

УДК 535.55, 625.033

ОПТИЧЕСКАЯ ТЕНЗОМЕТРИЯ В ЗАДАЧЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСО—РЕЛЬС

© В. Н. Федоринин¹, С. А. Бехер², В. С. Выплавень², В. И. Сидоров¹,
А. Н. Байбаков³, С. В. Плотников³

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,

630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8

²Сибирский государственный университет путей сообщения,

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

³ООО «Сибирский центр транспортных технологий»,

630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41а

E-mail: fedorinin55@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований деформации рельса, находящегося под силовым воздействием движущегося железнодорожного транспорта. Исследования выполнены с применением высокочувствительного датчика деформации с предельным уровнем относительной деформации $2 \cdot 10^{-7}$. Анализируются возможности оптической тензометрии для решения задачи мониторинга технического состояния ходовых частей вагонов и верхнего строения пути.

Ключевые слова: тензометрия, фотоупругость, деформация рельса, потенциальная энергия, поверхность катания.

DOI: 10.15372/AUT20230305

Введение. Взаимодействие колеса и рельса является основополагающим физическим процессом при движении железнодорожного транспорта [1, 2]. От колеса подвижного состава на путь передаётся сложное силовое воздействие, которое раскладывается на вертикальные и горизонтальные составляющие, вызывающие осадку пути и изгиб рельсов; боковую нагрузку, стремящуюся сдвинуть путь в сторону; продольные силы, которые являются причиной продольного смещения рельсошпальной решётки [3, 4].

Необходимость увеличения объёма грузоперевозок и уменьшения эксплуатационных затрат ставит на первое место задачу снижения уровня напряжений, возникающих при взаимодействии колеса и рельса. Об актуальности данной темы говорит тот факт, что исследования в этом направлении координируются программами обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте [5–11]. Например, в странах Северной Америки таким координатором выступает комитет по управлению и обеспечению безопасности эксплуатационного процесса «Ассоциация американских железных дорог», в сферу интересов которой входят вопросы стандартизации различных параметров технических средств, обеспечивающих безопасность движения поездов.

В Российской Федерации исследования динамического взаимодействия колесо—рельс и внедрение мониторинга технического состояния ходовых частей вагонов и верхнего строения пути координируются Объединённым учёным советом ОАО «РЖД». Специалистами АО «ВНИИЖТ», АО «ВНИИКТИ», АО «НИИАС» и ведомственными университетами выполнен большой объём теоретических и экспериментальных исследований по данной теме [12–16].

Основным методом измерения вертикальных и горизонтальных сил является тензометрия, где ведущее положение занимают тензорезистивные датчики [17, 18]. Проблема применения тензорезистивных способов измерения деформации на эксплуатируемых

участках пути связана с технологической сложностью монтажа и высоким уровнем электромагнитных помех, возникающих при прохождении грузового состава, что ограничивает чувствительность и точность измерений деформаций и влияет на достоверность результатов.

Цель проводимых исследований — определение возможности применения оптической тензометрии в решении задач мониторинга технического состояния ходовых частей вагонов и верхнего строения пути. Исследования направлены на развитие методов контроля и автоматизации процессов обнаружения дефектов поверхности катания колёсных пар.

В основе способов контроля поверхности катания колеса лежат вероятностно-статистические методы, основанные на регистрации первичных сигналов с установленных на рельсах датчиков и выделении в них возмущений, вызванных дефектами. Степень опасности дефекта оценивают по экспериментально измеренным корреляционным зависимостям амплитудных и временных характеристик возмущающих сигналов от размеров дефектов и степени их негативного воздействия на работу системы колесо—рельс.

Схема и результаты экспериментальных исследований. Исследования распределения деформаций рельса под поездной нагрузкой проводились методом тензометрии на действующем участке пути Крахаль—Инская ЗСЖД. Измерения деформаций выполнялись оптико-поляризационными тензометрическими датчиками [19, 20], общий вид которых представлен на рис. 1, *a*. Принцип действия основан на эффекте фотоупругости.

Данный эффект применяется в экспериментальной механике при моделировании и изучении деформационных полей, возникающих в сложных конструкциях и инженерных сооружениях. Чувствительным элементом датчика служит плавленный кварц. Система регистрации обеспечивает измерение фазовых искажений в чувствительном элементе, вызванных наведённой анизотропией, на уровне 10^{-4} рад.

Определение коэффициентов преобразования датчиков осуществлялось на установке (рис. 1, *b*). Коэффициент преобразования k связывает изменения базы датчика L на величины δL , вызванные деформацией стальной пластины при действии определённой нагрузки, с изменением цифрового сигнала в системе регистрации S , выраженного в условных

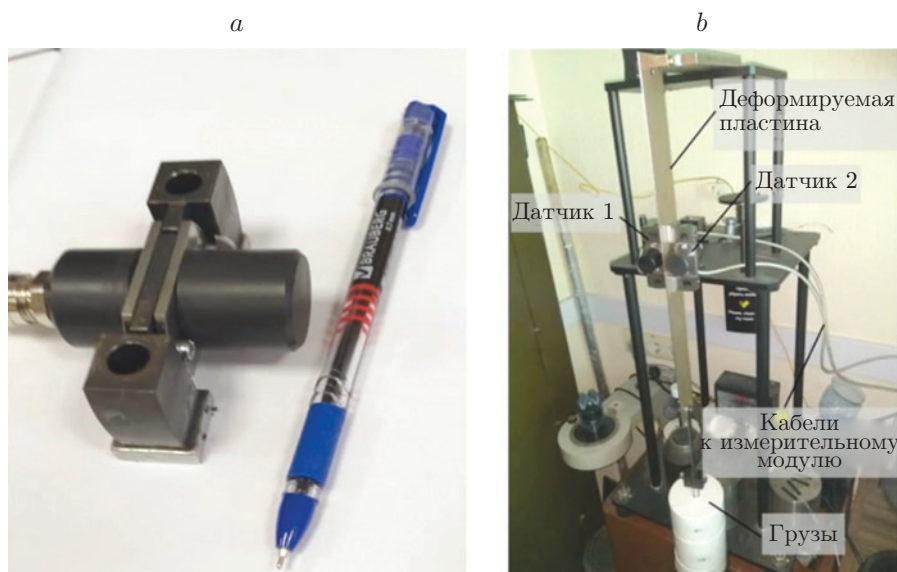


Рис. 1. Оптико-поляризационный тензометрический датчик: *a* — общий вид; *b* — установка тарирования датчиков с магнитным креплением

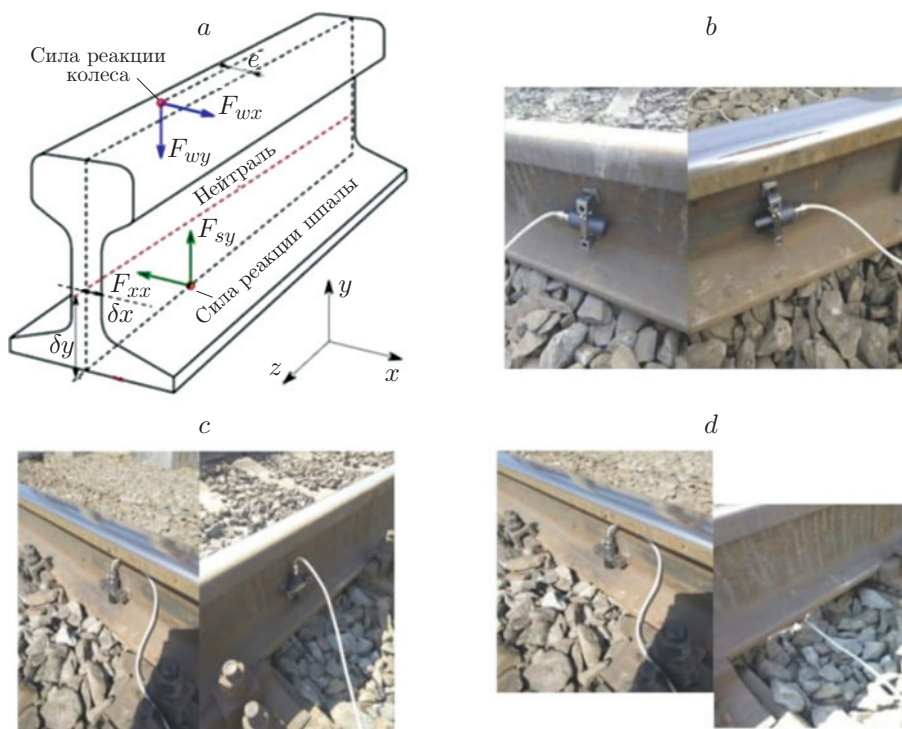


Рис. 2. Иллюстрация проведения эксперимента: *a* — схема приложения сил и точек измерения деформаций рельса; *b*, *c*, *d* — схемы установки и ориентации датчиков в экспериментах

единицах (у. е.). Коэффициент преобразования вычислялся по формуле

$$k = \delta L / S. \quad (1)$$

Значение перемещения δL определялось по формуле

$$\delta L = mL / EG, \quad (2)$$

где m — масса груза; G — площадь сечения пластины; E — модуль упругости.

В представленной работе применялись датчики с коэффициентами преобразования $k_1 = 8 \cdot 10^{-4}$ мкм/у. е. и $k_2 = 12,8 \cdot 10^{-4}$ мкм/у. е. Значение среднеквадратического отклонения шумовой составляющей сигнала датчиков в полосе до 500 Гц составляло 10 и 12 у. е. соответственно. Уровень предельного значения обнаружения относительной деформации в полосе до 500 Гц составлял $\delta L / L = 1,6(2,0) \cdot 10^{-7}$.

На рис. 2, *a* представлена схема действия внешних сил на рельс. Силы взаимодействия колеса и рельса лежат в плоскости его поперечного сечения YOX на расстоянии e от нейтральной линии. Нормальная сила от колеса F_{wy} ориентирована нормально пятну контакта, боковая сила F_{wx} лежит в плоскости пятна и перпендикулярна продольной оси рельса, силы реакции опор также имеют две компоненты: нормальную F_{sy} и боковую F_{xx} . Интерпретация результатов проводилась в рамках следующей аналитической модели.

Железнодорожный путь является статически неопределённой системой, при анализе которой необходимо учитывать не только воздействие внешних сил и граничных условий в виде реакции подрельсового основания, но и накапливаемую энергию деформации системы. В рамках энергетического подхода работа внешних сил не исчезает, а преобразуется в потенциальную энергию U упругодеформируемого тела. Эта потенциальная

энергия численно равна работе внешних сил при нагружении тела или работе внутренних сил, совершаемой ими в процессе разгрузки [21]:

$$U = \frac{1}{2} \sum_i \sum_k \int_0^{l_i} \frac{D_{i,k}^2}{C_{i,k}} dl_i, \quad (3)$$

где $D_{i,k}$ — обобщённый внутренний силовой фактор в k -м направлении и в сечении i -го участка длиной l_i с жёсткостью $C_{i,k}$.

Потенциальная энергия упругой деформации рельса под проходящим поездом рассматривается как сумма потенциальных энергий, обусловленных работой сил сжатия и изгибающих моментов в плоскостях ZOY , ZOX и YOX :

$$U_p = U_f + U_{M_x} + U_{M_y} + U_{M_z}. \quad (4)$$

В соответствии с теоремой Кастильяно результирующее значение обобщённого перемещения представляет собой сумму перемещений, вызванных действием нормальных сил и возникающих при эксцентриситете их приложения, скручивающих и изгибающих моментов:

$$\Delta_p = \frac{\partial U_p}{\partial F} = \frac{\partial U_f}{\partial F} + \frac{\partial U_{M_x}}{\partial F} + \frac{\partial U_{M_y}}{\partial F} + \frac{\partial U_{M_z}}{\partial F} = \Delta_f + \Delta_{M_x} + \Delta_{M_y} + \Delta_{M_z}. \quad (5)$$

Перемещение Δ_f обусловлено действием нормальных сил N и определяется соотношением

$$\Delta_f = \varepsilon_1 L = \frac{NL}{Es}, \quad (6)$$

где ε_1 — относительные деформации рельса; s — площадь поперечного сечения.

Воздействие изгибающих моментов M_x , M_y , M_z вызывает угловые смещения Q_{yz} , Q_{xz} , Q_{xy} соответственно. Измеряемые датчиком линейные перемещения Δ_{M_x} , Δ_{M_z} связаны с угловым смещением

$$\Delta_{M_x} = \varepsilon_2 L = \frac{L}{\rho_{yz}} \delta y = \frac{M_x L}{EI_x} = Q_{yz} \delta y, \quad (7)$$

где ε_2 — относительные деформации рельса; I — момент инерции поперечного сечения рельса по отношению к нейтральной линии; ρ_{yz} — радиус кривизны рельса; δy — расстояние от нейтральной линии до точки измерения деформаций.

Установка датчиков с применением магнитного крепления обеспечивала оперативность измерений. В эксперименте проводились измерения деформации шейки рельса в поперечном направлении (рис. 2, *b*), в продольном направлении (рис. 2, *c*) и одновременно в продольном направлении на шейке рельса и подошвы рельса (рис. 2, *d*).

Определение значения обобщённой деформации зависит от способа установки датчика. Так, при установке датчика на шейке рельса (см. рис. 2, *b*) (плоскость XOY) значение измеряемой обобщённой деформации Δ_{p1} есть результат деформации сжатия и деформации, вызванной действием момента в плоскости XOY : $\Delta_{p1} = \Delta_f + \Delta_{M_x}$.

Ориентация базы датчиков направлена параллельно оси OZ (см. рис. 2, *c*, *d*), значение обобщённой деформации $\Delta_{p2} = \Delta_{M_y} + \Delta_{M_x}$.

Результаты измерения деформаций рельса под проходящим поездом в плоскости XOY (плоскость поперечного сечения рельса) показывают, что по отношению к нормальному

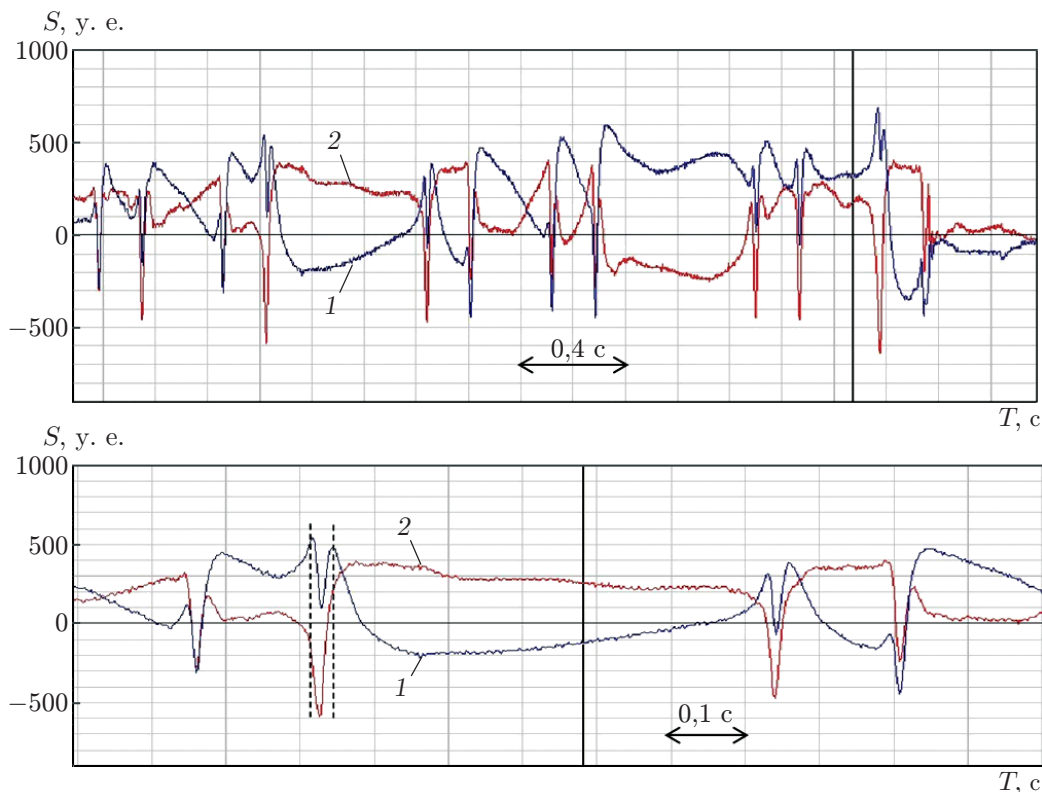


Рис. 3. Диаграммы поперечных деформаций шейки рельса под проходящим составом при установке датчиков как на рис. 2, *b*

состоянию (начальной фазе движения $U_p = 0$) деформации в точке наблюдения имеют знакопеременное значение, зависят от положения колёсной пары относительно точки наблюдения. Значения обобщённой деформации, измеряемой датчиками, можно записать как $\Delta_{p1} = \Delta_f + \Delta_{Mz}$ (кривые 1), $\Delta_{p1} = \Delta_f - \Delta_{Mz}$ (кривые 2) (рис. 3). Выделенный на диаграмме 1 участок Δ_f характеризует область или длительность действия (при движении поезда) сил сжатия.

На рис. 4, *a*, *b* представлены фрагменты диаграммы изменения обобщённой деформации Δ_{p2} при установке датчиков как на рис. 2, *c*, *d* соответственно.

Диаграмма 1 (см. рис. 4, *a*) иллюстрирует расположение датчика на внешней стороне шейки рельса ($\delta x \neq \delta y \neq 0$), а диаграмма 2 — на внутренней стороне шейки рельса (см. рис. 2, *c*). Диаграммы изменения обобщённой деформации шейки рельса под проходящим составом, измеренной датчиками, определяются $\Delta_{p2} = \Delta_{Mx} + \Delta_{My}$ (кривая 1), $\Delta_{p2} = \Delta_{Mx} - \Delta_{My}$ (кривая 2) ($\delta x \neq \delta y \neq 0$).

Диаграмма 1 (см. рис. 4, *b*) иллюстрирует расположение датчика на внешней стороне шейки рельса ($\delta x \neq \delta y \neq 0$), а диаграмма 2 — на нижней части подошвы рельса ($\delta y \neq 0$, $\delta x = 0$).

Диаграмма изменения обобщённой деформации шейки рельса под проходящим составом, измеренная датчиком, установленным на подошве, имеет вид $\Delta_{p2} = \Delta_{Mx}$ (кривая 2).

Обсуждение результатов. Анализ экспериментальных результатов взаимодействия системы колесо—рельс, рассматриваемых в рамках модели импульсного ударного взаимодействия указывает на то, что нарушение поверхности катания колеса при движении приводит к разрыву контакта колесо—рельс (рис. 5). Разрыв контакта сопровождается освобождением накопленной энергии деформации рельса, где видно, что независимо от

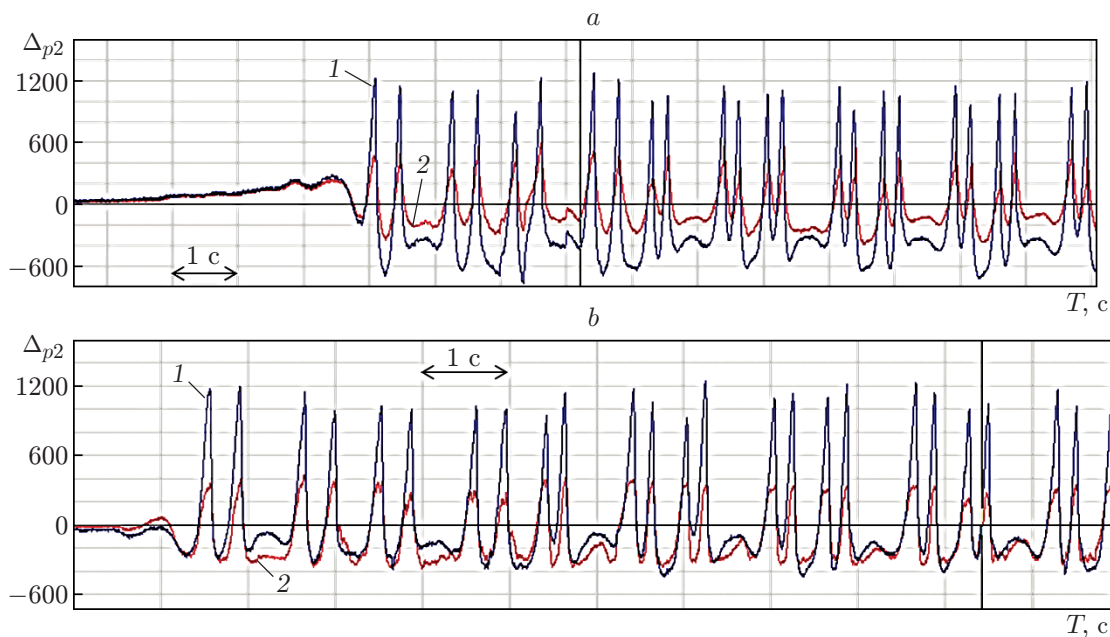


Рис. 4. Фрагменты диаграммы продольных деформаций шейки рельса под проходящим составом: *a* — датчики ориентированы как на рис. 2, *c*; *b* — датчики ориентированы как на рис. 2, *d*

области её возникновения, отрицательного или положительного значения уровня деформации относительно нормального состояния ($U_p = 0$) изменения её направлены в сторону снижения накопленной энергии.

На рис. 5 представлены фрагменты деформации подошвы рельса при прохождении грузового состава и отмечены участки, где наблюдаются изменения деформации, вызванные нарушением поверхности катания.

Численное значение амплитуды возмущающего воздействия, обусловленного дефектом поверхности катания, в значительной мере зависит от расстояния между точкой наблюдения и точкой взаимодействия дефекта с рельсом. Зонами неопределённости следует считать участки с высокой скоростью изменения деформации, которая связана с проходом колеса через шпалу. Данное условие накладывает определённые правила при установке датчиков и формировании измерительной линейки. Пороговый уровень дискретизации сигнала, обеспечивающий уверенное обнаружение дефекта, составляет ~ 200 у. е., или в пересчёте на перемещения 0,2 мкм (на базе 50 мм).

В процессе проведения эксперимента при установке датчика на подошве рельса в ряде случаев наблюдалось увеличение размаха амплитуды деформации по мере прохождения поезда (рис. 6).

Мы предполагаем, что механизм возникновения данного эффекта связан с изменениями упругих свойств основания полотна. В общем случае равновесное состояние системы можно представить уравнением

$$F_y + \Sigma F_{\text{осн}} + F_{\text{рельс}} = 0, \quad (8)$$

где F_y — действующая нагрузка; $\Sigma F_{\text{осн}}$, $F_{\text{рельс}}$ — упругая реакция основания полотна и рельса соответственно.

При прохождении поезда уменьшается упругая реакция основания (происходит продавливание). Для выполнения условия баланса (при постоянном значении F_y), чтобы ском-

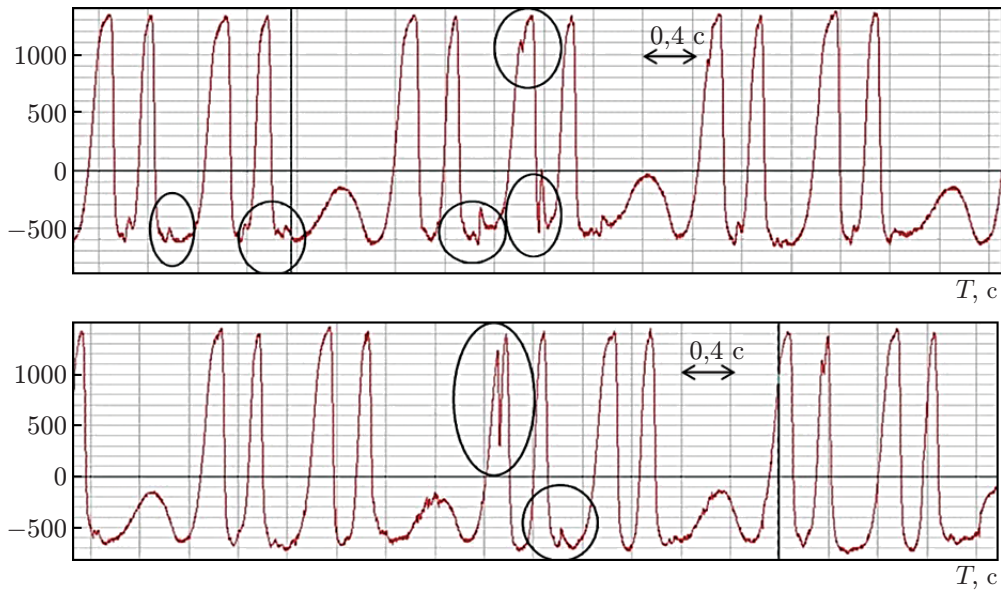


Рис. 5. Фрагменты деформации подошвы рельса при прохождении грузового состава (дефекты поверхности катания на разных участках состава)

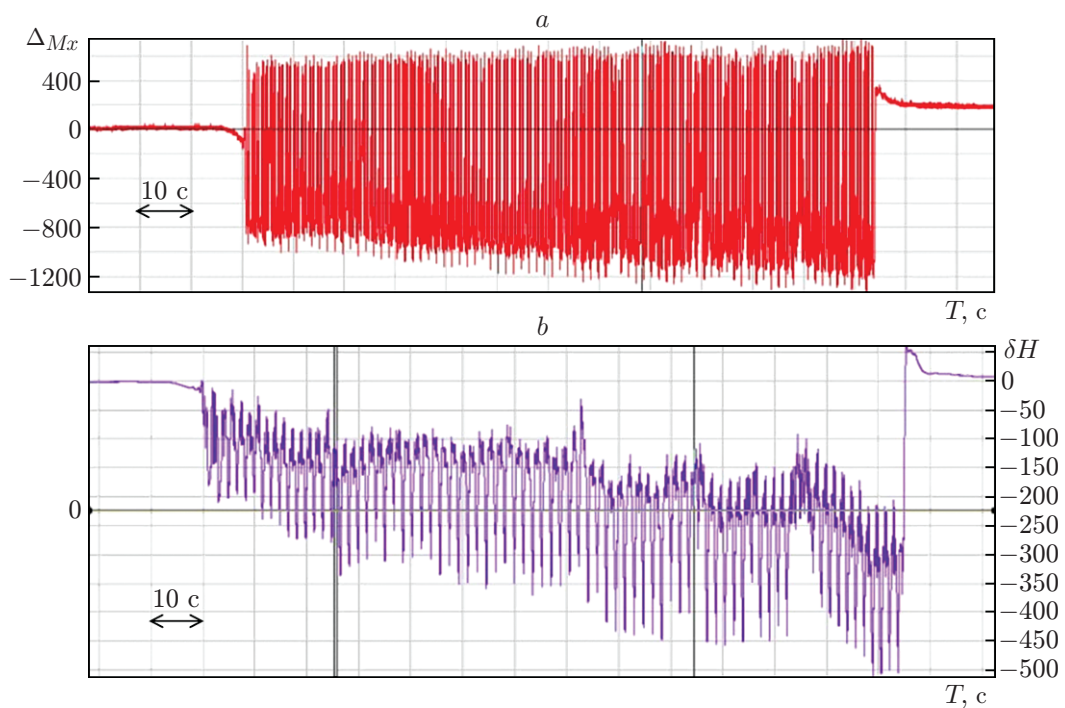


Рис. 6. Деформация подошвы рельса под проходящим поездом: *a* — экспериментальные данные деформации изгиба ΔM_x , *b* — расчетные значения изменения прогиба δH рельса

пенсировать снижение реакции полотна $\Sigma F_{\text{очн}}$, увеличивается упругая реакция $F_{\text{рельс}}$, приводящая к увеличению амплитуды деформации. В эксперименте величина прогиба подошвы рельса δH определялась по формуле

$$\delta H = \sum_i^{i+n} \partial h_i = \frac{1}{2 \delta y} \sum_i^{i+n} \Delta_{i Mz} V \partial t. \quad (9)$$

Дискретность измерений определяет минимальный временной интервал считывания ∂t и минимально дискретный измеряемый интервал $\partial z = V \partial t$, где V — скорость движения состава (время считывания в эксперименте составляет 0,002 с). Мгновенное значение изменения прогиба рельса

$$\partial h = \frac{\Delta_{Mz}}{2 \delta y} V \partial t. \quad (10)$$

Область суммирования значений задавалась длиной временного интервала при прохождении вагонной тележки. На рис. 6, b представлена диаграмма изменения величины прогиба δH по мере прохождения состава, скорость движения которого на всём отрезке была 29 км/ч.

Заключение. В рассматриваемой модели вектор действия силы колесо—рельс лежит в плоскости XOY , может меняться как по амплитуде, так и по направлению действия и в общем случае носит случайный характер. Изменения действия силы, вызванной дефектом поверхности катания, направлены параллельно оси OY . Эксперимент показал, что наиболее оптимальный вариант наблюдения деформации рельса (влияние других случайных факторов минимально) связан с измерением деформации прогиба подошвы рельса. Данная зона подвержена минимальным воздействиям боковых сил. Применяя в эксперименте высокочувствительные датчики, регистрирующие деформации на уровне $1-2 \cdot 10^{-7}$, удалось зарегистрировать влияние изменения реакции основания полотна на деформацию рельса.

Для экспериментальной проверки тензометрического метода измерения дефектов поверхности катания оптико-поляризационные датчики были смонтированы на перегоне Крахаль — Инская ЗСЖД и подключены к постовому оборудованию «Цифровая система контроля дефектов на поверхности катания колёс» («Развёртка-2»)[22, 23]. Измерительная линейка была собрана из четырёх датчиков, синхронизированных во времени. В режиме визуального просмотра сигналов с тензометрических датчиков выделялись участки с характерным возмущающим воздействием, которые могли быть обусловлены нарушениями поверхности катания. После прохода состава через измерительный участок производился визуальный осмотр состава в парке прибытия и при выявлении дефектов на поверхности катания происходил их замер.

Зафиксирована корреляция между наличием дефектов браковочного размера на колесе и наличием возмущения сигналов датчика на соответствующей оси, что позволяет утверждать о работоспособности метода на качественном уровне.

В условии равновесия сил, действующих в системе колесо—рельс, уравнение (8) показывает, что изменение реакции основания компенсируется упругой реакцией рельса, и это косвенно позволяет оценивать величину прогиба железнодорожного полотна.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области (проект № 23-29-10110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган А. Я. Воздействие на путь поездов, имеющих в своём составе вагоны с ползунами на колёсных парах // Вестн. НИИЖТ. 2014. № 3. С. 3–8.

2. **Гарипов Д. С., Кудюров Л. В.** Динамика вагонного колеса, имеющего ползун // Вестн. транспорта Поволжья. 2010. № 3 (23). С. 64–70.
3. **Акопян А. Г. и др.** Методика анализа состояния пути по динамическим показателям взаимодействия «колесо-рельс» // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 51–53.
4. **Бороненко Ю. П., Третьяков А. В., Рахимов Р. В. и др.** Мониторинг технического состояния железнодорожного пути с использованием метода непрерывной регистрации динамических процессов, возникающих при взаимодействии подвижного состава и пути // Бюлл. результатов научных исследований. 2021. № 3. С. 66–82. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-3-66-82.
5. **Jia S., Dhanasekar M.** Detection of rail wheel flats using wavelet approaches // Structural Health Monitoring. 2007. 6, Iss. 2. P. 121–131. DOI: 10.1177/1475921706072066.
6. **Bogdevicius M., Zygiene R., Bureika G., Dailydka S.** An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel–rail impact force caused by wheel flat // Vehicle System Dynamics. 2016. 54, Iss. 5. P. 689–705. DOI: 10.1080/00423114.2016.1153114.
7. **Nowakowski T., Komorski P., Szymanski G. M., Tomaszewski F.** Wheel-flat detection on trams using envelope analysis with Hilbert transform // Latin American Journ. Solids and Structures. 2019. 16, N 1. e148. DOI: 10.1590/1679-78255010.
8. **Fröhling R. D.** Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations—applying science and technology // Vehicle System Dynamics. 2007. 45, Iss. 7–8. P. 649–677. DOI: 10.1080/00423110701413797.
9. **Шобель А.** Напольные системы мониторинга подвижного состава: конференция во Франкфурте-на-Майне // Железные дороги мира. 2014. № 3. С. 51–59.
10. **Jing L., Han L.** Further study on the wheel–rail impact response induced by a single wheel flat: The coupling effect of strain rate and thermal stress // Vehicle System Dynamics. 2017. 55, Iss. 12. P. 1946–1972. DOI: 10.1080/00423114.2017.1340651.
11. **Yuqing Z., Geming Z., Yan Z., Weidong Y.** Linear state method for continuous measurement of wheel/rail vertical force on ground // China Rail. Sci. 2015. 36. P. 111–119. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2015.06.16.
12. **Гарипов Д. С., Кудюров Л. В.** Динамика вагонного колеса, имеющего ползун // Вестн. транспорта Поволжья. 2010. № 3(23). С. 64–70.
13. **Захаров С. М.** Контактно-усталостные повреждения колёс грузовых вагонов: труды. М.: Интекст, 2004. 160 с.
14. **Бржезовский А. М.** Методы экспериментальной оценки боковых сил (обзор) // Вестн. НИИЖТ. 2017. 76, № 1. С. 10–18.
15. **Локтев А. А., Сычева А. В.** Исследование динамических характеристик верхнего строения железнодорожного пути при динамическом воздействии // Наука и техника транспорта. 2013. № 4. С. 111–114.
16. **Бондарович Л. А., Шувалов А. Н., Сафина Л. Х.** Тензорезисторный метод в испытаниях инженерных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 6. С. 60–61.
17. **Буряк С. Ю.** Диагностирование состояния поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог // Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. Вып. 1, № 43. С. 22–29.
18. **Расщепкина Д. В., Зимакова М. В., Белобородов Д. В.** Разработка устройства приложения вертикальных и боковых сил на головку рельса для определения масштабов тензометрических схем измерения воздействия подвижного состава на путь // Транспорт Урала. 2020. № 4(67). С. 50–55. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-50-55.

19. **Пат. 2157513 РФ.** Эллипсометрический датчик /В. Н. Федоринин. Опубл. 10.10.2000.
20. **Датчик деформации.** URL: <http://datchikdeform.ru/> (дата обращения: 12.01.2023).
21. **Новацкий В.** Теория упругости. М.: Изд-во «Мир», 1975. С. 864.
22. **Байбаков А. Н., Гуренко В. М., Патерикин В. И. и др.** Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда // Автометрия. 2004. 40, № 5. С. 94–103.
23. **Чугуй Ю. В.** Трёхмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия. 2015. 51, № 4. С. 76–91.

Поступила в редакцию 12.01.2023

После доработки 27.01.2023

Принята к публикации 20.03.2023
