нок обеспечивает снижение уровня неопределенности условий нагружения, формирующихся при взаимодействии колесных пар вагонов и рельсовой колеи, и оказывающихся общими для вагонов с любой схемой рессорного подвешивания.

Исследование динамических моделей, представленных на рис. 1, позволяет получить передаточные функции для нагрузок, воздействующих непосредственно на рамы вагонов, и обеспечить получение достоверной информации об эксплуатационных нагрузках, обусловленных колебанием вагонов при их движении.

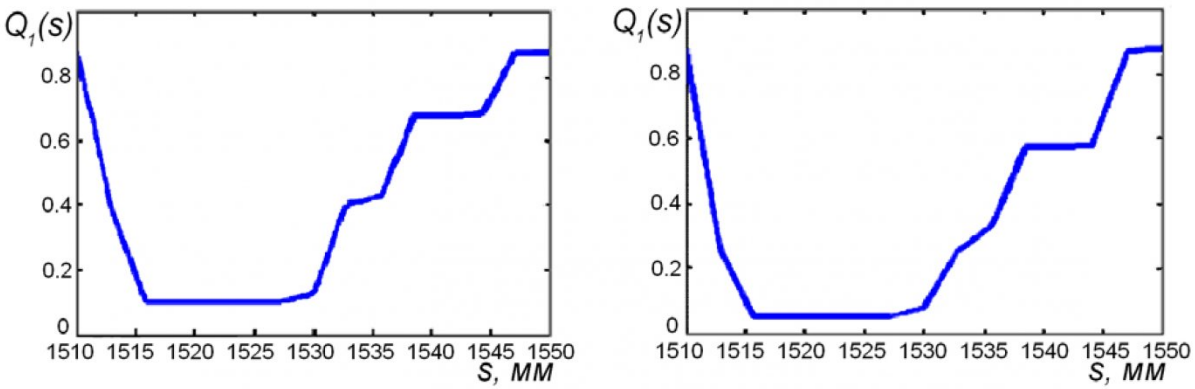

Рис. 2. Функции $Q_1(s)$, отражающие знания двух различных экспертов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

2 *Быков Б.В.* Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов. – М.: Маршрут, 2004. – 36 с.

Авторы статьи:

Донцова
Татьяна Валентиновна,
канд. техн. наук, доц. каф. автоматизации производственных процессов в металлургии Института цветных металлов и материаловедения (Сибирский федеральный университет).
e mail: 707atv@mail.ru

Доронин
Сергей Владимирович,
канд. техн. наук, доц., зав. отделом живучести конструкций технических систем (Специалное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН).
e mail:: s.doronin@gmail.com

Герике
Борис Людвигович
докт. техн. наук, проф. каф. горных машин и комплексов КузГТУ
e mail: gbl_42@mail.ru

УДК 629.4.023.11 + 625.111

С.В. Доронин, Т.В. Донцова, Б.Л. Герике

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ НА РАМЫ ВАГОНОВ

Высокие характеристики прочности, надежности, ресурса вагонов различного предназначения, габаритов, грузоподъемности, являющихся массовой продукцией транспортного машиностроения, относятся к важным факторам как обеспечения безопасности движения, так и повышения технико-экономических показателей предприятий, пользующихся услугами железнодорожного транспорта.

Визуальный и инструментальный контроль технического состояния думпкаров, как одного из наиболее распространенных типов грузовых вагонов, позволил установить, что рамы значительной части парка подвижного состава содержат трещиноподобные дефекты или следы их устранения с последующим усилением ремонтными заплатами (рис. 1). Это свидетельствует о нерешенности проблемы прочности несущих конструкций вагонов и актуальности исследований, направленных на установление и устранение причин трещинообразования и снижения надежности и безопасности подвижного состава.

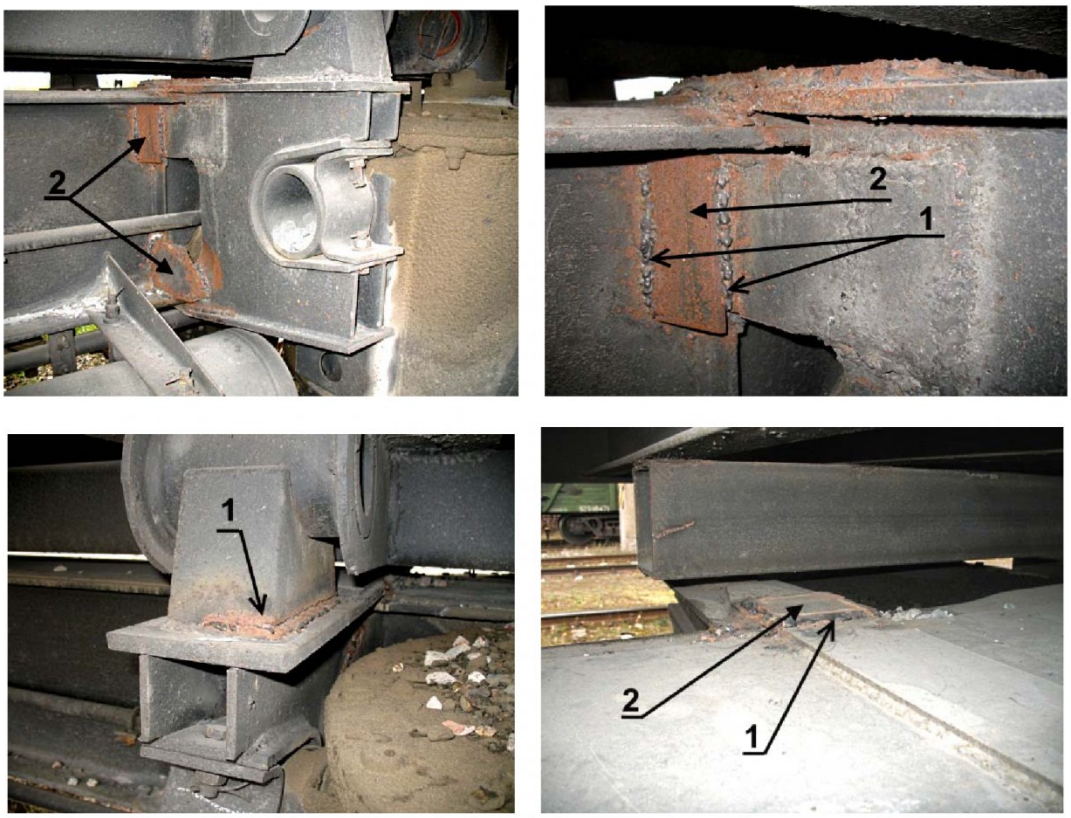

Рис. 1. Примеры устранения трещиноподобных дефектов в рамах думпкаров: 1 – сварной шов; 2 – ремонтная заплата

Следует отметить, что в течение последних десятилетий были проведены значительные теоретические и экспериментальные обоснования конструктивных решений и статической прочности несущих рам подвижного состава, обобщенные в ряде монографий, нормативных документов, учебной литературе [1-3]. Разработаны методы расчетов конструкций, основанные на аналитических моделях и методах механики деформируемого твердого тела и обеспечивающие для отдельных конструктивных схем приемлемый уровень точности расчетов. Современные численные методы расчета конструкций позволяют повысить этот уровень и распространить его на любые конструктивные схемы подвижного состава.

Математическое описание колебаний вагонов при движении и учет возникающих при этом нагрузок представляют собой самостоятельное на-

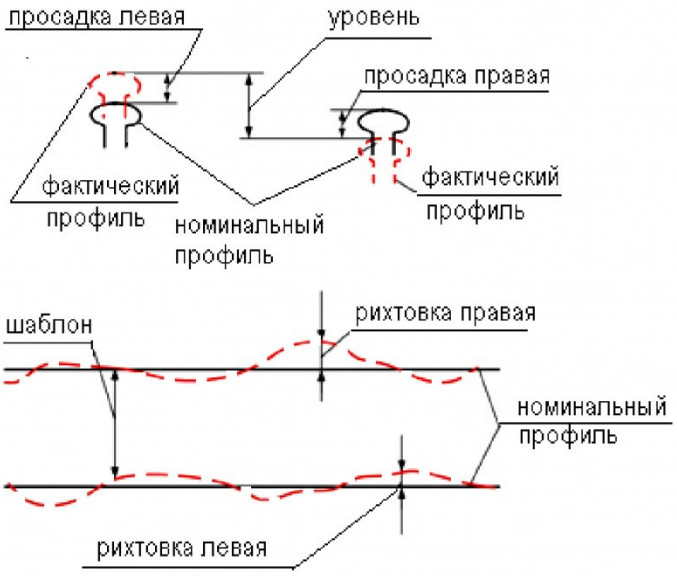

Рис. 2. Параметры отклонения рельсовой колеи от номинального профиля

правление исследований [4-5]. При этом значительная часть этих исследований посвящена дополнительным составляющим колебаний, связанных с неровностями и прочими несовершенствами железнодорожной колеи [6-8].

Таким образом, имеются хорошо проработанные теоретические и методические подходы, позволяющие в достаточно полной мере учесть комплекс факторов, определяющих нагруженность конструкций вагонов. Проблема в невозможности на стадии проектирования вагонов прогнозировать и учитывать все многообразие отклонений рельсовой колеи от ее номинального профиля, парировать эти отклонения соответствующими конструктивно-технологическими решениями. Другими словами, диапазон условий нагружения вагонов практически всегда оказывается шире предполагаемого на стадии проектных расчетов.

В этом случае очевидным выходом оказывается ограничение эксплуатации подвижного состава при регистрируемых путеизмерительными вагонами отклонениях рельсовой колеи от ее номинального профиля, превышающих предусмотренные на этапе проектирования (Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности поездов (утв. МПС РФ 14.10.1997 № ЦП-515), Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути (утв. МПС РФ 01.07.2000 № ЦП-774)). Технологически это ограничение осуществляется следующим образом. Фактическое состояние рельсовой колеи характеризуется шестью параметрами (шаблон, рихтовка левая и правая, уровень, просадка левая и правая), полностью описывающими ее отклонение от номинального профиля (рис. 2). Количественные значения этих параметров выражаются в условных единицах (баллах), по накопленному количеству которых принимается решение о возможности, ограничении или прекращении движения вагонов на рассматриваемом участке пути.

В работе предлагается более информативный подход, позволяющий связать фактическое состояние и существующую балльную систему оценки отклонений рельсовой колеи с прогнозными оценками прочности и ресурса несущих рам вагонов. Установление этой взаимосвязи требует решения комплекса задач (см. табл.), исходными данными для которых являются результаты регистрации значений шаблона, рихтовок, уровня, просадок путеизмерительными вагонами. Первичная обработка этих данных заключается в установлении законов распределения значений указанных шести параметров отклонения рельсовой колеи от номинального профиля на рассматриваемом участке железнодорожного пути.

Таким образом, устанавливается влияние неровностей рельсовой колеи на снижение ресурса рамы думпкара. Решение большинства задач трудоемко, требует длительного времени и не может быть осуществлено оперативно в местах измерений. В связи с этим отдельные группы этих задач целесообразно решать на базе экспертных знаний с использованием аппарата нечетких множеств.

Для этого введены четыре входные лингвистические переменные («степень отступления шаблона», «степень отступления просадки», «степень отступления уровня», «степень отступления рихтовки»), значения и функции принадлежности которых определены с учетом принятой в нормативных документах МПС (Министерства путей сообщений) балльной системы оценки отклонений рельсовой колеи от номинального профиля. Выходной лингвистической переменной является «дополнительная нагрузка», принимающая значения в диапазоне от 0 до 1.

С использованием этих лингвистических переменных сформулирована система правил вида «если степень отступления…» = «значение», то «дополнительная нагрузка» = «значение», применение которых позволило построить зависимости вида (на примере дополнительных нагрузок, возникающих вследствие отклонения шаблона от номинального значения 1520 мм)

$$Q_1 = f_1(s) = \begin{cases} -0{,}14 \cdot s + 212{,}28; & 1510 \le s \le 1513{,}5; \\ -0{,}17 \cdot s + 257{,}68; & 1513{,}5 < s \le 1515{,}1; \\ 0{,}12; & 1515{,}1 < \mathrm{s} \le 1530; \\ 0{,}098 \cdot s - 149{,}82; & 1530 < s \le 1535{,}1; \\ 0{,}62; & 1535{,}1 < s \le 1544{,}9; \\ 0{,}87 \cdot s - 1389{,}8; & 1544{,}9 < s \le 1545{,}2; \\ 0{,}88; & 1545{,}2 < s \le 1550, \end{cases}$$

где s – фактическое значение шаблона с учетом отклонения от номинального значения 1520 мм.

Далее эти зависимости используются при имитационном моделировании движения вагона по рельсовой колее. Основными блоками алгоритма моделирования являются:

1) генерация в рамках методологии Монте-Карло последовательностей псевдослучайных чисел в соответствии с определенными по статистическим данным распределениями фактических отклонений шаблона, рихтовки, уровня, просадки от номинальных значений. Эти последовательности следует рассматривать как смоделированный профиль рельсовой колеи на участке железнодорожного пути заданной длины, подчиняющийся тем же статистическим закономерностям, что и исходный участок рельсовой колеи;

2) сгенерированные значения шаблона s, правой r_r и левой r_l рихтовки, уровня u, правой p_r и левой p_l просадки на каждом шаге моделирования (соответствующем участку пути единичной длины) используются для вычисления дополнительных нагрузок, вызываемых отклонениями рельсовой колеи от номинального профиля: $Q_1=f_1(s)$; $Q_2=f_2(r_r; r_l)$; $Q_3=f_3(u)$; $Q_4=f_4(p_r; p_l)$;

3) экспертная оценка совместного влияния

Задачи моделирования рам думпкаров при движении по рельсовой колее с несовершенствами

Физико-технический процесс, явление, зависимость	Моделирование
Рельсовая колея в силу несовершенств отклоняется от идеальной траектории. В каждой точке по длине l колеи эти отклонения описываются набором параметров $\{X_i\}$, которые являются функцией длины (координаты точки по длине колеи) $\{X_i\}=f(l)$. Для определенной скорости поезда их можно рассматривать как функцию времени $\{X_i\}=f(t)$.	Генерация по установленным статистическим распределениям случайных параметров как функции времени $\{X_i\}=f(t)$; X_1 – шаблон; X_2, X_3 – рихтовка левая и правая; X_4 – уровень; X_5, X_6 – просадка левая и правая.
Набор параметров $\{X_i\}$ в каждой точке рельсовой колеи (т.е. в каждый момент времени при движении поезда) создает дополнительные усилия на колеса $\{F\}=f(t)$ (дополнительно к вертикальным реакциям рельсов вследствие действия силы тяжести вагона и груза).	Составление и решение уравнений равновесия и оценка системы сил $\{F\}=f(t)$.
Эти силы $\{F\}=f(t)$, трансформируясь через систему «колесная пара – тележка – подвеска – рама», создают дополнительные нагрузки $\{Q\}=f(t)$ на раму думпкара.	Моделирование динамической расчетной схемы (ее передаточной функции) и оценка дополнительных нагрузок $\{Q\}=f(t)$ на раму думпкара.
Комплекс основных и дополнительных $\{Q\}=f(t)$ нагрузок на раму думпкара определяет характеристики ее напряженно-деформированного состояния (НДС).	Серия конечно-элементных расчетов НДС и установление зависимости приращения характеристик НДС от дополнительных нагрузок $\{Q\}=f(t)$.
При возросших из-за дополнительных нагрузок $\{Q\}=f(t)$ параметрах НДС интенсифицируются процессы усталости металла и зарождения трещин в рамах думпкаров.	Моделирование накопления усталостных повреждений с использованием корректированной линейной гипотезы и прогноз ресурса рамы.

комплекса дополнительных нагрузок $\{Q\}$ на снижение усталостной прочности и ресурса несущих конструкций вагона на участке пути рассматриваемой длины.

В конечном итоге выполняется оценка повреждающего действия участка рельсовой колеи фактического профиля, что является основой принятия решения о возможности, ограничении или прекращении движения вагонов на участке пути.

Рассматриваемый подход практически реализован в среде пакета MATLAB и апробирован при обработке результатов измерения фактического профиля рельсовой колеи железнодорожного пути на перегоне Красноярск-Дивногорск с использованием компьютеризированного путеизмерительного вагона-лаборатории КВЛ-П1М. По результатам оценки влияния комплекса дополнительных нагрузок $\{Q\}$ на снижение усталостной прочности и ресурса на этом перегоне выделены 9 участков, из которых два признаны безопасными, два аварийно опасными, а пять – к требующим снижения скорости для недопущения значительной интенсивности накопления повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский [и др.]. Под ред. Л.А. Шадура. – М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.

2. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

3. *Александров, Е.В*. Конструирование и расчет вагонов: Методические указания к выполнению контрольных работ и курсового проекта / Е.В. Александров, Г.П. Волошко. – Самара: СамГАПС, 2004. – 40 с.

4. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / А.А. Хохлов [и др.]. – М.: МИИТ, 2001. – 160 с.

5. Нагруженность элементов конструкции вагона / В.Н. Котуранов [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.

6. *Гойхман, Л.В.* Исследование возмущающих факторов рельсового пути и их влияния на вертикальные колебания экипажа. Автореферат на соискание ученой степени канд.техн.наук, М., 1968. – 16 с.

7. Теоретические исследования движения вагона высокоскоростного электровоза по пути с геометрическими неровностями / А.А. Львов [и др.]. – К.: Наукова думка, 1973. – 256 с.

8. *Грачева, Л.О.* Взаимодействие вагонов и железнодорожного пути: Вынужденные колебания вагонов. – М.: Транспорт, 1968. – 160 с .

Авторы статьи:

Доронин
Сергей Владимирович,
канд. техн. наук, доцент, зав. отделом живучести конструкций технических систем (Специальное конструкторско -технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН).
e mail: s.doronin@gmail.com

Донцова
Татьяна Валентиновна,
канд. техн. наук, доц. каф. автоматизации производственных процессов в металлургии Института цветных металлов и материаловедения (Сибирский федеральный университет). e mail: 707atv@mail.ru

Герике
Борис Людвигович,
докт. техн. наук, проф. каф. горных машин и комплексов КузГТУ
e mail: gbl_42@mail.ru