

Методы экспериментальной оценки боковых сил (обзор)

А. М. БРЖЕЗОВСКИЙ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Представлен обзор методов экспериментального определения боковых сил взаимодействия колеса железнодорожного экипажа и головки рельса на основе имеющейся практики и анализа отечественных и зарубежных источников. Показаны современные тенденции совершенствования систем регистрации боковых сил с применением тензометрических датчиков и преобразователей, смонтированных на рельсах.

Ключевые слова: взаимодействие подвижного состава и пути; тензометрические датчики; тензометрические схемы; боковые силы; рамные силы; динамические напряжения в кромках подошвы рельса

Введение. Силовое взаимодействие колеса с головкой рельса характеризуется мгновенным значением пространственного вектора силы в контактной зоне. Явления, происходящие под воздействием этого вектора силы, в частности потеря устойчивости рельсошпальной решетки от поперечного сдвига по балласту, в количественном выражении можно достаточно объективно оценить по амплитуде горизонтальной проекции вектора силы на ось, перпендикулярную продольной оси рельса (боковой силой) [1].

Все известные методы экспериментальной оценки боковых сил, в том числе и методы, закрепленные в нормативных документах Российской Федерации [2] и Евросоюза [3, 4] можно классифицировать следующим образом:

- методы, реализуемые с применением датчиков (тензометрических схем или силомерных устройств), монтируемых на элементах верхнего строения пути (рельсы, рельсовые подкладки);
- методы, реализуемые с применением датчиков, монтируемых на элементах экипажной части подвижного состава (тензометрические колесные пары, колесные блоки, рамы тележек).

Ниже приводится обзор экспериментальных методов, реализуемых с применением датчиков, монтируемых на элементах верхнего строения пути.

Следует отметить, что эти методы по существу являются косвенными, однако, несмотря на это, позволяют с достаточной достоверностью выделить горизонтальную поперечную проекцию пространственного вектора силы, действующего в контактной зоне.

При этом настоящий обзор не претендует на исчерпывающее освещение проблемы.

На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций, испытательной практики специалистов АО «ВНИИЖТ», в том числе отделения «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава» (далее — отделение КИ), известны следующие способы экспериментальных оценок боковых сил с применением датчиков, монтируемых на элементах верхнего строения пути:

- по динамическим напряжениям, измеренным в одном поперечном сечении рельса в кромках подошвы рельсов (кромочные напряжения), с последующим анализом разности (полуразности) кромочных напряжений [5];
- по динамическим напряжениям, измеренным в одном поперечном сечении рельса в кромках подошвы рельса и в наружном сечении головки рельса, с последующим вычислением алгебраической комбинации напряжений («трехточечный» метод О. П. Ершкова [6]);
- по динамическим напряжениям в шейке рельса, измеренным в одном поперечном сечении рельса тензодатчиками, расположенными перпендикулярно относительно продольной оси рельса, с применением полных мостов Уитстона (метод Шлупфа [7]) или индивидуальных (с одним рабочим датчиком) тензометрических схем, регистрирующих напряжения в различных точках на шейке рельса в одном поперечном сечении рельса (метод «РЖД-2016») [8];
- по горизонтальным силам, передаваемым от рельса на шпалу с применением силоизмерительных датчиков, регистрирующих силы, действующие от рельса на шпалу [1, 9];
- по динамическим напряжениям в шейке рельса, измеренным в одном поперечном сечении рельса с обеих сторон горизонтально ориентированными датчиками, расположенными по оси кручения рельса [10];
- по напряжениям в шейке рельса посредством силомерных вкладышей [11];
- «французский метод», основанный на измерении динамических напряжений в шейке рельса от

воздействия изгибающего момента в горизонтальной плоскости рельса [12];

— «американский метод», основанный на измерении динамических напряжений в кромках подошвы рельса тензодатчиками, расположенными под углом 45° к продольной оси рельса [13].

1. Измерения кромочных напряжений в подошве рельса. Установлено, что нормальные напряжения, возникающие в рельсах от изгиба и кручения, достигают наибольшей величины в кромках подошвы рельса, и, соответственно, динамические кромочные напряжения наиболее полно отражают динамику взаимодействия колеса и рельса. При этом разность среднеарифметических динамических кромочных напряжений по наружной и внутренней кромкам подошвы рельса характеризует реакцию от действия боковой силы. Так, для направляющих сцепных осей паровозов О. П. Ершовым впервые была выведена линейная эмпирическая зависимость боковой силы F_y от полуразности кромочных напряжений в виде [5]:

$$F_y = 2,15W_y k_{г.и} (\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) / (1 - \lambda), \quad (1)$$

где W_y — момент сопротивления рельса при горизонтальном изгибе; $k_{г.и}$ — коэффициент относительной жесткости рельса и опоры при горизонтальном изгибе; $\sigma_{н.кр}$, $\sigma_{вн.кр}$ — динамические напряжения в наружной и внутренней кромках подошвы рельса соответственно; λ — отношение динамического кромочного напряжения в рельсе при его кручении к динамическому кромочному напряжению при горизонтальном изгибе.

В последующем на основании обобщения результатов многочисленных испытаний по воздействию на путь магистральных локомотивов и грузовых вагонов зависимость (1) была уточнена и представлена в виде:

$$F_y = (\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) / 122 + 1,0. \quad (2)$$

По результатам комплексных испытаний электроваза ВЛ80 на основании регистрировавшихся в один момент времени реализаций боковых сил посредством тензометрической колесной пары и кромочных напряжений в подошве рельса А. К. Шафрановским были предложены выражения [14]:

$$0,5(\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) = 76F_y + 83 \quad (3)$$

или

$$F_y = (\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) / 152 - 1,09. \quad (4)$$

М. Ф. Вериге и С. С. Крепкогорский также отмечали, что боковые силы возможно оценивать по разности кромочных напряжений в подошве рельса, измеряемых в сечениях пути, соответствующих мак-

симальным значениям фиксируемых на подвижном составе динамических рамных сил [15].

Исследование, проведенное Ю. С. Роменом и М. С. Тиховым [16] с целью выявления зависимостей между полуразностями кромочных напряжений в подошве рельса и боковыми силами, передающимися от колес груженных грузовых вагонов на головку рельса, также показало устойчивую взаимосвязь между указанными динамическими процессами с коэффициентами корреляции свыше 0,8. В частности, для груженных грузовых вагонов при движении в круговой кривой радиусом 650 м коэффициенты корреляции между полуразностями динамических кромочных напряжений в подошве рельса и боковыми силами достигали 0,90...0,95; установлены следующие эмпирические зависимости между полуразностями кромочных напряжений в подошве рельса, МПа, и боковыми силами, кН:

$$0,5(\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) = 1,16F_y + 9,89 \quad (5)$$

или

$$F_y = 0,43(\sigma_{н.кр} - \sigma_{вн.кр}) - 8,6. \quad (6)$$

В выражениях (2–6) $\sigma_{н.кр}$, $\sigma_{вн.кр}$ в кгс/см², F_y в тс.

Естественно, что величины постоянных коэффициентов линейных эмпирических зависимостей (2–6) существенно зависят от параметров и конструкции ходовых частей подвижного состава, конструкции и технического состояния элементов верхнего строения пути и т.д. Однако при определенных допущениях линейные эмпирические зависимости боковых сил от полуразности динамических кромочных напряжений могут использоваться для предварительной оценки и прогнозирования величин боковых сил подвижного состава.

На железных дорогах Европы и Северной Америки используется способ экспериментальной оценки боковых сил по напряжениям, зарегистрированным тензометрическими датчиками, расположенными на подошве рельса под углом 45° к продольной оси рельса — «американский метод» [13]. Теоретические и экспериментальные исследования корректности «американского метода» для целей оценки боковых сил показали наличие линейной зависимости измеренных величин боковых сил от величин поперечного смещения точки приложения результирующей пространственной силы, воспринимаемой головкой рельса. Однако количественный учет такой зависимости уточняет величины боковой силы не более чем на 1...4 %.

2. Измерения в одном сечении рельса напряжений в кромках подошвы рельса совместно с напряжениями в наружном сечении головки рельса. Способ экспериментальной оценки боковых сил, действующих в одном

сечении рельса, путем одновременной регистрации напряжений в кромках подошвы рельса и в наружном сечении головки рельса («трехточечный» метод) был теоретически обоснован и практически реализован О. П. Ершковым в начале 60-х годов. В основе метода лежит разработанная М. Ф. Вериго и О. П. Ершковым теоретическая зависимость между напряжениями в подошве рельса, вызываемыми действием крутящего момента и боковой силы. Эта зависимость определяется геометрическими параметрами поперечного сечения рельса (рис. 1) и коэффициентом f , являющимся отношением напряжений в наружной кромке подошвы рельса к осевым напряжениям в рельсе. При этом оказалось возможным выделить компоненты напряжений в крайних волокнах подошвы рельса $\sigma_{\text{Н}}^{\text{П}}$ и в наружной грани головки рельса $\sigma_{\text{НР}}^{\text{Г}}$, обусловленные действием боковой силы F_y , в виде [6]:

$$\sigma_{\text{Н}}^{\text{П}} = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_{\text{П}}}{b_{\text{Г}}} \cdot \frac{y_1}{y_2} \cdot \sigma_{\text{Р}}^{\text{П}} + \frac{h_1}{h_1 + h_2} \cdot \sigma_{\text{Н}}^{\text{Усл}} + \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_{\text{П}}}{b_{\text{Г}}} \cdot \sigma_{\text{НР}}^{\text{Г}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{Р}}^{\text{П}} = \frac{\sigma_{\text{НР}}^{\text{П}} + \sigma_{\text{ВН}}^{\text{П}}}{2}$, $\sigma_{\text{Н}}^{\text{Усл}}$ — полусумма и полуразность напряжений в наружной и внутренней кромках подошвы рельса соответственно.

В уравнении (7) геометрические параметры $b_{\text{ПОД}}$, $b_{\text{ГОЛ}}$, h_1 , h_2 , e , h_1' , y_1 , y_2 представляют собой соответственно ширину подошвы рельса; ширину головки рельса; расстояние по вертикали от точки приложения вертикальной силы от колеса на головку рельса до горизонтальной поперечной плоскости расположения нейтральной оси поперечного сечения рельса; расстояние по вертикали от подошвы рельса до горизонтальной поперечной плоскости, проходящей через центр изгиба шейки рельса; эксцентриситет условной точки приложения вертикальной проекции пространственного вектора силы в контактной зоне силы от колеса на головку рельса P относительно вертикальной оси симметрии рельса; расстояние по вертикали от точки приложения боковой силы к головке рельса до нейтральной оси поперечного сечения рельса; расстояние по вертикали от точки приложения боковой силы к головке рельса до нейтральной оси поперечного сечения рельса; расстояние по вертикали от подошвы рельса до нейтральной оси поперечного сечения рельса.

Алгебраическая сумма (7) напряжений в кромках подошвы рельса (датчики 1 и 2) и напряжений в наружном сечении головки рельса (датчик 3) представляет собой реакцию рельса на воздействие боковой силы и, следовательно, может служить ее косвенной оценкой. При этом напряжения во внутренней грани

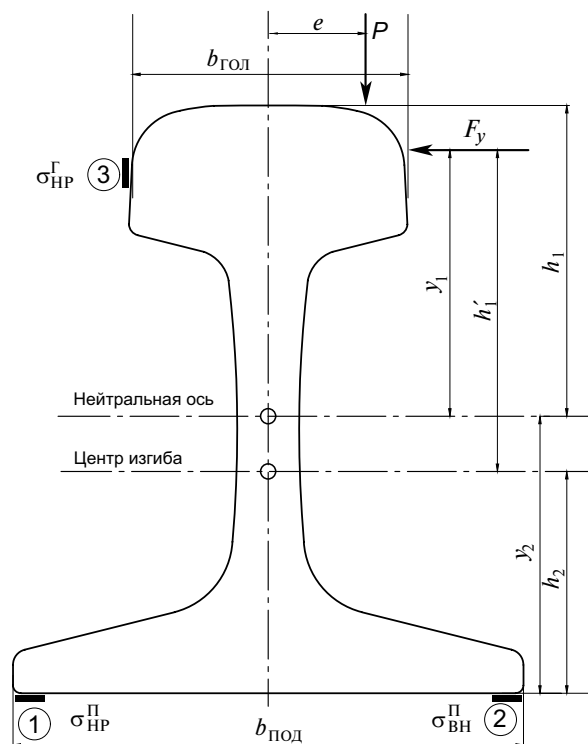


Рис. 1. Схема наклейки тензодатчиков на рельс:

1, 2, 3 — номера тензодатчиков

Fig. 1. Scheme of sticking strain gauges on the rail:

1, 2, 3 — numbers of strain gauges

головки рельса, обусловленные действием боковой силы $\sigma_{\text{ВР}}^{\text{Г}}$, например, для рельса типа Р65, определяются выражением

$$\sigma_{\text{ВР}}^{\text{Г}} = 1,2\sigma_{\text{Р}}^{\text{П}} + 0,51\sigma_{\text{Н}}^{\text{П}} + 1,55\sigma_{\text{М}}^{\text{П}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{М}}^{\text{П}} = \sigma_{\text{Н}}^{\text{П}} - 2\sigma_{\text{Н}}^{\text{Усл}} h_1 / (h_1 + h_2)$.

Следует отметить, что точность измерения напряжений в рельсе при применении «трехточечного» метода О. П. Ершкова практически не зависит от возможного на практике выбора места для наклейки тензодатчиков в одном поперечном сечении рельса.

3. Измерение напряжений в шейке рельса. Метод экспериментальной оценки боковых сил тензодатчиками, смонтированными на шейке рельса, впервые был предложен швейцарским инженером Х. Шлупфом [7]. Идеология метода заключается в наличии прямой пропорциональной зависимости боковых сил от разности изгибающих моментов, действующих на взаимно симметричные относительно нейтральной оси шейки рельса точки А и С поперечного сечения рельса (рис. 2).

Изгибающие моменты относительно точек А и С шейки рельса от действия боковой силы F_y и верти-

кальной проекции P пространственного вектора силы в контактной зоне давления колеса на рельс можно записать в виде:

$$M_A = F_y l_1 - Pe; \quad M_C = F_y l_2 - Pe, \quad (9)$$

где l_1, l_2 — расстояния от плоскости приложения боковой силы F_y до точек A и C поперечного сечения рельса.

$$\text{Тогда } F_y = (M_C - M_A) / (l_2 - l_1). \quad (10)$$

В качестве измерителя метод использует полный мост Уитстона с температурной самокомпенсацией. Схема непосредственно определяет боковые силы в местной системе координат рельса и теоретически не может давать существенную ошибку, обусловленную наличием эксцентриситета e .

На основе метода Шлупфа в России разработан способ измерения, повышающий точность определения боковой силы за счет снижения погрешности, обусловленной возможным эксцентриситетом приложения пространственной силы от колеса на головку рельса [17]. Авторами этого способа измерений установлено, в частности, что с его применением погрешность измерения боковой силы не превышает 3 % при действии вертикальной силы величиной 15 тс на головку рельса с эксцентриситетом 10 мм.

Дальнейшим развитием метода Шлупфа, существенно повышающим информативность экспериментальных данных, является тензометрическая схема «кусочно-непрерывной» регистрации, которая

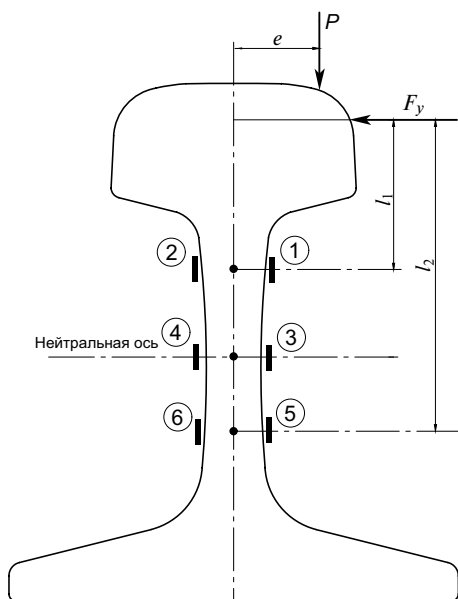


Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков на шейке рельса:

1–6 — номера тензодатчиков

Fig. 2. Location scheme of strain gauges on the rail neck:

1–6 — numbers of strain gauges

основана на объединении в одной полумостовой тензометрической схеме или в одной полной мостовой схеме двух схем, расположенных в пределах одного шпального ящика на некотором расстоянии друг от друга. В России этот способ был применен и апробирован для измерения вертикальных сил, передающихся от колеса на рельс, А.Я. Коганом и А.А. Верхотиным [18]. Важным преимуществом схемы «кусочно-непрерывной» регистрации является возможность использования одного канала регистрации для экспериментальной оценки силового фактора на участке рельса между шпалами. Длина такого участка для рельса типа Р50 составляет 22...23 см, а для рельса типа Р65 — 21...22 см. Получающаяся при этом экономия каналов регистрации является вполне оправданной, учитывая общее количество каналов, необходимое для получения статистически достоверного объема экспериментальных данных, характеризующих показатели напряженно-деформированного состояния пути.

По данным, приведенным в обзоре итальянских специалистов [11], в исследовательских центрах железных дорог ЕС аналогичный способ объединения тензометрических схем также применяется для экспериментальных исследований боковых сил. Такой способ получил название «французский», т. к. впервые описан французским инженером А. Моро [12]. На основании предварительного моделирования и последующей верификации «французского» способа установлено, что оптимальное расстояние между двумя измерительными сечениями рельса, расположенными в междушпальном пространстве, составляет 400 мм для рельсов типа 60Е1 с расстоянием между осями шпал 60 см.

В связи с внесением метода экспериментальной оценки боковых сил по Шлупфу в отдельные нормативные документы специально исследовался вопрос о величине возможной погрешности измерения, обусловленной при прочих одинаковых условиях наличием смещения точки приложения пространственного вектора силы в контактной зоне внутрь или наружу по поверхности катания головки рельса относительно продольной оси рельса. По данным исследований отделения КИ АО «ВНИИЖТ», основная (суммарная) погрешность измерения боковых сил по методу Шлупфа составляет 7–9 % и обусловлена главным образом точностью выбора сечений для монтажа тензометрических датчиков на шейке рельса.

С целью уточнения указанной величины погрешности специалистами АО «ВНИИЖТ» был поставлен специальный эксперимент с варьированием точки приложения вертикальной нагрузки, приходящейся на головку рельса, в процессе проведения статической калибровки. В присутствии комиссии, в состав

которой входили представители АО «ВНИИЖТ», в октябре 2015 г. проводились испытания в круговой кривой радиусом 600 м на пути с типовой конструкцией верхнего строения (рельсы типа Р65, шпалы железобетонные, балласт щебеночный), тип рельсового скрепления АРС-4. По результатам испытаний при смещении точки приложения вертикальной нагрузки к головке рельса на величину ± 25 мм относительно продольной оси рельса величина варьирования калибровочного коэффициента составила не более $\pm 7\%$, что подтвердило указанный выше уровень погрешности измерения боковых сил по методу Шлупфа.

Специалистами ООО «Хекса» разработан экспериментально-расчетный метод «восстановления» вертикальных и боковых сил (метод «РЖД-2016») с расположением тензометрических датчиков аналогично методу Шлупфа (рис. 2) [8]. На основе поставленного специальным образом калибровочного эксперимента, по мнению авторов разработки, корректно решается проблема учета влияния изгибающего момента от действия вертикальной проекции суммарного вектора сил в контакте, приложенной с эксцентриситетом относительно продольной оси рельса, на «восстановленные» величины боковых сил.

4. Измерения горизонтальных сил, передаваемых от рельса на шпалу, с применением силоизмерительных датчиков. Эффективным способом экспериментальной оценки боковых сил является методика, основанная на измерении горизонтальных и вертикальных сил, передающихся от рельса на шпалу, с последующим пересчетом, учитывающим фактические величины коэффициентов относительной жесткости элементов верхнего строения пути [1, 9]. Этот способ экспериментальной оценки, как правило, применяется для определения сил, передающихся от рельса на шпалу, по известным величинам боковых сил. Однако его использование возможно и для решения обратной задачи.

М. Ф. Вериге и С. С. Крепкогорским теоретически установлена взаимосвязь между боковыми силами и силами, передающимися от рельса на шпалу под направляющими колесными парами, в виде [15]:

$$F_y = 2s^{-1}(H_{ш} / k_r + f_0 P_{ш} / k), \quad (11)$$

где s — расстояние между осями шпал; k_r, k — коэффициенты относительной жесткости рельса и рельсового основания при горизонтальных и вертикальных деформациях соответственно; $H_{ш}, P_{ш}$ — горизонтальная и вертикальная сила, передающаяся от рельса на шпалу, соответственно; f_0 — коэффициент трения скольжения колеса по рельсу (0,25).

Методика, испытательное оборудование и способы статистической обработки реализаций гори-

зонтальных и вертикальных сил, передающихся от рельса на шпалу, достаточно хорошо отработаны. Основными чувствительными элементами системы регистрации являются силомерные элементы, смонтированные на рельсовых подкладках (прокладках) различных типов, адаптированных к конструкции рельсовых скреплений на измерительных участках пути. Непременным условием применения данного метода является проведение опытов по определению фактических параметров k_r, k , относящихся к измерительному сечению пути.

Экспериментальные исследования взаимодействий локомотивов и пути, проведенные специалистами отделения КИ [19], позволили выявить линейные зависимости боковых сил от горизонтальных сил, действующих от рельса на шпалу, в виде

$$F_y = A + B H_{ш}, \quad (12)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, величины которых обусловлены жесткостью рельса и рельсового основания, наличием трения и люфтов в элементах верхнего строения пути на измерительных участках.

Так, по результатам испытаний электровоза ВЛ40 на участке Белореченская — Майкоп после реконструкции верхнего строения пути (новые рельсы типа Р50, шпалы деревянные, балласт щебеночный) постоянные коэффициенты составляли: $A = 0,5$; $B = 1,87$.

5. Измерение напряжений в шейке рельса с обеих сторон по оси кручения рельса горизонтально ориентированными датчиками. С целью экспериментальной оценки и сравнения боковых сил, возникающих под воздействием подвижного состава на путь с различными упругими и диссипативными параметрами под рельсового основания в поперечном направлении, Н. Д. Кравченко применил тензометрические схемы с горизонтально ориентированными тензодатчиками, смонтированными на шейке рельса с правой и левой стороны по оси кручения рельса в одном поперечном сечении рельса [10]. Обработка результатов измерений производилась с использованием соотношения

$$F_y = 0,02(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (13)$$

где σ_1, σ_2 — напряжения в шейке рельса с правой и левой стороны по оси кручения рельса соответственно, кг/см²; F_y — в тс.

Одновременно с измерением боковых сил регистрировались горизонтальные и вертикальные силы, передающиеся от рельса на шпалу ($H_{ш}$ и $P_{ш}$). В качестве измерительного участка пути использовалась круговая кривая радиусом 400 м с возвышением наружного рельса 112 мм. Верхнее строение пути из рельсов Р65 с железобетонными шпалами в коли-

честве 1840 шт. на 1 км, балласт щебеночный, рельсовые скрепления типа КБ. Жесткость рельсового скрепления, жесткость рельсовой нити по подошве относительно земли и модуль упругости пути в горизонтальном поперечном направлении составляли соответственно $61 \cdot 10^3$ кгс/см, $93,7 \cdot 10^3$ кгс/см (при вертикальной нагрузке от рельса на шпалу 8,0 тс) и 633 кгс/см² (при вертикальной нагрузке от рельса на шпалу 8,0 тс).

В связи с этим определенный интерес имеет анализ полученных Н.Д. Кравченко результатов в сопоставлении с величинами боковых сил, рассчитанными по экспериментальным значениям сил $H_{ш}$ и $P_{ш}$ на основании выражения (11), см. таблицу. Величины $P_{ш}$ определялись соотношением [15]:

$$P_{ш} = 0,5 k_s P_{стк}, \quad (14)$$

где $P_{стк}$ — статическая нагрузка, передаваемая от колеса на рельс.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по фактически зарегистрированным величинам горизонтальных сил, передающихся от рельса на шпалу, боковых сил с учетом статических осевых нагрузок подвижного состава показало следующее (таблица):

- имеется принципиальная возможность использования тензометрической схемы из тензодатчиков, смонтированных на оси кручения шейки рельса с горизонтальным (вдоль оси кручения) расположением;
- выражение (10) может быть применено для оценки боковых сил с погрешностью, не превышающей 14%.

6. Измерения боковых сил в шейке рельса посредством силомерных вкладышей. Итальянскими специалистами разработан и в 2003 г. апробирован экспериментально-расчетный метод определения вертикальной и поперечной горизонтальной реакций (боковая сила) рельса на воздействие пространственной нагрузки от колеса [11]. В основу метода положе-

на аналитически доказанная возможность разделения по направлениям действия сил напряжений в шейке рельса. Реализация экспериментально-расчетного комплекса предусматривает преобразование сигналов от групп тензодатчиков, смонтированных на двух кольцеобразных вкладышах: на одном из вкладышей тензодатчики воспринимают изгибные напряжения от кручения головки рельса под воздействием поперечной горизонтальной реакции рельса, на втором — эквивалентные напряжения, обусловленные действием вертикальной реакции рельса.

Вкладыши, оборудованные тензодатчиками, посредством достаточно плотной посадки с применением фиксирующих плоских шайб и болтового соединения монтируются в отверстия, высверленные в шейке рельса в зоне нейтральной оси поперечного сечения рельса. Общая масса устройства не более 0,2 кг, частота дискретизации сигналов тензометрических схем 2000 Гц.

Апробация устройства показала, что величина погрешности измерения проекций сил существенно зависит от точности установки вкладышей относительно плоскостей симметрии поперечного сечения рельса.

7. Верификация экспериментальных оценок боковых сил. В связи с условным характером экспериментальных оценок боковых сил методами, реализуемыми с применением датчиков, монтируемых на элементах верхнего строения пути, изучение бокового воздействия на путь такими способами не может считаться завершенным без сравнения статистических оценок реализаций боковых сил с соответствующими оценками динамических процессов взаимодействия, поддающихся прямому экспериментальному определению. Наряду с приведенным выше сравнением статистических характеристик боковых сил с напряжениями в кромках подошвы рельса и горизонтальных нагрузок, действующих от рельса на шпалу, существенным является также сравнение реализаций боковых и рам-

Боковые и горизонтальные силы, передающиеся от рельса на шпалу, при скорости движения 80 км/ч

Lateral and vertical forces transmitted from the rail to the sleeper at the speed of 80 km/h

Тип подвижного состава		$P_{стк}$, тс	Экспериментальные величины ¹ $H_{ш}$, тс	Боковые силы F_y , тс		Различие, %, экспериментальных и расчетных величин F_y
				Экспериментальные величины ¹	Расчетные величины по выражению (11)	
Тепловоз 2ТЭ10Л		11,5	3,4	11,0	11,5	+4,3
Грузовые вагоны	8-осный	10,5	2,3	9,4	8,1	-13,8
	6-осный	10,5	3,2	12,0	10,4	-13,3
	4-осный	10,5	3,2	11,2	10,4	-7,1

¹ Максимальные вероятные значения с доверительной вероятностью 0,994.

ных сил при условии их одновременной регистрации на конкретных измерительных участках пути.

Подробные исследования статистических зависимостей реализаций боковых сил в зависимости от рамных сил, зарегистрированных при комплексных испытаниях локомотивов различных серий, были проведены Г. М. Алексеевым [20]. Исследовались электровозы, имеющие принципиальные различия конструкции и параметров экипажной части — грузовой электровоз ВЛ80 и пассажирский электровоз ЧС2. На обеих сериях электровозов боковые силы регистрировались с применением тензометрических колесных пар. Рамные силы на электровозе ВЛ80 регистрировались датчиками относительных линейных перемещений «букса — рама тележки» с последующим умножением на величину жесткости поперечной связи «букса — рама тележки»; на электровозе ЧС2 — методом тензометрирования изгибных напряжений в шпинтонах буксовых связей «букса — рама тележки».

По результатам испытаний было установлено, что максимальные значения боковых сил во всем диапазоне скоростей движения электровозов (90...130 км/ч для ВЛ80 и 125...185 км/ч для ЧС2) превышали соответствующие значения рамных сил. При этом с увеличением скорости движения различия величин боковых и рамных сил существенно возрастали. Кроме того, эти различия оказались тем выше, чем больше была величина неподдрессоренных масс электровоза.

Корреляционный анализ реализаций боковых и рамных сил выявил еще одну особенность: с увеличением жесткости поперечной связи «букса — рама тележки» и снижением неподдрессоренных масс коэффициент корреляции боковых и рамных сил возрастал от 0,56 по электровозу ВЛ80 и до 0,90 по электровозу ЧС2.

По результатам испытаний грузовых вагонов на тележках модели 18-100 также были получены величины коэффициентов корреляции боковых сил, измеренных по методу Шлупфа, и рамных сил, измеренных по изгибным напряжениям в боковых рамах тележки, близкие к соответствующему показателю электровоза ЧС2 [16].

Заключение. Обзор методов экспериментального определения боковых сил с применением тензометрических датчиков и преобразователей, смонтированных на рельсах, показал, что имеется широкий набор инструментальных средств измерения, позволяющих с приемлемой для натурного эксперимента погрешностью получить количественную оценку боковых сил. Возможность применения той или иной методики определения боковых сил обусловлена наличием технических средств для ее реализации и необходимостью количественной оценки погрешности измерений.

В связи с наличием устойчивых статистических зависимостей между реализациями боковых сил и реализациями динамических напряжений в кромках подошвы рельсов, а также горизонтальных сил, действующих от рельса на шпалу, и рамных сил целесообразно проводить оценку адекватности применяемых способов экспериментального определения боковых сил путем сравнения их статистических оценок с соответствующими оценками реализаций указанных динамических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. М.: Трансжелдориздат, 1956. 280 с.
2. ГОСТ Р 55050—2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 13 с.
3. UIC-518—2003. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior — safety — track fatigue — ride quality. Paris. 2003. 3rd ed. 72 p.
4. DIN EN 14363—2005—10. Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary test. Germany. 2005. 130 p.
5. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов // Вопросы воздействия подвижного состава на путь: сб. трудов ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1949. Вып. 33. С. 289—327.
6. Ершков О. П. Работа головки рельсов при совместном действии изгибных и контактных напряжений // Вестник ВНИИЖТ. 1963. № 2. С. 43—46.
7. Schlumpf H. Messungen mit Dehnungsmeßstreifen bei den SBB. Technische Rundschau. Bern. 1955. 26 s.
8. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10—15.
9. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
10. Кравченко Н. Д. Исследование влияния жесткости подрельсового основания в горизонтальном направлении (поперек пути) на силы воздействия подвижного состава: автореф. ... канд. дисс. / ВНИИЖТ. М., 1968. 19 с.
11. Bracciali A., Folgarait P. New sensor for lateral end vertical wheel-rail forces measurements. URL: [http://www.andreabracciali.it/063%20Railway%20Engineering%20\(2004\)%20L-V%20Rail%20Forces%20Meas.pdf](http://www.andreabracciali.it/063%20Railway%20Engineering%20(2004)%20L-V%20Rail%20Forces%20Meas.pdf) (дата обращения: 30.09.2016 г.).
12. Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges // Révue Générale des Chemins de Fer. France. 1987. Avril 2. P. 25—32.
13. Design, Validation and Application of a Monitoring Device for Measuring Dynamic Wheel / Rail Loads. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting. Paper no. 84-WA/RT-10. 1984.
14. Шафрановский А. К. Измерение и непрерывная регистрация сил взаимодействия колесных пар локомотивов с рельсами // Труды ВНИИЖТ. Вып. 389. М.: Транспорт, 1969. 119 с.

15. Королев К. П. Тележечные экипажи локомотивов для повышенных скоростей движения // Труды ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1962. Вып. 248. С. 210–301.

16. Ромен Ю. С., Тихов М. С. Объем информации для установления допустимых скоростей движения по результатам комплексных испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. ст. СПб: ПГУПС, 2007. С. 87–94.

17. Устройство для определения давления колеса на рельс: патент на полезную модель № 1794740 ГОСПАТЕНТ СССР / Г. Ф. Агафонов, Э. И. Даниленко, А. В. Грачев [и др.] М., 1993.

18. Коган А. Я., Верхотин А. А. Исследование спектральных характеристик вертикальных составляющих сил в месте контакта колеса с рельсом // Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути реального очертания: сб. трудов ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1985. С. 44–49.

19. Динамические качества и воздействие на путь скоростных электропоездов ЧС4, ЧС2М, ВЛ40, тепловоза ТЭ109 и электропоездов

за ВЛ8 с модернизированной экипажной частью / Г. Г. Желнин, В. А. Молодилов, В. О. Певзнер [и др.] // Динамические качества и воздействие на путь локомотивов: сб. трудов ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1975. Вып. 542. С. 4–78.

20. Алексеев Г. М. Исследование зависимости боковых и рамных сил локомотивов // Динамические качества и воздействие на путь локомотивов: сб. трудов ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1975. Вып. 542. С. 78–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БРЖЕЗОВСКИЙ Александр Менделович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отделения «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 30.11.2016 г., принята к публикации 27.01.2017 г.

Methods of experimental evaluation of lateral forces (review)

A. M. BRZHEZOVSKIY

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. On the basis of existing practice and analysis of domestic and foreign sources a classification of methods for experimental evaluation of the lateral forces of interaction between the wheel of the railway carriage and the rail head is given. A review of the various experimental methods implemented, using gauges, mounted on elements of track superstructure, is provided. Brief description of the principal methods of using the elastic properties of rails for the experimental evaluation of lateral forces using strain gauges is made. Article provides methods for measuring the lateral force, based on the registration of the forces acting from the rail to the sleeper, and special elastic rail sensing elements embedded in the rail neck. Current trends of improving registration system of lateral forces, including ways to "continuous" registration of the lateral forces are shown. Review includes recommendations for evaluating the adequacy of the measuring lateral forces on the basis of analysis of experimental data from a number of dynamic interaction processes in rolling stock and track interaction recorded simultaneously with the side forces on the same measurement track sections, including dynamic stresses in the edges of the rail foot of horizontal transverse forces, acting on the rail to the sleeper, frame strength.

Keywords: railway train and track interaction; strain gauges; strain measuring schemes; lateral forces; frame forces; dynamic stresses in rail foot edges

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-10-18>

REFERENCES

1. Bromberg E. M., Verigo M. F., Danilov V. N., Frishman M. A. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of railway track and rolling stock]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956, 280 p.
2. GOST R 55050–2012. *Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the track and test methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 13 p. (in Russ.)
3. UIC-518–2003. *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – safety – track fatigue – ride quality*. Paris, 2003, 3rd ed., 72 p.
4. DIN EN 14363–2005–10. *Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary test*. Germany, 2005, 130 p.
5. Ershkov O. P. *Ustanovlenie koeffitsientov, uchityvaushchih bokovoy izgib i kruchenie rel'sov* [Determination of the coefficients

which take into account the lateral bending and twisting of rails]. *Voprosy vozdeystviya podvizhnogo sostava na put'*. Sb. tr. TsNII MPS [The impact of rolling stock on the track. Proc. of works of TsNII MPS]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1949, no. 33, pp. 289–327.

6. Ershkov O. P. *Rabota golovki rel'sov pri sovmestnom deystvii izgibnykh i kontaktnykh napryazheniy* [Performance of rail head under the combined action of bending and contact stresses]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1963, no. 2, pp. 43–46.

7. Schlumpf H. *Messungen mit Dehungsmessstreifen bei den SBB*. Technische Rundschau. Bern, 1955, 26 p. (in Germ.)

8. Gapanovich V. A. *Voprosy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii* [Issues of interaction of rolling stock and infrastructure in the heavy haul transport]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2016, no. 10, pp. 10–15.

9. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of railway track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986, 559 p.

10. Kravchenko N. D. *Issledovanie vliyaniya zhestkosti podrel'sovogo osnovaniya v gorizont'al'nom napravlenii (poperek puti) na sily vozdeystviya podvizhnogo sostava. Kand. tekhn. nauk diss. Aftoref.* [Research of the influence of rigidity of rail base in the horizontal direction (across the track) on the impact forces of the rolling stock. Cand. tech. sci. diss. Synopsis]. Moscow, VNIIZhT Publ., 1968, 19 p.

11. Bracciali A., Folgarait P. *New sensor for lateral end vertical wheel-rail forces measurements*. Available at URL: [http://www.andreabracciali.it/063%20Railway%20Engineering%20\(2004\)%20L-V%20Rail%20Forces%20Meas.pdf](http://www.andreabracciali.it/063%20Railway%20Engineering%20(2004)%20L-V%20Rail%20Forces%20Meas.pdf) (retrieved on 30.09.2016)

12. Moreau A. *La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges*. *Révue Générale des Chemins de Fer*, France, Avril 2 1987, pp. 25–32. (in Franc.)

13. *Design, Validation and Application of a Monitoring Device for Measuring Dynamic Wheel / Rail Loads*. Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Paper no. 84-WA/RT-10, 1984.

14. Shafranovskiy A. K. *Izmerenie i nepreryvnaya registratsiya sil vzaimodeystviya kolesnykh par lokomotivov s rel'sami* [Measurement and continuous recording of the forces of interaction of locomotive wheelsets with rails]. Sb. tr. OAO

"VNIIZhT" [Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Transport Publ., 1969, no. 389, 119 p.

15. Korolev K. P. *Telezhechnye ekipazhi lokomotivov dlya povyshennykh skorostey dvizheniya* [Bogie carriages of locomotives for increased travel speeds]. Tr. TsNII MPS [Proc. of TsNII MPS]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1962, no. 248, pp. 210–301.

16. Romen Yu. C., Tikhov M. S. *Ob'em informatsii dlya ustanovleniya dopustimyykh skorostey dvizheniya po rezul'tatam kompleksnykh ispytaniy* [The amount of information to establish allowable travel speeds on the results of complex tests]. Sb. nauchn. st. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty [Proc. of sci. works. Rolling stock of the twenty-first century: ideas, requirements, projects]. Saint-Petersburg, PGUPS Publ., 2007, pp. 87–94.

17. Agafonov G. F., Danilenko E. I., Grachev A. V., Frolov L. N., Romanov V. M. *Device for determining the wheel pressure on the rail*. Utility patent №1794740. Moscow, Gospatent SSSR, 1993 (in Russ.).

18. Kogan A. Ya., Verkhotin A. A. *Issledovanie spektral'nykh kharakteristik vertikal'nykh sostavlyayushchikh sil v meste kontakta koleasa s rel'som* [Study on spectral characteristics of the vertical components of forces at the contact point of rail with wheel]. Reshenie zadach vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i puti real'nogo ochertaniya. Sb. tr. OAO "VNIIZhT" [Solution of problems of interaction of rolling stock and track of real outline. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Transport Publ., 1985, pp. 44–49.

19. Zhelnin G. G., Molodikov V. A., Pevzner V. O., Shestakov V. N., Alekseev G. M., Kirsanov V. S., Matusovskiy G. I., Shinkarev B. S. *Dinamicheskie kachestva i vozdeystvie na put' skorostnykh elektrovozov ChS4, ChS2M, VL40, teplovoza TE109 i elektrovoza VL8 s modernizirovannoy ekipazhnoy chast'yu* [Dynamic quality and impact on the track of high-speed electric locomotives CHS4, CHS2M, VL40, diesel locomotive TE109 and electric locomotive VL8 with the upgraded carriage part]. Dinamicheskie kachestva i vozdeystvie na put' lokomotivov. Sb. tr. OAO "VNIIZhT" [Dynamic qualities and impact of locomotives on the track. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Transport Publ., 1975, no. 542, pp. 4–78.

20. Alekseev G. M. *Issledovanie zavisimosti bokovykh i ramnykh sil lokomotivov* [Study of the dependence of the side frame and forces of locomotives]. Dinamicheskie kachestva i vozdeystvie na put' lokomotivov. Sb. tr. OAO "VNIIZhT" [Dynamic qualities and impact of locomotives on the track. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Transport Publ., 1975, no. 542, pp. 78–84.

ABOUT THE AUTHOR

Aleksander M. BRZHEZOVSKIY,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Department "Integrated research on interaction between track and rolling stock", JSC "VNIIZhT"

Received 30.11.2016

Accepted 27.01.2017

■ E-mail: s_brz@mail.ru (A. M. Brzhezovskiy)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Коган А. Я., Загитов Э. Д., Полещук И. В. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава. М.: ООО «РАС», 2016. 208 с.

Изложены основные принципы формирования динамической системы, объединяющей в единое целое колеблющийся путь как систему с распределенными параметрами и железнодорожный экипаж как систему со многими степенями свободы. Представлена математическая модель взаимодействия пути и подвижного состава, разработанная на основе методов теории случайных функций и теории вероятности.

Берент В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). М.: ООО «АНАЛИТИКА РОДИС», 2016. 328 с.

Рассмотрены процессы, протекающие в материалах сильноточного скользящего контакта при их взаимодействии, а также свойства различных электротехнических медных сплавов применительно к проводам контактной сети электрифицированных железных дорог. Проведена классификация дефектов и повреждений контактных проводов и токосъемных элементов ползцов токоприемников в эксплуатации. Показана перспективность использования нанотехнологии для изготовления проводов и токосъемных элементов ползцов из медных дисперсно-упрочненных композитов

Приведены модель взаимодействия колеса и рельса при качении, аналитический метод построения кривых кривизны, метод оценки вибраций пути под проходящим поездом неограниченной длины, сформированным из однотипных экипажей, методы оценки сопротивления движению поездов.

Книга предназначена для научных работников железнодорожного транспорта, может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

и сделано технико-экономическое обоснование целесообразности использования новых разработок.

Книга предназначена для использования в работе специалистами служб электрификации и локомотивного хозяйства ОАО «РЖД», а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книг ученых АО «ВНИИЖТ» обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел.

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.