

Сходства и различия базовых подходов к вопросам взаимодействия колеса и рельса на отечественных и иностранных железных дорогах



А. Н. Антропов,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Вагоны» Уральского
государственного
университета путей
сообщения (УрГУПС),



Т. А. Антропова,
доцент кафедры
«Проектирование
и эксплуатация
автомобилей»
УрГУПС,



К. М. Колясов,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Вагоны» УрГУПС

В основе движения поезда по железной дороге лежит взаимодействие колес с рельсами. Именно физическая суть качения колеса по рельсу во многом определяет важнейшие технические и экономические параметры перевозочного процесса, скорость поездов и безопасность их движения.

В России, как и в других ведущих железнодорожных державах, регулярно проводятся семинары, симпозиумы и конференции по вопросам взаимодействия колес и рельсов. При этом в эксплуатации иностранных и российских железных дорог есть много существенных отличий, серьезно влияющих на подходы к решению задач контакта рельса с колесом и методы их оценивания.

1. За рубежом движение поездов зачастую осуществляется по однопутным специализированным линиям. В России же основные магистрали, как правило, выполнены сразу в виде двухпутных участков и рассчитаны на высокую грузонапряженность [1]. Однопутные линии задействованы в основном на менее загруженных направлениях. Поэтому на железных дорогах других стран параметры пути и технология его содержания устанавливаются в зависимости от конкретного типа подвижного состава, эксплуатирующегося на той или иной линии [2]. При этом наблюдается значительное разнообразие динамических характеристик, так как параметры пути могут не совпадать на разных линиях одного государства [3].

Даже в случае использования одних и тех же железнодорожных путей и для пассажирских, и для грузовых перевозок применяются однопутные участки. Если же рассматривать применение двухпутных линий, то они обустроены по габаритам однопутных (за исключением европейских железных дорог).

Данный принцип построения и эксплуатации путевой инфраструктуры при всех его технико-экономических недостатках сводит к минимуму вероятность попадания поезда на другой путь при его сходе с рельсов. В свою очередь это фактически исключает ситуацию столкновения с ним поезда, движущегося по соседнему пути.

Эти отличительные инфраструктурные особенности позволяют большинству иностранных государств устанавливать на своих железных дорогах менее жесткие требования к устройству и содержанию пути по сравнению с железными дорогами РФ и руководствоваться исключительно экономическими критериями оценки безопасности движения.

2. Обязательно следует учитывать существенные (иногда принципиальные) различия в конструкции тележек грузовых вагонов, эксплуатирующихся на железных дорогах, несмотря на применение одинакового термина, описывающего их структуру, — «трехэлементая». Выпускающиеся отечественными заводами тележки на базе модели 18–100 являются бесвязевыми со свободно устанавливаемыми колесными парами в рельсовой колеи. Считается, что обусловленные такой конструкцией горизонтальные перекосы боковых рам тележки не увеличивают воздействие колес на рельсы, а, наоборот, уменьшают угол набегания в кривых. Однако в противовес этой теории существуют и альтернативные точки зрения.

У грузовых вагонов, эксплуатирующихся за рубежом, в частности, в США,

боковые рамы тележки обычно жестко связаны между собой [4]. В этом случае радиальное положение колес относительно рельсов при движении в кривых обеспечивается применением в конструкции тележки дополнительных устройств принудительной установки колесных пар. Кроме того, в тележках иностранного производства более широко применяются различные буксовые адаптеры, которые зачастую выполняют функцию первичной ступени подвешивания, а также повышают жесткость боковин и связанность тележки. При этом тип и параметры адаптеров обусловлены грузоподъемностью конкретной модели вагона и другими его характеристиками.

3. Снижение удельного сопротивления движению и повышение ресурса рельсов и колес во многом определяется согласованностью профилей этих двух тел в зоне контакта [5]. На сети дорог России наблюдается значительное различие в подходах к применению профилей катания между локомотивным и вагонным хозяйствами.

Если локомотивщики используют свои профили бандажей, которых насчитывается несколько (наиболее часто применяющиеся — ДМЕТипР и профиль по ГОСТ 11018), то у вагонников принят единый профиль поверхности катания колеса, отличающийся от большинства профилей бандажей локомотивов.

При этом нельзя назвать его идеальным — работы по разработке и переходу к оптимальным конформным профилям потенциально способны увеличить ресурс колесных пар в несколько раз. В этом отношении необходимо признать достижения зарубежных железнодорожных компаний: полный переход к конформным профилям, а также широкое применение литых «одноразовых» колес (не подлежащих обточке в течение всего периода жизненного цикла), в частности, на дорогах Северной Америки, можно считать значительным продвижением в оптимизации взаимодействия рельсов и колес.

Несмотря на имеющиеся отличия в конструкции, технологиях эксплуатации, технического обслуживания подвижного состава и содержания инфраструктуры, ведущие специалисты России и ряда зарубежных стран сходятся во мнениях относительно определения основных задач в области контактирования рельсов и колес, а также в путях их решения [6–10]. Вот несколько общих, базовых принципов:

В процессе движения из-за неровностей пути и геометрических параметров колес на поезд действуют вертикальные и поперечные ускорения. Учитывая высокие нагрузки, передающиеся от элементов подвижного состава на рельсы, материалы рельса и колеса должны обладать высокой прочностью для обеспечения сопротивления динамическим реакциям в зоне контакта.

Необходимо учитывать неизбежное появление усталостных дефектов в зоне контакта [11]. Вероятность их возникновения и скорость развития должны быть как можно более низкими, чтобы своевременно выявлять такие дефекты и тем самым устранять угрозы для эффективности перевозочного процесса и безопасности движения поездов.

С целью обеспечения безопасности требуется постоянное улучшение технологии контроля технического состояния элементов инфраструктуры и подвижного состава с реализацией как конечной цели непрерывного их мониторинга в режиме реального времени в течение всей эксплуатации железных дорог и подвижного состава.

Улучшение характеристик пути (шпал и рельсовых скреплений, основания и балласта), а также усовершенствование колес и ходовых частей (включая рессорное подвешивание) подвижного состава необходимо проводить на основе комплексных всесторонних исследований, включающих в себя расчеты, моделирование и натурные эксперименты. Ярким примером может служить вопрос повышения твердости рельсов и колес [12], когда применение одностороннего подхода приводит к увеличению хрупкости металла и, соответственно, повышенному образованию трещин как в колесе, так и в рельсе.

В зоне контактирования рельса и колеса необходимо обеспечить одновременное выполнение двух противоречащих условий: с одной стороны, сцепление колес с рельсами должно быть максимально высоким, чтобы эффективно реализовать силы тяги и торможения, с другой, — трение в зоне контакта должно быть минимальным, чтобы обеспечить наименьшее сопротивление качению и минимизировать износ поверхностей в случае их скольжения относительно друг друга. Поскольку в качестве материалов контактирующих тел используется металл, обладающий минимальным демпфированием, то контакт «сталь по стали» позволяет по сво-

им характеристикам свести к минимуму деформации и колеса, и рельса при их взаимодействии.

Все перечисленные базовые тезисы сформированы по результатам исследований и опыта эксплуатации железных дорог России и других стран. Работы, направленные на улучшение материалов, конструкций, методов ремонта и технического обслуживания основаны на одних и тех же принципах. При этом сами направления исследований весьма разнообразны, что не зависит от принадлежности к тому или иному государству, а обусловлено главным образом специализацией (профилем исследований) тех или иных ученых и специалистов [13–17].

Еще одной особенностью контакта «сталь по стали» помимо низких демпфирующих характеристик и, как следствие, минимальной упругой деформации является незначительная по своим размерам площадь контактирования (что логично, учитывая параметры упругой деформации металла). В то время, как в автомобильном транспорте рост нагрузки влечет за собой увеличение размеров площадки контакта, на железных дорогах повышение нагрузки пропорционально увеличивает величину контактного напряжения.

Площадь контакта при этом увеличивается крайне незначительно и остается примерно равной площади небольшой монетки ($d = 12–13$ мм). Если рассматривать форму пятна контакта, то в идеальных условиях оно представляет собой эллипс, как показано на *рис. 1*.

В качестве примера можно рассмотреть грузовой поезд массой 10 тыс. т. Если допустить, что он состоит из груженных четырехосных вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось, то суммарная площадь поверхности контактирования колес с рельсами будет меньше 1 м^2 . Образно говоря, локомотив и более сотни нагруженных под завязку вагонов опираются на небольшой офисный стол размером $1,3 \times 0,7$ м. И это далеко не предел. Как показано на *рис. 1*, за счет объемного воздействия на металл колеса и рельса давления со стороны окружающих масс, он практически не имеет свободного направления для деформации. Как видно, «стрелки напряжения» направлены со всех сторон к элементам колеса и рельса, взаимодействующим между собой.

В результате металл оказывается в состоянии воздействия на него высокого объемного давления. Это можно охарактеризовать как «состояние объемного

напряжения» [18]. В данном положении металл рельса и колеса может выдерживать значительные нагрузки.

Физическая природа такого контактного взаимодействия открывает некоторые возможности дальнейшего прогресса. При совершенствовании конструкции рельсов и колес в части применения высокопрочных сталей возможна эксплуатация подвижного состава с осевыми нагрузками до 70 т и выше. Однако, рассматривая реальные условия эксплуатации, складывается совсем другая картина. На российских железных дорогах в настоящее время большинство вагонов имеет осевую нагрузку 23,5 т/ось. У некоторых так называемых инновационных вагонов она составляет 25 т/ось. При этом даже несмотря на относительно невысокие осевые нагрузки, взаимодействие колес с рельсами уже порождает в эксплуатации массу проблем.

Данное противоречие легко объясняется тем, что фактически условия идеального контакта (рис. 1) почти никогда не обеспечиваются при взаимодействии рельсов и колес в действительных условиях эксплуатации. Причины расхождения теории и практики различны, но можно выделить три самых распространенных фактора:

В зависимости от состояния пути и подвижного состава в результате их взаимодействия возникают различные по характеру и величинам динамические нагрузки, которые могут намного превосходить статические и, в свою очередь, служат причинами нарушения объемно-напряженного состояния рассматриваемой контактной пары вплоть до соударения колес с рельсами.

Идеальное объемно-напряженное состояние может быть нарушено силами трения, действующими поперек площадки контакта [19]. В этом случае напряжение в контактируемых поверхностях будет увеличиваться, но продолжать считать его объемным уже нельзя. Идиллическая картина также нарушается и при смещении контакта из центральной зоны, например, к краям поверхностей рельса (или, наоборот, смещается зона контакта на поверхности катания колеса).

Самым очевидным несовершенством реального взаимодействия рельсов и колес по сравнению с теоретическими идеальными условиями является фактическое пятно контакта. Размеры площадки контактирования практически никогда не совпадают с расчетными значениями, а сама форма пятна зачастую лишь отдаленно напоминает эллипс. Это объясняется тем, что в эксплуатации не встречается абсолютно новых, безупречных по своим геометрическим параметрам рельсов и колес (бандажей). В рассматриваемой паре «колесо — рельс» оба тела имеют отклонения от номинальных геометрических параметров, что приводит к значительному относительно проскальзыванию в зоне контакта. А это в условиях значительных объемных напряжений всегда приводит к ускоренному изнашиванию контактирующих поверхностей.

На рис. 2 в качестве причины динамических нагрузок показаны некоторые конструктивные и эксплуатационные факторы. Рельсовые стыки, волнообразный износ и другие дефекты (навары, ползуны, выщербины, деформации свар-

ного шва в соединении рельсов и пр.) приводят к повышенным динамическим (и зачастую ударным) нагрузкам [20].

К выкрашиванию металла головки рельса или появлению наклонных параллельных трещин может привести интенсивное контактное взаимодействие колеса в зоне основания гребня с рельсом в области рабочей выкружки (рис. 3). На этом примере показано, как изменение формы пятна контакта приводит к изменению объемно-напряженного состояния металла. В результате возникают повышенные контактные напряжения, которые приводят к появлению таких дефектов, как усталостные трещины и выкрашивание металла.

На рис. 4 показан вариант контактирования колеса с рельсом в зоне наивысшей точки его профиля. При таком контакте нельзя говорить об объемно-напряженном состоянии этих двух тел, так как металлу и рельса, и колеса есть куда смещаться под действием высоких контактных давлений.

Соответственно при превышении определенной величины напряжения упругая деформация перерастает в пластическую, а, значит, образуется такой дефект, как наплыв металла.

При вписывании ходовой части подвижного состава в рельсовую колею в кривых с определенными отклонениями от оптимальных параметров возможно возникновение поперечного проскальзывания колес. В результате микропроскальзывания поперечные силы (относительно площадки контакта) вызывают поверхностную и подповерхностную деформацию металла в зоне площадки контакта.

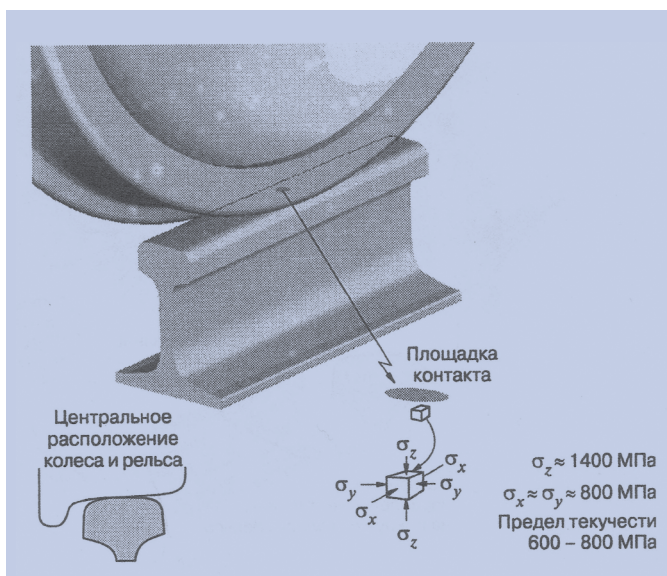


Рис. 1. Площадка контакта рельса с колесом

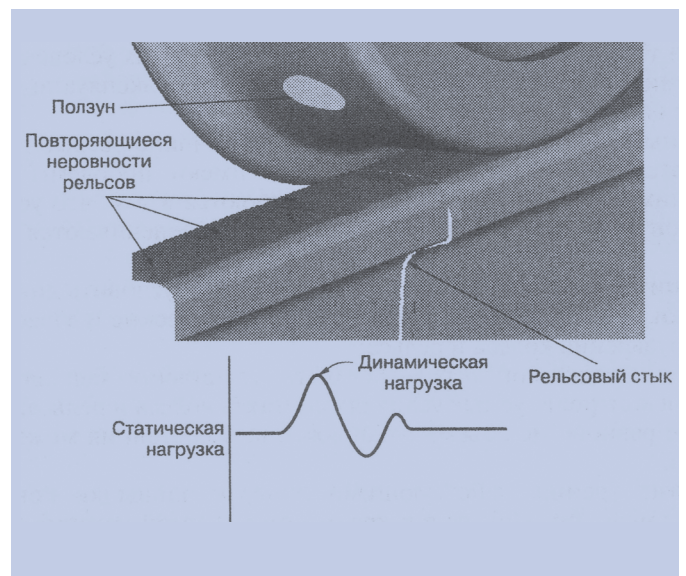


Рис. 2. Причины повышенных динамических нагрузок

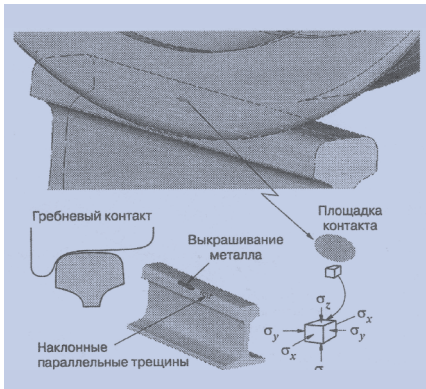


Рис. 3. Контактное взаимодействие колеса с рельсом в зоне основания гребня и выкружки

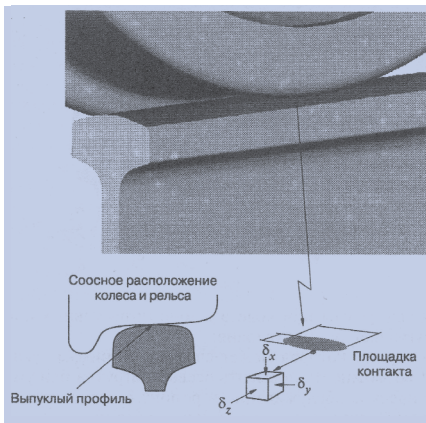


Рис. 4. Взаимодействие рельса с колесом в наиболее высокой точке профиля рельса

Изменение объемного напряженного состояния поверхностей приводит к пластической деформации и неравномерному износу поверхности катания колеса. Пластическая деформация рельса может выражаться в виде наплыва металла или же волнообразного износа рельсов, отличного по форме от наплыва, но имеющего ту же природу возникновения.

Таким образом, увеличение напряжений, переход от упругой деформации к пластической и, как следствие, возникновение контактно-усталостных дефектов в металле зачастую имеют общие причины: изменение формы площадки контакта или уменьшение ее размера.

Подводя итог анализа базовых подходов к вопросам взаимодействия рельсов и колес на отечественных и зарубежных железных дорогах, можно сделать вывод, что, несмотря на некоторые конструкционные, технологические и эксплуатационные различия, необходимость применения комплексного подхода к вопросам повышения эффективности и безопасности контактирования колеса с рельсом признается практически всеми ведущими организациями, институтами и специалистами мира.

При этом основные принципы взаимодействия рельсов и колес являются своего рода фундаментом, на котором необходимо выстраивать единую всеобъемлющую теорию контактирования.

Источники

1. Федорова В. И., Назаров И. В., Горский Д. В. Анализ состояния пути восточного полигона с применением цифрового грузового вагона V.1.0. в рамках оптимизации взаимодействия системы колесо-рельс // Сборник материалов конференции: II Международная конференция «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт». М., 2023. С. 275–283.
2. Huesmann H., Beck A. Система колесо-рельс с точки зрения путевого хозяйства // Железные дороги мира. 2005. № 10. С. 12.
3. Ehsan Evazzadeh. Influence of unsupported sleepers on the wheel-rail interaction // International Journal of Science and Engineering Applications. 2024. Pp. 40–43.
4. Kaiser I., Strano S., Terzo M., Tordela C. Anti-yaw damping monitoring of railway secondary suspension through a nonlinear constrained approach integrated with a randomly variable wheel-rail interaction // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 146. P. 107040.
5. Molatefi H., Mazraeh A., Shadfar M., Yazdani H. Advances in Iran railway wheel wear management: a practical approach for selection of wheel profile using numerical methods and comprehensive field tests // Wear. 2019. Vol. 426–427. Pp. 97–110.
6. Гаврилов Б. И., Воробьев А. А. Анализ исследований в области взаимодействия пары «колесо-рельс» // Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции «Инноватика в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития». Уфа, 2023. С. 228–236.
7. Scherbak P. N., Shapovalov V. V., Boiko N. I. et al. Interaction conditions improvement in the system «wheel-rail» // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 23. Pp. 11442–11447.
8. Сосновский Л. А., Сенько В. И. Проблема колесо – рельс с позиций трибофаттики // Железнодорожный транспорт. 2007. № 3. С. 38–44.
9. Keropyan A., Gorbatyuk S., Gerasimova A. Tribotechnical aspects of wheel-rail system interaction // International Conference on Industrial Engineering (ICIE

2017). 2017. Pp. 564–569. (Procedia Engineering).

10. Никитин Д. Н., Новачук Я. А. Анализ механизма взаимодействия системы «колесо-рельс» // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. № 2 (4). С. 26–29.
11. Butini E., Marini L., Meacci M. et al. An innovative model for the prediction of wheel-rail and rolling contact fatigue // Wear. 2019. Vol. 436–437. P. 203025.
12. Канаев А. Т., Молдахметова А. Е., Богомолов А. В. Оптимальное соотношение твердостей колесной и рельсовой стали, обеспечивающее минимальный износ пары трения «колесо-рельс» // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 8. С. 631–636.
13. Новачук Я. А., Никитин Д. Н., Тепляков А. Н., Коблов П. В. Актуализированная теория скорости взаимодействия колес с рельсами // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 1 (18). С. 16–23.
14. Six K., Meierhofer A., Müller G., Dietmaier P. Physical processes in wheel-rail contact and its implications on vehicle – track interaction // Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53. № 5. Pp. 635–650.
15. Оптимизация взаимодействия колес с рельсами // Железные дороги мира. 2020. № 10. С. 76–80.
16. Филиппов О. К. Проблема колесо-рельс: нерешенные вопросы // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 8–9.
17. 红军 刘. Influence of wheelset elastic vibration mode order on wheel-rail dynamic interaction of heavy-haul freight wagon // Dynamical Systems and Control. 2021. Vol. 10. № 02. Pp. 106–119.
18. Щербakov С. С., Насань О. А. Напряженно-деформированное состояние и объемная повреждаемость в окрестности контактного взаимодействия в трибофаттической системе колесо/рельс с учетом неконтактного деформирования рельса // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2016. № 1 (32). С. 234–247.
19. Zambrano O. A., Tressia G., Souza R. M. Failure analysis of a crossing rail made of hadfield steel after severe plastic deformation induced by wheel-rail interaction // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 115. P. 104621.
20. Мещерякова А. Р., Цуканов И. Ю. Влияние смятия в зоне сварных стыков рельсового пути на контактное взаимодействие в системе «колесо-рельс» // Трение и износ. 2022. Т. 43. № 2. С. 192–201.