностей колес пассажирских вагонов // Тр. ВНИИЖТа. 1979. № 608. С. 37–88.
2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М.Ф. Вериго. М.: Транспорт, 1986. 559 с.