

УДК 625.033

## Причины возникновения и развития дефектов рельсов в кривых на участках обращения поездов повышенной массы и длины

**А. А. Киселев, М. В. Бушуев, А. С. Гапоненко, Е. В. Черняев**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Киселев А. А., Бушуев М. В., Гапоненко А. С., Черняев Е. В. Причины возникновения и развития дефектов рельсов в кривых на участках обращения поездов повышенной массы и длины // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 45–59. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-45-59

### Аннотация

**Цель:** определение причин возникновения дефектов в рельсах на участках обращения поездов повышенной массы и длины через моделирование работы рельсов в кривых участках железнодорожного пути с помощью цифровых двойников. **Методы:** для исследования влияния различных факторов на износ рельсов в кривых участках пути использовались программные комплексы, основанные на численном решении дифференциальных уравнений движения подвижного состава и работы железнодорожного пути под поездом. Для определения напряжений в рельсах с целью прогнозирования развития дефектов контактно-усталостного характера был использован динамический расчет методом конечных элементов. **Результаты:** выявлено, что для уменьшения износа рельсов в кривом участке пути на участках с преимущественно грузовым движением, возвышение наружного рельса необходимо рассчитывать по фактически реализуемым скоростям движения грузовых поездов. Установлено, что на данный момент недостаточно изучено влияние величины подуклонки рельсов на износ рельсов. Как показал анализ положения рельсов при различных подуклонках, для рассматриваемой кривой наиболее целесообразно применять подуклонку  $1/30$  в пределах круговой кривой и с отводом подуклонки от  $1/20$  до  $1/30$  в пределах переходной кривой. Для уменьшения вероятности появления дефектов контактно-усталостного характера на таких участках обязательно предусмотреть выполнение мероприятий по лубрикации боковой рабочей грани наружной рельсовой нити и поверхности катания внутренней рельсовой нити в пределах всей кривой. **Практическая значимость:** результаты исследований указывают на необходимость пересмотра подхода к расчету возвышения наружного рельса в кривых с интенсивным грузовым движением поездов. Возможность продления срока службы рельсов за счет пересмотра системы планирования и реализации работ по лубрикации и шлифованию рельсов в кривых на участках обращения поездов повышенной массы и длины.

**Ключевые слова:** боковой износ, подуклонка рельсов, напряжения в рельсах, тяжеловесные и длинно-составные поезда, дефекты рельсов, взаимодействие колеса с рельсом

В современных условиях эксплуатации с учетом целевой задачи в обеспечении безотказной работы железнодорожного пути в межремонтном цикле (2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа) ставится вопрос управления процессом накопления остаточных деформаций железнодорожного пути и в его отдельных элементах. Управление этим процессом обеспечит четкое планирование

в обеспечении кадровыми и материальными ресурсами железнодорожной отрасли как флагмана развития промышленных производств, своевременного и полноценного удовлетворения в перевозке грузов от мест добычи до потребителя и (или) в порты страны.

Зачастую уменьшение пропускной и провозной способности железнодорожной линии связано с выявленными отступлениями от норм содержания рельсошпальной решетки в пространстве в результате интенсивной эксплуатации железнодорожного пути, усугубляющейся природно-климатическими условиями (годовая температурная амплитуда работы рельсов достигает 100 и более градусов Цельсия) и нередко сложным планом (наличие кривых малых радиусов) и профилем (затяжные подъемы и спуски) железнодорожной линии.

Вопрос работы железнодорожного пути в кривых участках не теряет своей актуальности и сегодня. Так, по данным заместителя генерального директора АО «ВНИИЖТ» по вопросам развития перевозочного процесса и логистики Михаила Мехедова [1], на Забайкальской железной дороге между станциями Шилка и Сковородино более 70% предупреждений об ограничении скорости до 15–25 км/ч было выдано для кривых участков пути, общая протяженность которых на заявленном перегоне составляла всего 30% от общей протяженности. Кроме того, в этих же кривых было выявлено до 70% от общего объема остродефектных рельсов. Наиболее распространенными дефектами рельсов в кривых на участках обращения поездов повышенной массы и длины являются дефекты контактно-усталостного характера и боковой износ рабочей грани головки рельса. На основании статистических данных об изъятии рельсов в результате установления в них дефектов, не позволяющих их дальнейшее использование, можно сделать вывод, что межремонтный ресурс работы рельсов в кривых участках пути радиусом менее 650 м не достигает 200 млн т брутто (рис. 1, 2).

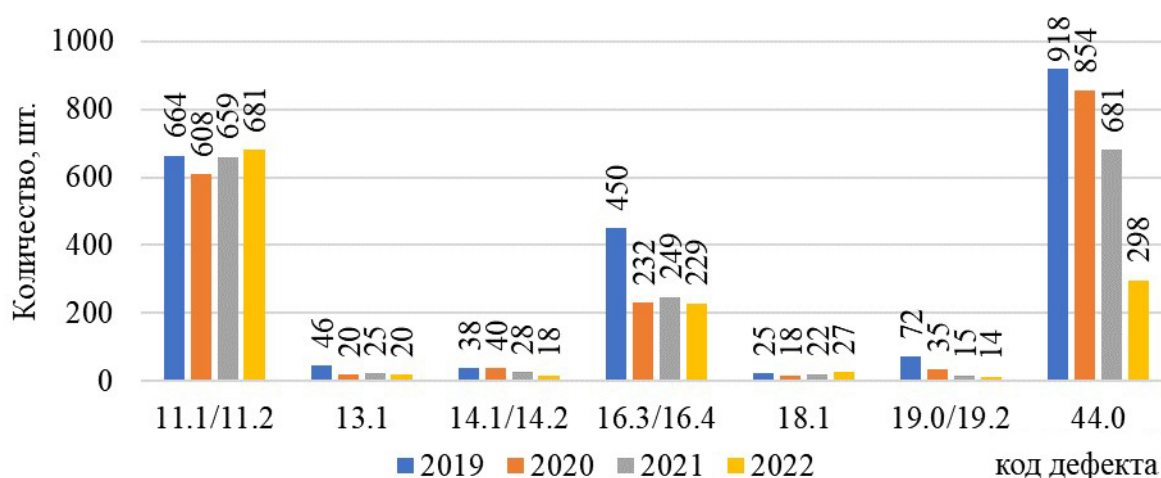


Рис. 1. Количество дефектных рельсов, выявленных на полигоне Северной железной дороги с 2019 по 2022 год

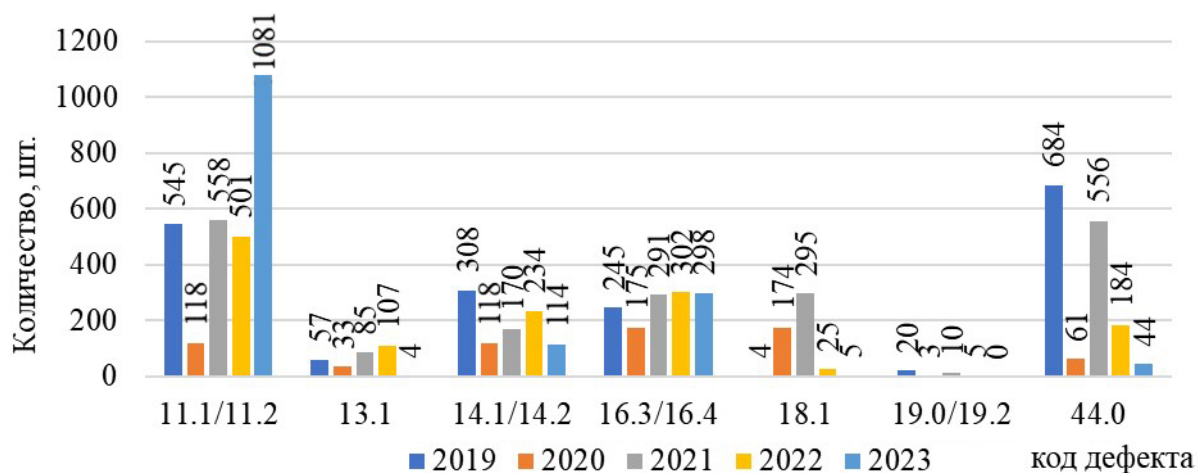


Рис. 2. Количество дефектных рельсов, выявленных на полигоне Октябрьской железной дороги с 2019 по 2023 год

На рис. 1 и 2 представлено количество выявленных дефектных рельсов на полигонах Северной и Октябрьской железных дорог. Одним из технических решений по снижению интенсивности бокового износа рельсов в кривых участках пути стало применение рельсов повышенной твердости и износостойкости (ДТЗ70ИК, ДТ400ИК), что позволило значительно снизить количество выхода рельсов по износу. Есть и положительный опыт различных технологических решений по продлению сроков службы рельсов в кривых, такие как лубрикация или широко применяемая технология по смене рабочего канта, позволяющая и повторное использование рельсов с боковым износом. Все используемые технико-технологические решения по продлению срока службы рельсов в кривых имеют оправданное применение, тем не менее в настоящее время нельзя однозначно определить долю влияния каждого из процессов в формировании бокового износа рельсов в кривых участках пути.

По исследованиям ВНИИЖТ [2], на боковой износ влияют внешние и внутренние факторы. К внешним факторам относятся лубрикация, непогашенное ускорение, профили и подуклонка рельсов, конструкция и состояние подвижного состава. К внутренним факторам относятся твердость рельсов, химический состав и микроструктура рельсов.

Для определения степени влияния вышеперечисленных внешних факторов на износ рельсов было выполнено моделирование движения вагона на тележках 18–100 с осевой нагрузкой 23,5 т/ось по кривому участку пути. Исходные данные для моделирования: рельс типа Р65, эпюра шпал 2000 шт./км, шпалы железобетонные, балласт щебеночный, промежуточные рельсовые скрепления АРС-4, длина прямого участка перед кривой — 10 м, переходной участок (заезд) — 110 м, длина кривой постоянного радиуса — 492 м, радиус кривой — 552 м, переходной участок (выезд) — 115 м. Возвышение наружного рельса принималось в двух вариантах:

по паспорту кривой — 93 мм и соответствующее непогашенному ускорению  $0 \text{ м/с}^2$  — 150 мм, рассчитанное по методике [3]. В модель железнодорожного пути вводились случайные неровности, соответствующие отличному состоянию пути. За один эксперимент было выполнено 30 итераций с пропуском 10 млн т брутто за одну итерацию.

В первой серии экспериментов был выполнен расчет бокового износа головки рельса при изменении подуклонки рельсов. Результаты расчета представлены на рис. 3.

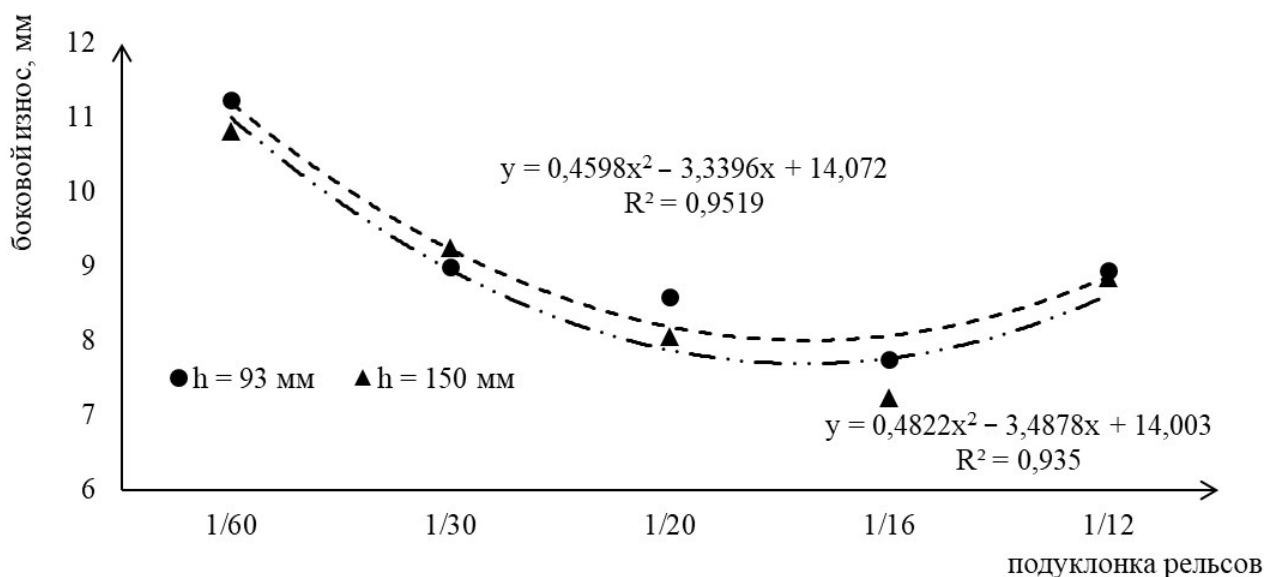


Рис. 3. График зависимости бокового износа наружного рельса от изменения подуклонки

Максимальная величина бокового износа рельсов была рассчитана при подуклонке рельсов 1/60 и возвышении 93 мм и составила 11,24 мм. При нормальном значении подуклонки 1/20 боковой износ рельса снижается в 1,3 раза.

Во второй серии экспериментов был выполнен расчет бокового износа головки рельсов при изменении коэффициента трения между гребнем колеса и рабочей гранью рельса. В этой серии экспериментов была принята скорость грузового поезда 80 км/ч и использована лубрикация боковой поверхности с последующим изменением коэффициента трения от 0,30 до 0,15 с шагом 0,05. Результаты расчета представлены на рис. 4. Ожидаемо, что при увеличении коэффициента трения увеличивается боковой износ рельса в 1,12 раза при возвышении наружного рельса 93 мм и в 1,11 раза при возвышении 150 мм.

В третьей серии экспериментов был выполнен расчет бокового износа головки рельсов при изменении величины непогашенного ускорения. Скорость движения грузового вагона задавалась согласно табл. 1.

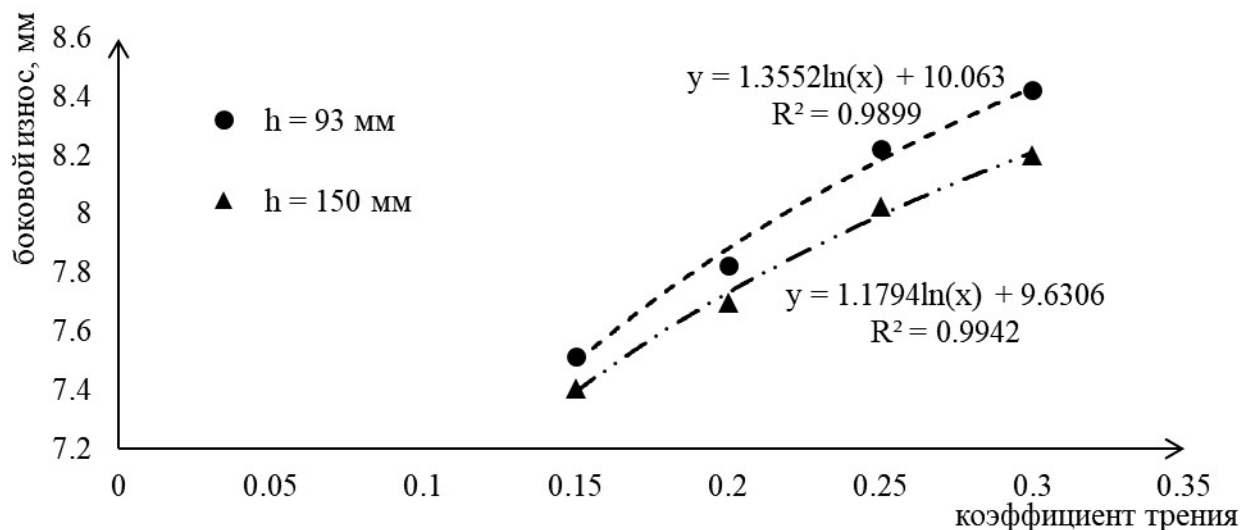


Рис. 4. Зависимость бокового износа наружного рельса от коэффициента трения

ТАБЛИЦА 1. Скорость движения модели грузового вагона

| $\alpha_{\text{ин}}, \text{ м/с}^2$ | Скорость, км/ч, при возвышении наружного рельса |        |
|-------------------------------------|---|--------|
|                                     | 93 мм   | 150 мм |
| -0,3                                | 45  | 65     |
| -0,2                                | 50  | 70     |
| -0,1                                | 55  | 75     |
| 0                                   | 65  | 80     |
| +0,1                                | 70  | 85     |
| +0,2                                | 75  | 90     |
| +0,3                                | 80  | 95     |

Результаты расчета представлены на рис. 5. Наименьший боковой износ головки рельса возникает при непогашенном ускорении равном  $-0,1-0 \text{ м/с}^2$ . Боковой износ наружного рельса увеличивается с повышением скорости в 1,07 раза. Однако при отрицательном непогашенном ускорении возникает перегруз внутренней нити, который приводит к интенсификации развития дефектов контактно-усталостного характера на поверхности катания и боковой рабочей выкружке рельса.

Анализ результатов выполненных расчетов в целом показывает, что при возвышении наружного рельса, рассчитанного по методике [3], для линий преимущественно грузового движения боковой износ головки рельса оказался ниже.

Одной из ключевых причин, кроме изъятия рельсов из эксплуатации в результате бокового износа на участках обращения поездов повышенной массы и длины, является формирование в рельсах дефектов контактно-усталостного характера.

Накопление остаточных деформаций в верхней части головки рельса начинается с момента укладки его в путь. В книге [4] отмечено, что на поверхности катания рельсов в процессе эксплуатации в зоне рабочего закругления головки накапливаются остаточные напряжения сжатия, а на некоторой глубине — остаточные напряжения растяжения, которые приводят к возникновению дефектов контактно-усталостного характера. Это подтверждается масштабными исследованиями, проведенными на экспериментальном кольце ВНИИЖТ [5, 6]. При увеличении осевой нагрузки растет общее количество отказов рельсов по причине контактной усталости металла на поверхности катания рельса в виде трещин и выкрашиваний в зоне рабочего закругления (код 11). Кроме того, это подтверждается увеличением выявления дефектов рельса по коду 21.

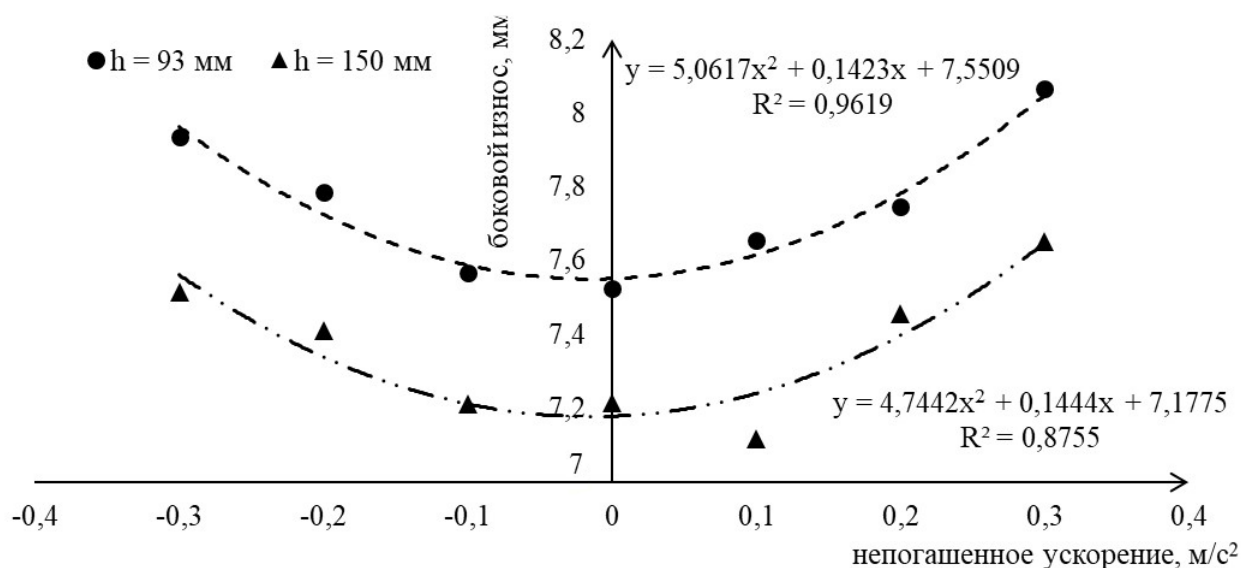


Рис. 5. Зависимость бокового износа наружного рельса от величины непогашенного ускорения

Дефекты контактно-усталостного характера (код 11) (рис. 1 и 2) выявлены на участках обращения тяжеловесных и длиннооставных поездов, в том числе на полигоне обращения локомотивов ЭС5К, ЭС4К, ТЭ25К2М, которые передают на путь наибольшие продольные усилия, особенно в режимах тяги и торможения. Продольные силы в зоне контакта колеса и рельса могут достигать значений более 100 кН [7–10]. В результате наблюдений за работой рельсов в пути зафиксировано, что наиболее часто дефект по коду 11 появляется в кривых участках пути (рис. 6).

Для установления причин развития дефекта по коду 11 и проверки гипотезы о влиянии величины напряжений в рельсах на формирование этого дефекта была использована конечно-элементная модель колеса и рельса, представленная на рис. 7.



Рис. 6. Трещины и выкашивания на поверхности катания внутреннего рельса в кривой радиусом 600 м (код 11)

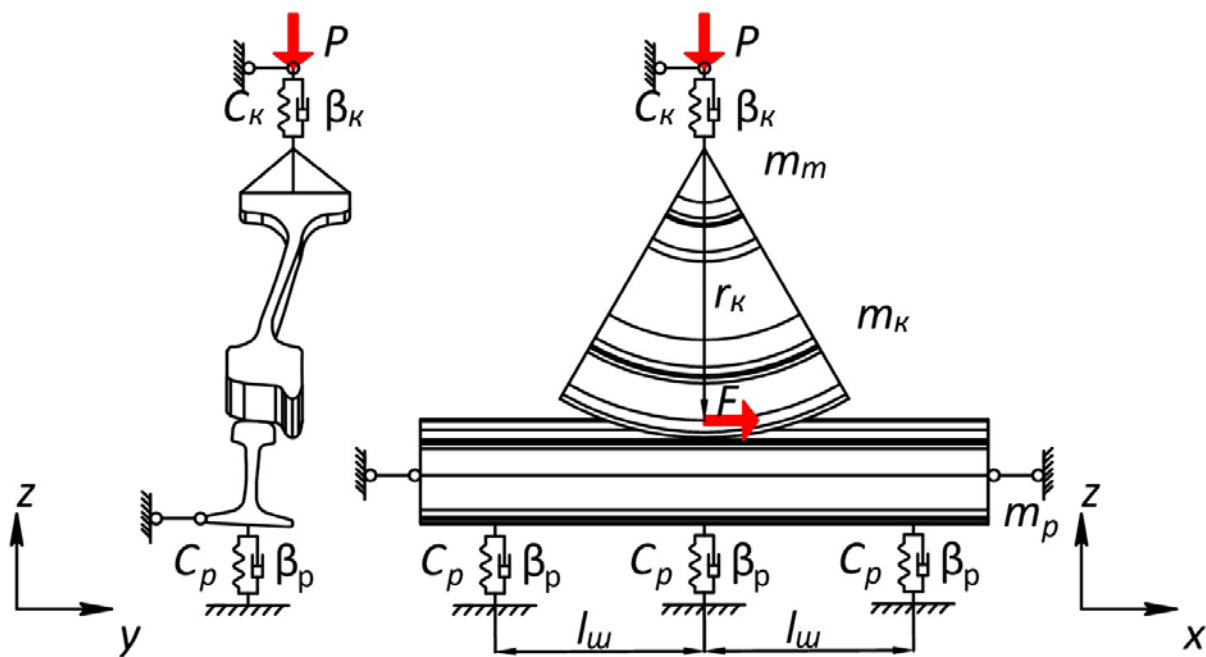


Рис. 7. Расчетная схема для определения напряжений в рельсах:

$P$  — вертикальная сила, Н;  $C_k$  — вертикальная жесткость связи тележки и колеса, Н/м;  $\beta_k$  — вертикальное демпфирование связи тележки и колеса Н/(м/с);  $m_t$  — приведенная масса тележки, кг;  $m_k$  — приведенная масса колеса, кг;  $r_k$  — радиус колеса, м;  $F$  — горизонтальная продольная сила, Н;  $m_p$  — приведенная масса рельса, кг;  $C_p$  — вертикальная жесткость подрельсового основания, Н/м;  $\beta_p$  — вертикальное демпфирование подрельсового основания, Н/(м/с),  $l_w$  — расстояние между шпалами, м



Вынужденные колебания рельсов типа Р65, лежащих на сплошном упругом основании с приведенной массой, в данной модели описываются дифференциальным уравнением:

$$EI_y^0 \frac{\partial^4 z_p^0}{\partial x^4} + N^0 \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial x^2} + m_p \frac{\partial^2 z_p^0}{\partial t^2} + \beta_p \frac{\partial z_p^0}{\partial t} + U_z^0 z_p^0 = 0,$$

где  $E$  — модуль упругости материала рельса, Па;

$I_y^0$  — момент инерции сечения рельса относительно главной поперечной центральной оси, м<sup>4</sup>;

$x$  — абсцисса текущего сечения рельса, отчитываемая от неподвижного начала координат, м;

$t$  — время, с;

$N^0$  — продольная сила в данном рельсе, Н;

$m_p$  — распределенная приведенная масса рельса с подрельсовым основанием при его вертикальных смещениях, кг;

$z_p^0$  — вертикальные смещения центра тяжести рельса, м;

$U_z^0$  — модуль упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости, Па;

$\beta_p$  — распределенное демпфирование в пути.

Расчет выполнялся в два шага нагружения. На первом шаге колесо нагружалось вертикальной силой  $P = 120$  кН. На втором шаге задавался крутящий момент вокруг поперечной оси  $y$  к точке контакта колеса с рельсом в зависимости от величины горизонтальной продольной  $F$ . Горизонтальная продольная сила  $F$  задавалась от 0 до 100 кН с шагом 20 кН.

На интенсивность развития дефектов контактно-усталостного характера влияет уровень напряжений и деформаций в зоне контакта колеса с рельсом, которые в свою очередь зависят от расположения колеса относительно вертикальной оси рельса (влияние края, близости радиусов поверхностей контакта, геометрических параметров контактирующих поверхностей) [11]. На рис. 8 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений в рельсе. В результате проскальзывания колеса по поверхности катания в верхней части головки рельса возникают остаточные напряжения растяжения и сжатия, образуются пластические деформации, интенсивность развития которых увеличивается при ухудшении геометрических характеристик рельсовой колеи.

На рис. 9–11 представлены результаты расчета главных напряжений в головке рельса. При продольном проскальзывании главные напряжения сжатия в точке контакта колеса с рельсом увеличиваются в 1,14 раза.



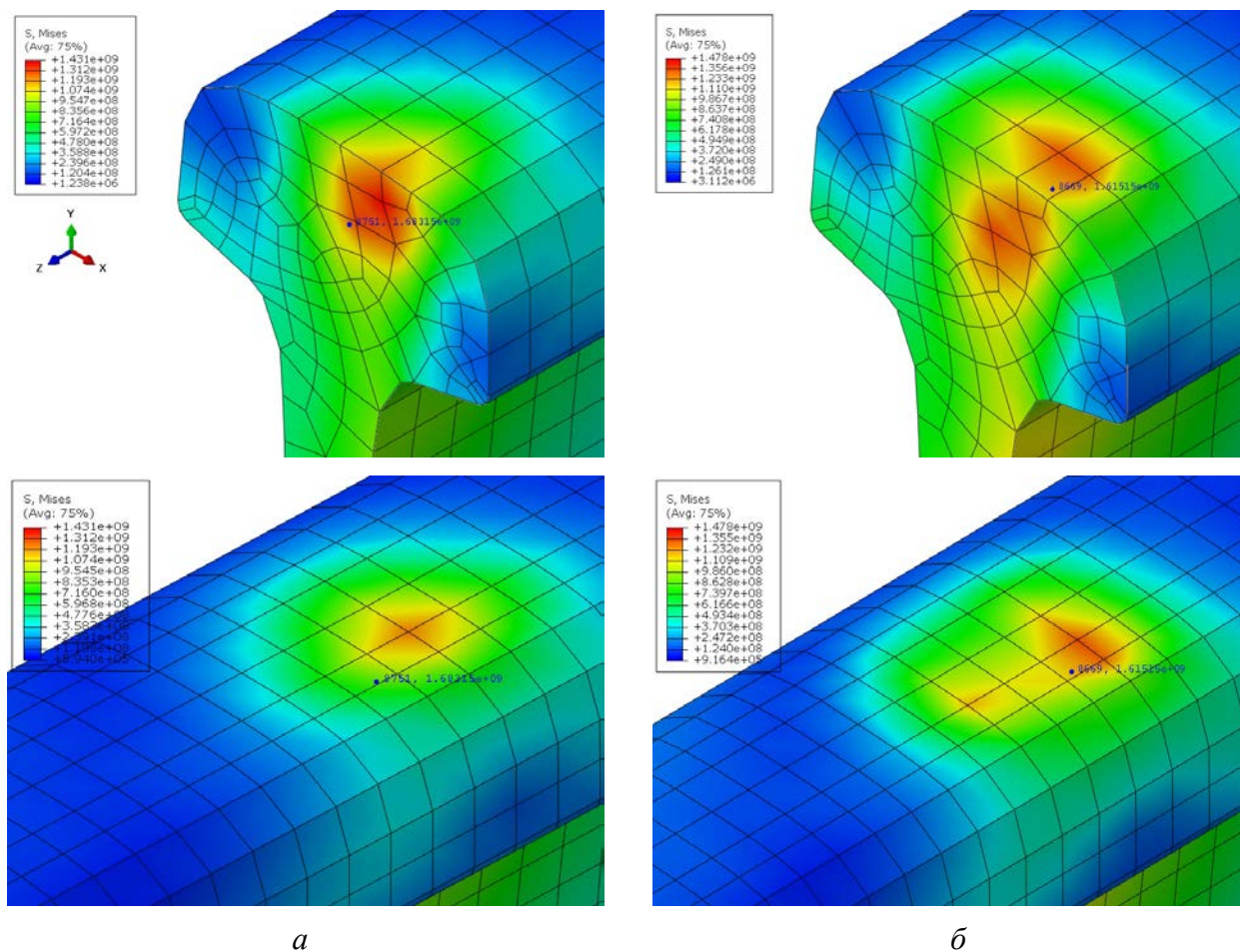


Рис. 8. Результаты расчета эквивалентных напряжений в головке рельса:  
*a* — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; *б* — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

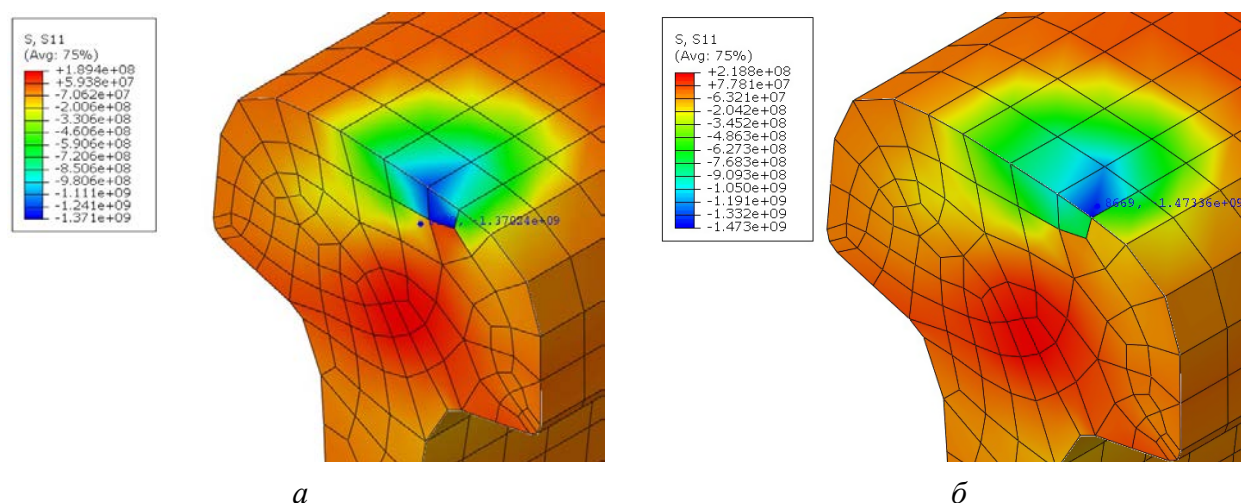


Рис. 9. Результаты расчета 1 главного напряжения в головке рельса:  
*a* — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; *б* — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

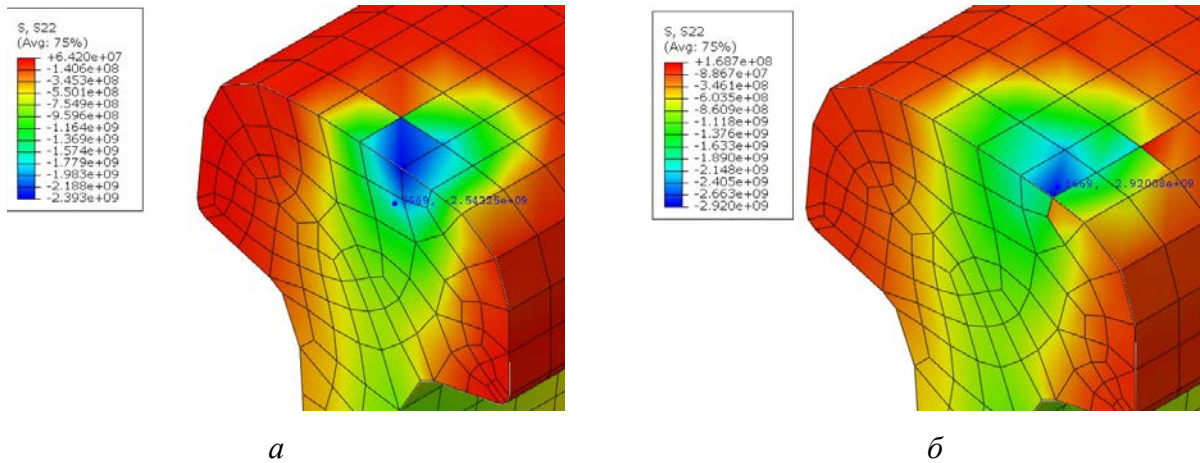


Рис. 10. Результаты расчета 2 главного напряжения в головке рельса:  
*а* — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; *б* — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

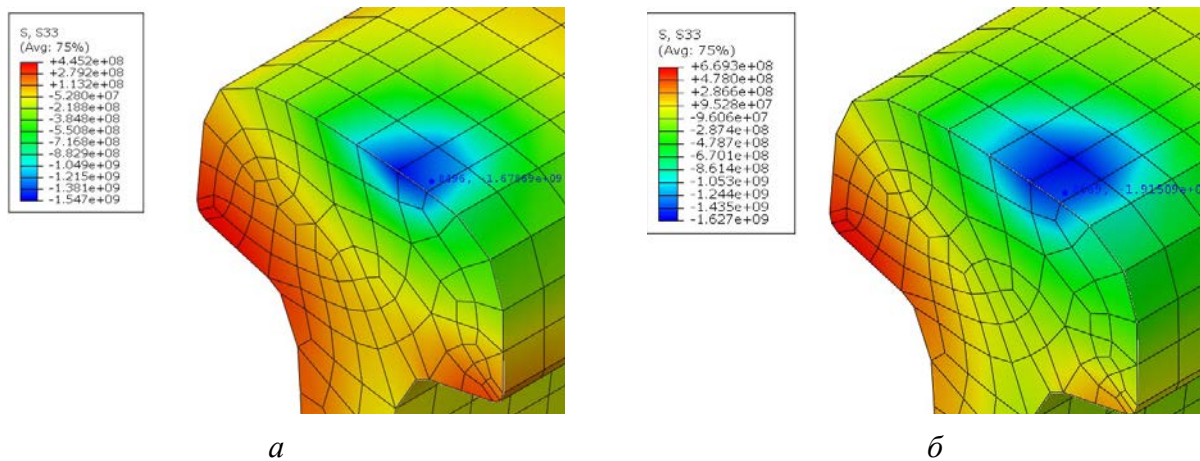


Рис. 11. Результаты расчета 3 главного напряжения в головке рельса:  
*а* — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; *б* — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН.

На рис. 12–14 представлены результаты расчета касательных напряжений в рельсах. В [7] установлено, что наиболее опасными являются касательные напряжения, которые возникают на глубине головки рельса. При проскальзывании на поверхности головки рельса возникают пластические деформации в виде микро-трещин, интенсивность развития которых зависит от величины напряжений. Так при появлении продольного проскальзывания касательные напряжения растяжения в плоскости  $xz$  и  $yz$  увеличиваются в 1,06–1,12 раза, а сжатия — в 1,18–1,24 раза. Касательные напряжения растяжения в плоскости  $xy$  при продольном проскальзывании колеса по рельсу и при отсутствии поперечного проскальзывания снизились в 1,23 раза, а сжатия — 1,07. При наличии поперечного проскальзывания колеса по рельсу можно прогнозировать увеличение касательных напряжений в плоскости  $xy$ .



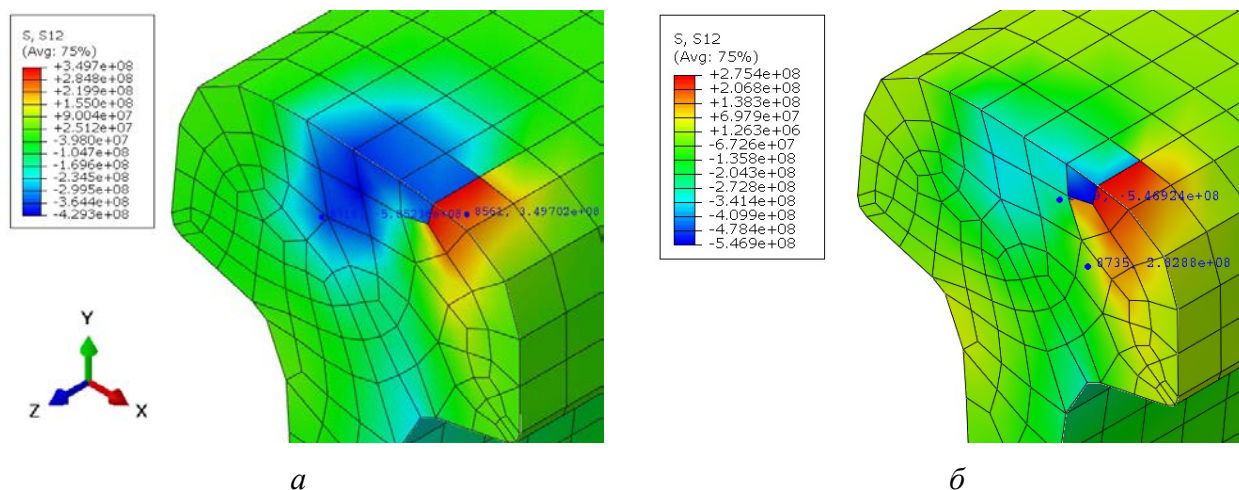


Рис. 12. Результаты расчета касательных напряжений в плоскости  $xу$ :  
 а — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; б — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

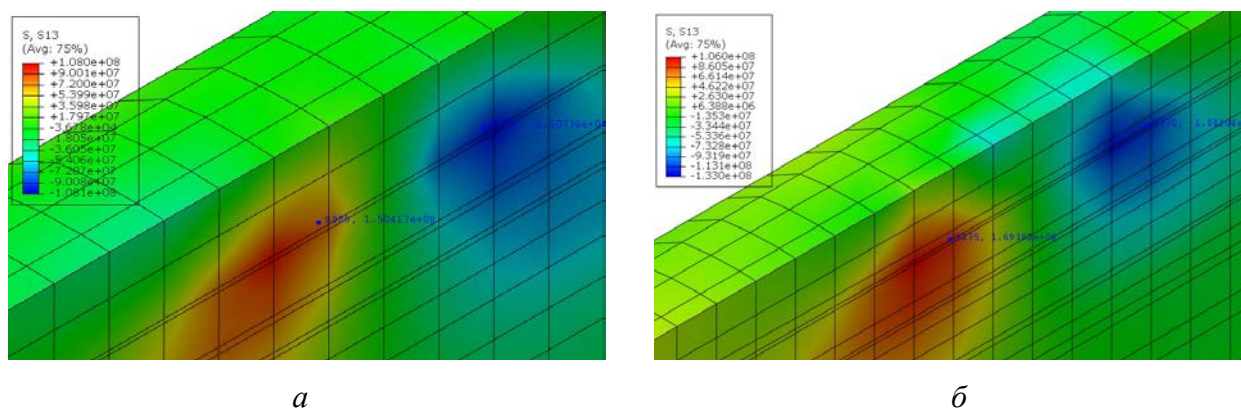


Рис. 13. Результаты расчета касательных напряжений в плоскости  $xz$ :  
 а — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; б — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

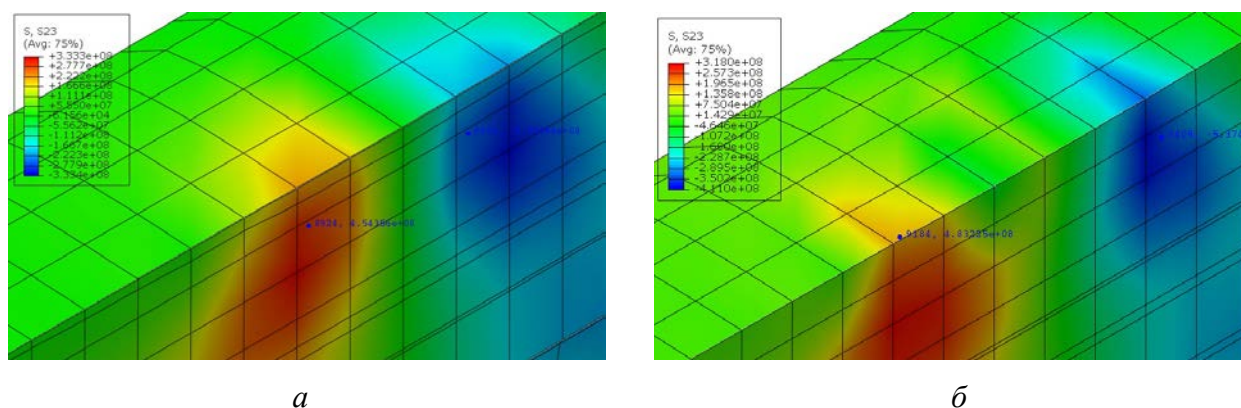


Рис. 14. Результаты расчета касательных напряжений в плоскости  $yz$ :  
 а — при воздействии только вертикальной силы  $P = 120$  кН; б — при воздействии вертикальной силы  $P = 120$  кН и горизонтальной продольной силы  $F = 100$  кН

## Заключение

Необходимость развития тяжеловесного движения поездов на полигоне ОАО «Российские железные дороги» продиктована растущими потребностями в перевозке грузов, темпами, значительно превосходящими развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта. Обращение поездов повышенной массы и длины оказывает негативное влияние на формирование дефектов в рельсах и на интенсивность накопления остаточных деформаций в конструкции железнодорожного пути в целом, что влечет за собой дополнительные затраты на текущее содержание железнодорожного пути и изменение подходов в организации ремонтов железнодорожного пути. На полигоне обращения поездов повышенной массы и длины фиксируется увеличение интенсивности бокового износа рельсов в кривых участках пути, развитие и накопление дефектов рельсов контактно-усталостного характера.

Негативное влияние повышенных вертикальных нагрузок на развитие дефектов в рельсе, как и его износ, подтверждено в результате моделирования процесса взаимодействия колеса и рельса посредством цифрового двойника.

Стоит отметить, что в России с 70-х годов прошлого века накоплен существенный опыт эксплуатации пути при интенсивном воздействии на него поездов повышенной массы и длины, разработаны технико-технологические решения по продлению срока службы рельсов, конструкций упругих промежуточных рельсовых скреплений, конструкции балластной призмы и основной площадки земляного полотна, армированные геосинтетическими материалами [12, 13].

Одним из решений снижения интенсивности накопления дефектов в рельсах контактно-усталостного характера и его бокового износа, по мнению авторов, является обязательное включение в систему управления техническим состоянием железнодорожного пути, превентивной профильной шлифовки поверхности катания и рабочей выкружки головки рельса. Данные работы, включенные в межремонтную схему, должны обеспечивать своевременное восстановление поперечного профиля рельса, снятие напряжений на поверхности катания рельса и ликвидацию зарождающихся на поверхности катания дефектов.

## Библиографический список

1. Технологии завтрашнего дня: интервью с М. И. Мехедовым / беседовал А. Алеев // Гудок. 2024. № 58 (27880). С. 4.
2. Оптимизация взаимодействия в системе «колесо — рельс» / С. А. Виноградов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45.
3. Руководство по определению возвышения наружного рельса в кривых на основе двухуровневой системы скоростей (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20.12.2021 № 2897/р).
4. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. М.: Академкнига, 2003. 589 с.

5. Лысюк В. С. Сравнительные испытания долговечности рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2005. № 2. С. 23–25.
6. Влияние величины осевых нагрузок подвижного состава на контактно-усталостную долговечность рельсов / В. С. Коссов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. № 77 (3). С. 149–156. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-3-149-156.
7. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути / Т. Г. Яковлева [и др.]; под ред. С. В. Амелина и Т. Г. Яковлевой. М.: Транспорт, 1990. 367 с.
8. Сидорова Е. А., Певзнер В. О., Чечельницкий А. И. Показатели силового взаимодействия пути и подвижного состава при движении грузового вагона по длинным неровностям с учетом действия продольных сил // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. № 80 (6). С. 359–365. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365.
9. Матюнин В. А., Парахненко И. Л. Влияние режимов ведения поезда на продольные и боковые силы, возникающие в кривых участках // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). URL: <https://mnv.irgups.ru/toma/111–2021> (дата обращения: 18.04.2024).
10. Коссов В. С., Краснов О. Г. Воздействие сдвоенных тяжеловесных поездов в режимах торможения на верхнее строение пути // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 11. С. 2–6.
11. Яковлев В. Ф. Исследование сил взаимодействия, деформаций и напряжений в зоне контакта железнодорожных колес и рельсов: дисс. ... докт. техн. наук. СПб.: ЛИИЖТ, 1964.
12. Analysis of residual deformations accumulation intensity factors of the railway track located in the polar zone / E. Chernyaev [et al.] // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 49. Singapore, 2020. P. 381–388.
13. Блажко Л. С., Штыков В. И., Черняев Е. В. Увеличение несущей способности земляного полотна в слабоводопроницаемых грунтах // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 12. С. 26–29.

Дата поступления: 01.07.2024

Решение о публикации: 18.07.2024

#### **Контактная информация:**

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент; [zhdp10@gmail.com](mailto:zhdp10@gmail.com)

БУШУЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доцент; [8921918@mail.ru](mailto:8921918@mail.ru)

ГАПОНЕНКО Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; [gaponenkoalexandr@mail.ru](mailto:gaponenkoalexandr@mail.ru)

ЧЕРНЯЕВ Евгений Владимирович — канд. техн. наук, доцент; [chernyaev@pgups.ru](mailto:chernyaev@pgups.ru)

## Causes of occurrence and development of rail defects in sections of circulation of trains of increased weight and length

**A. A. Kiselev, M. V. Bushuev, A. S. Gaponenko, E. V. Chernyaev**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Kiselev A. A., Bushuev M. V., Gaponenko A. S., Chernyaev E. V. Causes of occurrence and development of rail defects in sections of circulation of trains of increased weight and length // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 45–59. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-45-59

### Abstract

**Purpose:** determine the causes of defects in rails in areas of circulation of trains of increased weight and length through modeling the operation of rails in curved sections of the railway track using digital twins. **Methods:** to study the influence of various factors on rail wear in curved sections of the track, software systems were used based on the numerical solution of differential equations for the movement of rolling stock and the operation of the railway track under the train. To determine the stresses in the rails in order to predict the development of contact-fatigue defects, dynamic calculations using the finite element method were used. **Results:** it was revealed that in order to reduce rail wear in a curved section of the track in sections with predominantly freight traffic, the elevation of the outer rail must be calculated based on the actually realized speeds of freight trains. It has been established that at the moment the influence of the amount of rail inclination on rail wear has not been sufficiently studied. As an analysis of the position of the rails at various inclines has shown, for the curve under consideration it is most advisable to use a 1/30 inclination within the limits of a circular curve and with a 1/20 to 1/30 inclination within the transition curve. To reduce the likelihood of contact-fatigue defects occurring in such areas, it is necessary to provide for the implementation of measures to lubricate the side working edge of the outer rail thread and the rolling surface of the inner rail thread within the entire curve. **Practical importance:** the research results indicate the need to revise the approach to calculating the elevation of the outer rails in curves with heavy freight train traffic. The possibility of extending the service life of rails by revising the system for planning and implementing work on lubricating and grinding rails in curves in areas where trains of increased mass and length operate.

**Keywords:** lateral wear, rail tilt, stress in rails, heavy and long trains, rail defects, wheel-rail interaction

### References

1. Tehnologii zavtrashnego dnya: intervyyu s M. I. Mexedovym / besedoval A. Aleev // Gudok. 2024. № 58 (27880). S. 4. (In Russian)
2. Optimizaciya vzaimodejstviya v sisteme "koleso — rel's" / S.A. Vinogradov [i dr.] // Zheleznodorozhnyj transport. 2023. № 3. S. 37–45. (In Russian)
3. Rukovodstvo po opredeleniyu vozvysheniya naruzhnogo rel'sa v krivyh na osnove dvuhurovnevoj sistemy skorostej (utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 20.12.2021 № 2897/r). (In Russian)
4. Lysyuk V.S., Sazonov V.N., Bashkatova L.V. Prochnyj i nadezhnyj zheleznodorozhnyj put'. M.: Akademkniga, 2003. 589 s. (In Russian)
5. Lysyuk V.S. Sravnitel'nye ispytaniya dolgovechnosti rel'sov // Put' i putevoe xozyajstvo. 2005. № 2. S. 23–25. (In Russian)

6. Vliyanie velichiny oseyvkh nagruzok podvizhnogo sostava na kontaktno-ustalostnuyu dolgov-echnost' rel'sov / V.S. Kossov [i dr.] // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT). 2018. № 77 (3). S. 149–156. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-3-149-156. (In Russian)

7. Osnovy ustrojstva i raschetov zheleznodorozhnogo puti / T. G. Yakovleva [i dr.]; pod red. S. V. Amelina i T. G. Yakovlevoj. M.: Transport, 1990. 367 s. (In Russian)

8. Sidorova E.A., Pevzner V.O., Chechel'niczkij A. I. Pokazateli silovogo vzaimodejstviya puti i podvizhnogo sostava pri dvizhenii gruzovogo vagona po dlinnym nerovnostyam s uchetom dejstviya prodolnyh sil // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT). 2021. № 80 (6). S. 359–365. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365. (In Russian)

9. Matyunin V.A., Paraxnenko I. L. Vliyanie rezhimov vedeniya poezda na prodol'nye i bokovye sily, voznikayushhie v krivykh uchastkah // Molodaya nauka Sibiri. 2021. № 1 (11). URL: <https://mnv.irgups.ru/toma/111–2021> (data obrashheniya: 18.04.2024). (In Russian)

10. Kossov V. S., Krasnov O. G. Vozdejstvie sdvoennykh tyazhelovesnykh poezdov v rezhimakh tormozheniya na verhnee stroenie puti // Put' i putevoe hozyajstvo. 2020. № 11. S. 2–6. (In Russian).

11. Yakovlev V.F. Issledovanie sil vzaimodejstviya, deformacij i napryazhenij v zone kontakta zheleznodorozhnykh koles i rel'sov: diss. ... dokt. texn. nauk. SPb.: LIIZhT, 1964. (In Russian)

12. Analysis of residual deformations accumulation intensity factors of the railway track located in the polar zone / E. Chernyaev [et al.] // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 49. Singapore, 2020. P. 381–388.

13. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Chernyaev E. V. Uvelichenie nesushhej sposobnosti zemlyanogo polotna v slabovodoproniczaemykh gruntah // Put' i putevoe hozyajstvo. 2019. № 12. S. 26–29. (In Russian).

Received: 01.07.2024

Accepted: 18.07.2024

#### **Author's information:**

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Associate Professor; [zhdp10@gmail.com](mailto:zhdp10@gmail.com)

Mikhail V. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; [8921918@mail.ru](mailto:8921918@mail.ru)

Alexander S. GAPONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; [gaponenkoalexandr@mail.ru](mailto:gaponenkoalexandr@mail.ru)

Evgenii V. CHERNYAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; [chernyaev@pgups.ru](mailto:chernyaev@pgups.ru)