

Научная статья
УДК 69.04
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/18-30>

Оценка устойчивости и траектории развития трещин в рельсах под действием циклических нагрузок

Сергей Сергеевич Майер

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ sergzo@bk.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются методы анализа и прогнозирования развития подповерхностных трещин в головке рельса. Особое внимание уделено продольно-поперечным и поперечным трещинам, а также факторам, влияющим на их рост и изменение траектории. **Цель исследования:** разработка и уточнение аналитических и численных методов для прогнозирования траектории развития подповерхностных трещин в рельсах под воздействием циклических нагрузок. Основное внимание уделяется оценке возможности перерастания продольных трещин в поперечные и определению условий, при которых происходит это явление. **Методы исследования:** применение методов механики разрушения, аналитических расчетных схем и численного моделирования методом конечных элементов. Используются уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние рельса, и критерии устойчивости развития трещин. В расчетах учитываются параметры контактной нагрузки, влияющие на рост и изменение траектории трещины, такие как сила трения, величина контактного пятна и относительное положение трещины. **Результаты:** продольно-поперечные трещины в рельсах развиваются значительно быстрее, чем поперечные, что существенно увеличивает риск разрушения рельса. Установлено, что при определенных условиях возможно отклонение траектории развития трещины, приводящее к ее перерастанию в трещину нормального отрыва. В численных экспериментах выявлены критические параметры нагрузки и геометрии трещины, влияющие на вероятность ее нестабильного развития. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для улучшения прогнозирования и предупреждения разрушений рельсов в условиях эксплуатации, что способствует повышению безопасности железнодорожного транспорта. Модели и методики оценки могут быть интегрированы в системы диагностики и мониторинга состояния рельсовых путей, что позволит своевременно выявлять и устранять опасные дефекты.

Ключевые слова: рельс, внутренняя поперечная трещина, циклическая трещиностойкость, усталостное разрушение, остаточный ресурс рельса

Для цитирования: Майер С.С. Оценка устойчивости и траектории развития трещин в рельсах под действием циклических нагрузок // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 4(61). С. 18–30.

Original article

Assessment of stability and crack growth trajectories in rails under cyclic loading conditions

Sergei S. Maier✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ sergzo@bk.ru

© Майер С.С., 2024

Abstract. This article examines methods for analyzing and predicting the development of subsurface cracks in the railhead. Particular attention is given to longitudinal-transverse and transverse cracks, as well as the factors influencing their growth and trajectory changes. The objective of the research is to develop and refine analytical and numerical methods for predicting the growth trajectory of subsurface cracks in rails under cyclic loading. The focus is on assessing the potential for longitudinal cracks to transition into transverse cracks and determining the conditions under which this phenomenon occurs. Research methods include the application of fracture mechanics, analytical calculation models, and numerical simulations using the finite element method. Equations describing the stress-strain state of the rail and crack growth stability criteria are employed. The calculations account for contact load parameters that influence crack growth and trajectory changes, such as friction force, contact patch size, and the relative position of the crack. Results show that longitudinal-transverse cracks in rails develop significantly faster than transverse cracks, substantially increasing the risk of rail failure. It is established that under certain conditions, the crack growth trajectory may deviate, leading to its transition into a normal separation crack. Numerical experiments identified critical load parameters and crack geometry affecting the likelihood of unstable crack growth. Practical significance: The study's findings can be used to improve the prediction and prevention of rail failures under operational conditions, thereby enhancing railway transport safety. The assessment models and methods can be integrated into rail track diagnostics and monitoring systems, enabling timely detection and elimination of hazardous defects.

Keywords: rail, internal transverse crack, cyclic crack resistance, fatigue fracture, rail residual life

For citation: Maier S.S. Assessment of stability and crack growth trajectories in rails under cyclic loading conditions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 4(61), pp. 18–30. (In Russ.).

Введение

Современные рельсовые пути подвержены значительным эксплуатационным нагрузкам, которые могут приводить к возникновению и развитию различных типов трещин, угрожающих целостности рельсов и безопасности движения поездов. Среди наиболее критичных дефектов выделяются продольно-поперечные трещины, обладающие высоким потенциалом быстрого распространения и способные вызвать катастрофические разрушения рельсовых конструкций.

Исследования показывают, что процесс зарождения и развития продольных подповерхностных трещин в головке рельса представляет собой сложное явление, обусловленное множеством факторов. На основании усталостных испытаний рельсов, находящихся в контакте с колесами разной степени износа, выявлено значительное снижение долговечности изношенных рельсов по сравнению с новыми. Как показано на рисунке 1, зафиксировано смещение места зарождения трещин вслед за изменением положения площадки контакта. Важно отметить, что при взаимодействии с изношенными колесами трещины образуются в узкой зоне рабочей выкружки, что подтверждается данными, приведенными на рисунке 1, б [1].

Результаты фрактографических исследований позволяют выделить несколько стадий развития подповерхностных трещин [2]. Начальная стадия включает образование ядра трещины в зоне пластически деформированного металла, удаленного на глубину 5–10 мм от поверхности. Наиболее частой причиной зарождения таких трещин является наличие металлургических дефектов, таких как дорожки неметаллических включений, которые возникают в наиболее нагруженной части головки рельса.

Трещины развиваются под углом 50–70° от вертикали, приобретая эллиптическую форму и распространяясь вдоль рельса. При этом их рост в поперечном направлении ограничен упрочненными приповерхностными слоями материала. На поздних стадиях развития возможен поворот плоскости трещины, что может привести либо к выходу трещины на поверхность, либо к ее углублению, что в конечном итоге может вызвать разрушение рельса.

Поскольку продольные трещины формируются на границе зон пластических и упругих деформаций, игнорировать остаточные напряжения в данной области недопустимо. Растягивающие остаточные напряжения, возникающие в зонах максимальной пластической деформации материала рельса, оказывают существенное влияние на процесс трещинообразования. Эти напряжения дополнительно зависят от первоначальной закалки рельса и износа его поверхности, что необходимо учитывать при оценке долговечности рельсов в эксплуатации.

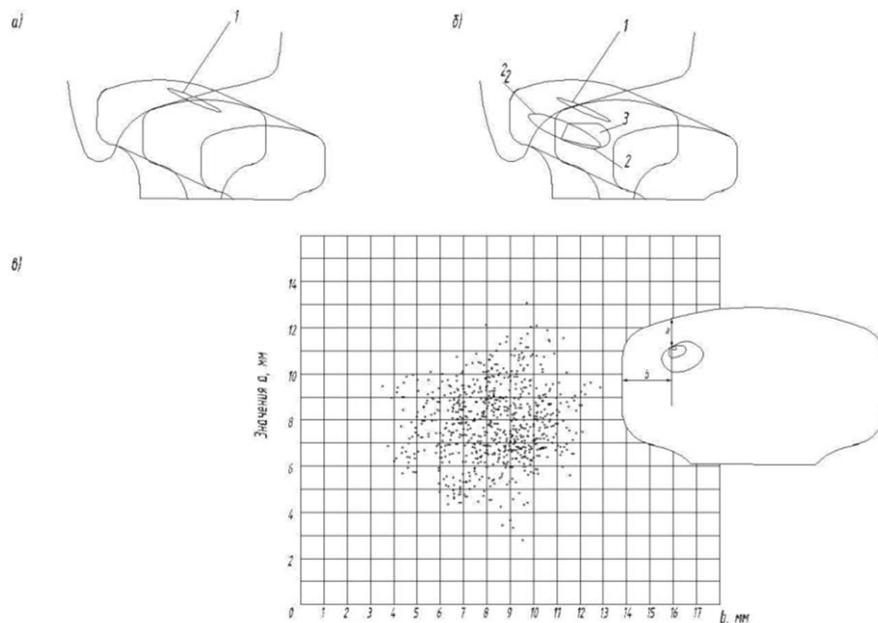


Рис. 1. Расположение продольных подповерхностных трещин в новых рельсах при их испытании в контакте с неизношенными (а) и изношенными (б-в) рельсами
 Fig. 1. The arrangement of longitudinal subsurface cracks in new rails during testing in contact with unworn (a) and worn (b-d) rails

Несмотря на значительное количество проведенных исследований, белые пятна все еще существуют, особенно в части, касающейся механизмов роста трещин и их возможного перерастания в трещины нормального отрыва.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного подхода к исследованию трещинообразования, учитывающего как структурные особенности материала, так и эксплуатационные условия. Это важно для повышения безопасности эксплуатации железнодорожных путей.

Цель исследования заключается в детальном анализе механизмов роста продольно-поперечных трещин и их возможного перерастания в трещины нормального отрыва. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: изучение стадий развития трещин, анализ влияния остаточных напряжений, оценка допустимых размеров трещин, а также разработка модели, учитывающей реальные эксплуатационные условия.

Материалы и методы

Исследование проводилось с использованием комплексного подхода, включающего усталостные испытания рельсов, фрактографические исследования, а также моделирование напряженно-деформированного состояния рельсов.

Исследование механизмов развития продольных и продольно-поперечных трещин

Основным источником данных о трещинах стали результаты фрактографических исследований, позволяющие выделить несколько стадий развития подповерхностных трещин. Оценка допустимых размеров неразвивающихся подповерхностных дефектов основана на интеграции контактных напряжений (рассчитанных по модели Герца), остаточных напряжений и сдвигающих напряжений, возникающих в рельсе [2]. Критерием, определяющим допустимый размер трещины, служит условие, при котором сумма изменений коэффициентов интенсивности напряжений по трем модам не превышает пороговое значение, что является минимально возможным значением.

$$\Delta K = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3 \leq \Delta K_{th} \approx \sim 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Допускается, что в материале рельса могут присутствовать эллиптические включения, аналогичные дефектам типа 2 (см. рис. 2), которые могут располагаться на различной глубине от поверхности. Согласно вышеупомянутому критерию, вероятность развития таких трещин оценивается в зависимости от направления их роста и угла наклона. При этом, если влияние первой моды незначительно, можно сосредоточиться на второй и третьей модах, что упрощает расчеты:

$$\Delta K_2 + \Delta K_3 = (k_2 \Delta \tau_2 + k_3 \Delta \tau_3) \sqrt{\pi c},$$

где k_2 и k_3 – коэффициенты, зависящие от положения точек на малой и большой полуосях эллипса.

Продольные подповерхностные трещины сами по себе не приводят к аварийным ситуациям. Однако основной интерес представляет возможность образования поперечных трещин, исходящих из продольных (см. рис. 1, б и рис. 2) [3].

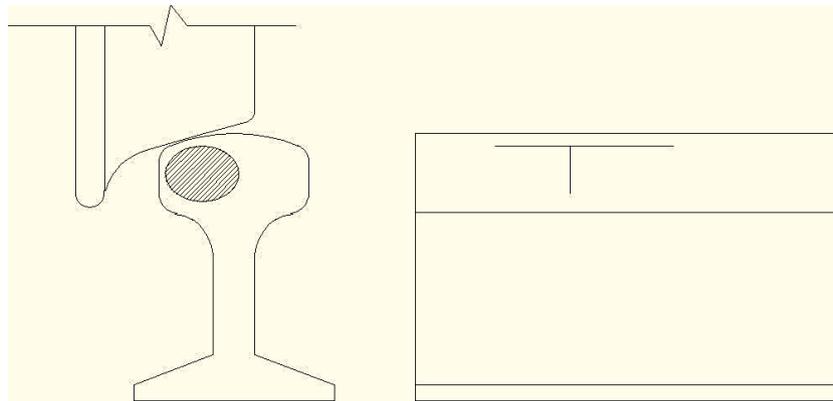


Рис. 2. Схематическое изображение поперечной трещины (сплошными линиями) и продольной (штрихом) технологической раковины в головке рельса

Fig. 2. Schematic representation of a transverse crack (solid lines) and a longitudinal (dashed line) manufacturing flaw in the rail head

Плоские модели развития горизонтальных подповерхностных трещин, описанные в литературе [4–6], не полностью учитывают реальные условия, характерные для развития трещин в головке рельса. В частности, края трещин по малой оси эллипса ограничены упрочненными поверхностными слоями и не могут выйти на поверхность. Несмотря на это, такие модели позволяют получить важные качественные результаты, которые могут быть полезны для дальнейшего углубленного анализа и разработки методов предотвращения разрушений рельсов.

Моделирование траектории трещин при контактном нагружении

Более точная модель расчета направления движения поверхностной трещины при контактном нагружении представлена в работе [5], где использован метод конечных элементов (МКЭ) и критерий плотности энергии деформации. Решена двумерная задача о развитии подповерхностной трещины в полуплоскости при движении по ней ролика (рис. 3). В модели варьируются параметры, такие как длина трещины, угол ее наклона, размер контактной площадки, глубина залегания трещины и соотношение нормальной и тангенциальной нагрузок.

Плоская расчетная схема (рис. 3) дискретизирована на конечные элементы, что позволяет определить размеры контактной площадки, распределение давлений и касательных усилий. После решения контактной задачи МКЭ можно аппроксимировать поле перемещений у вершины трещины известными асимптотическими зависимостями. Эти зависимости включают коэффициенты интенсивности напряжений K_1 и K_2 , которые применяются в критерии плотности энергии деформации, выраженном как:

$$S = a_{11}K_1^2 + a_{12}K_1K_2 + a_{22}K_2^2,$$

где коэффициенты зависят от упругих свойств материала и угла θ , измеряемого в плоскости, перпендикулярной фронту трещины в локальной системе координат.

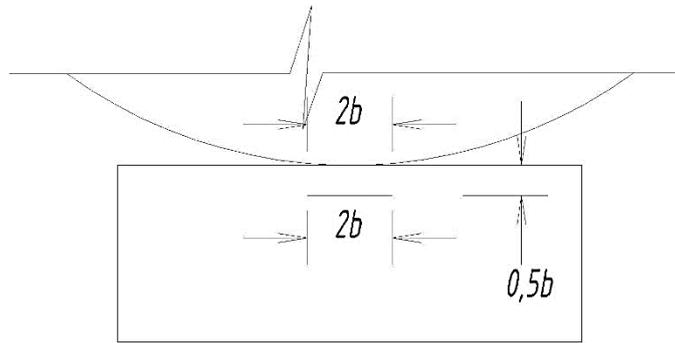


Рис. 3. Двухмерная схема [5] контактного нагружения полуплоскости с подповерхностной трещиной

Fig. 3. Two-dimensional diagram [5] of contact loading of a half-plane with a subsurface crack

Минимизация плотности энергии деформации приводит к нахождению угла θ , при котором достигается минимальное значение S .

$$a_{11} = 8E(3 - 4\nu - \cos\theta)(1 + \cos\theta)/[\pi(1 + \nu)],$$

$$a_{12} = 16E\sin\theta[\cos\theta - (1 - 2\nu)]/[\pi(1 + \nu)],$$

$$a_{22} = 8E[4(1 - \nu)(1 - \cos\theta) + (1 + \cos\theta) \times (3\cos\theta - 1)]/[\pi(1 + \nu)].$$

Примеры [5] численного решения задачи (рис. 4) показывают зависимости угла трещины от положения контактной площадки, с учетом или без учета трения. Эти результаты подтверждают возможность выхода трещины на поверхность или ее заглубления, в зависимости от трения.

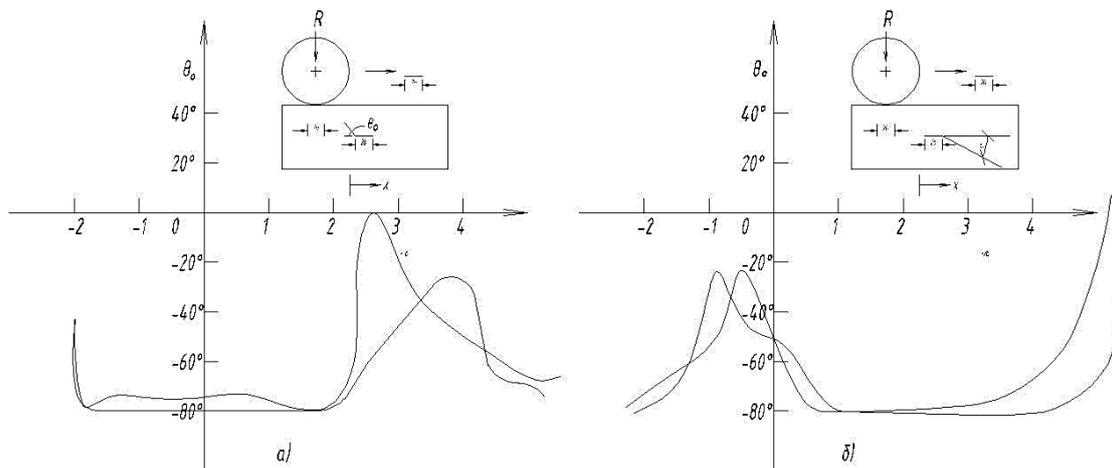


Рис. 4. Угол развития левой (а) и правой (б) вершин подповерхностной трещины в зависимости от положения площадки контакта при отсутствии (сплошные линии) и при наличии (штриховые линии) трения

Fig. 4. Angle of propagation of the left (a) and right (b) tips of the subsurface crack depending on the contact patch position in the absence (solid lines) and presence (dashed lines) of friction

Анализ взаимодействия трещин и контактных площадок

Последнее время развиваются подходы комплексного рассмотрения повреждения силовых систем на основе одновременного описания повреждений различной природы [7–9].

Модель [9] предлагает комплексный подход к анализу изнашивания рельсов, учитывая не только воздействие колеса, но и динамическое изменение поверхности рельса. В рамках

модели выполняется расчет напряженного состояния рельса при циклическом контакте колеса и рельса, что позволяет получить точные данные о распределении нагрузок и накоплении повреждений. При этом особое внимание уделяется амплитуде касательных напряжений, которая используется для оценки уровня усталостных повреждений.

В модель включены детали контактной задачи, включая вариации в длине трещин, угле их наклона, размерах контактной площадки, глубине залегания трещины и соотношении нормальных и тангенциальных нагрузок. Эти параметры влияют на распределение напряжений и развитие трещин, что позволяет создать точную картину взаимодействия трещин и контактных площадок [10].

Анализ изнашивания проводится пошагово, с учетом как детерминированных, так и случайных факторов, что обеспечивает реалистичное моделирование процесса. Параметры износа и повреждений корректируются в зависимости от состояния контактных участков, что позволяет учесть переход от одного вида изнашивания к другому. Итогом расчетов является определение профиля рельса в зависимости от накопленных повреждений, что позволяет выявить наиболее критичные зоны и предсказать потенциальные отказы (рис. 5).

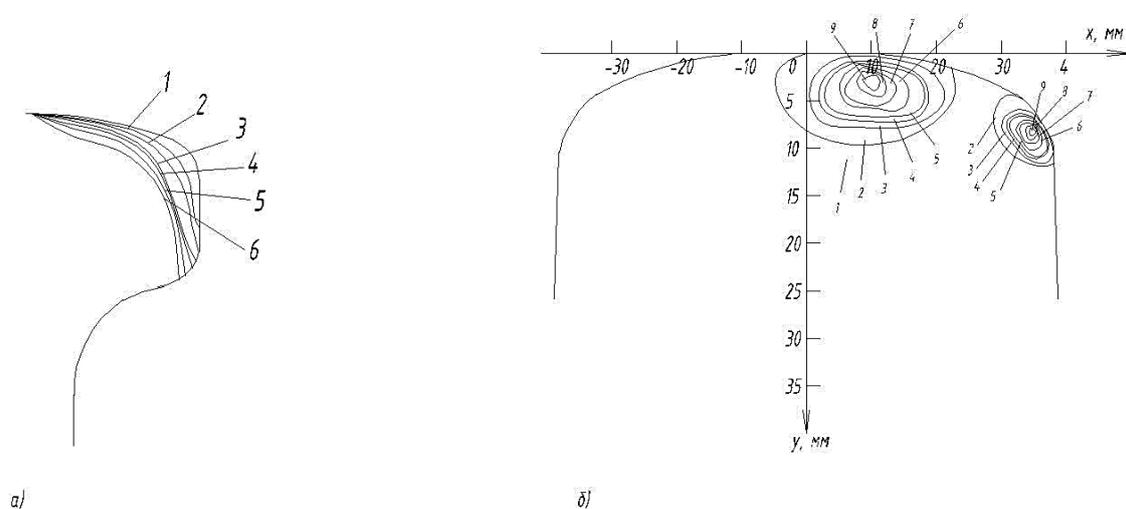


Рис. 5. Результаты расчетов изнашивания и накопления повреждений рельса при нагружении в кривых по модели [9]: а – эволюция профиля рельса (1 – 1,34 млн циклов; 2 – 2,68 млн циклов; 3 – 4,02 млн циклов; 4 – 5,37 млн циклов; 5 – 6,71 млн циклов; 6 – 8,05 млн циклов); б – распределение поврежденности (в условных единицах) в головке рельса (1 – 140; 2 – от 140 до 1500; 3 – от 1500 до 3000; 4 – от 3000 до 4300; 5 – от 4300 до 5800; 6 – от 5800 до 7200; 7 – от 7200 до 8600; 8 – от 8600 до 10000; 9 – 10000)

Fig. 5. Results of rail wear and damage accumulation calculations under loading in curves according to the model [9]: a – evolution of the rail profile (1 – 1.34 million cycles; 2 – 2.68 million cycles; 3 – 4.02 million cycles; 4 – 5.37 million cycles; 5 – 6.71 million cycles; 6 – 8.05 million cycles); b – distribution of damage (in arbitrary units) in the rail head (1 – 140; 2 – from 140 to 1500; 3 – from 1500 to 3000; 4 – from 3000 to 4300; 5 – from 4300 to 5800; 6 – from 5800 to 7200; 7 – from 7200 to 8600; 8 – from 8600 to 10000; 9 – 10000)

Результаты

Фрактографический анализ стадий развития трещин

Фактические результаты исследования включают детальный анализ механизма развития продольно-поперечных трещин. На рисунке 6 представлены схемы различных стадий развития подповерхностных трещин.

Эти трещины развиваются под углом 50–70° от вертикали, приобретая эллиптическую форму и распространяясь вдоль рельса. При этом их рост в поперечном направлении ограничен упрочненными приповерхностными слоями материала. На поздних стадиях развития воз-

возможен поворот плоскости трещины, что может привести либо к выходу трещины на поверхность, либо к ее углублению, что в конечном итоге может вызвать разрушение рельса.

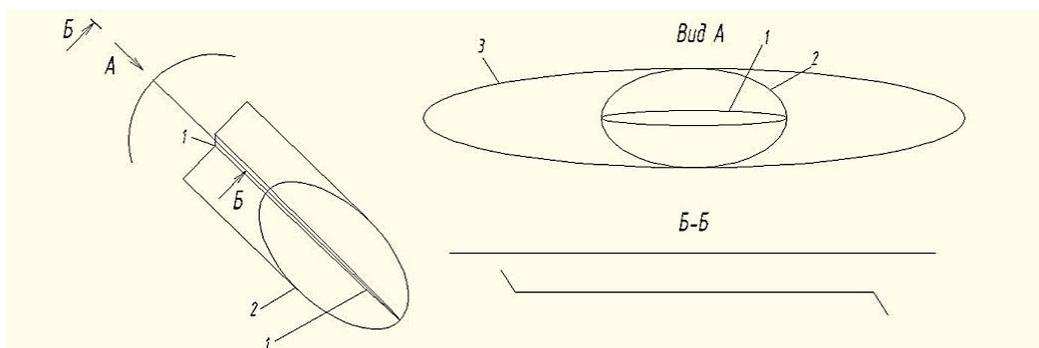


Рис. 6. Схема различных стадий развития подповерхностных трещин
 Fig. 6. Scheme of different stages of subsurface crack propagation

Результаты фрактографических исследований подтвердили, что минимальное значение $2\sigma_{th}$, зависящее от глубины залегания трещины и угла наклона ее фронта, находится в диапазоне 70–100 мкм при угле $\theta = 50 - 60^\circ$, что соответствует данным (см. рис. 7).

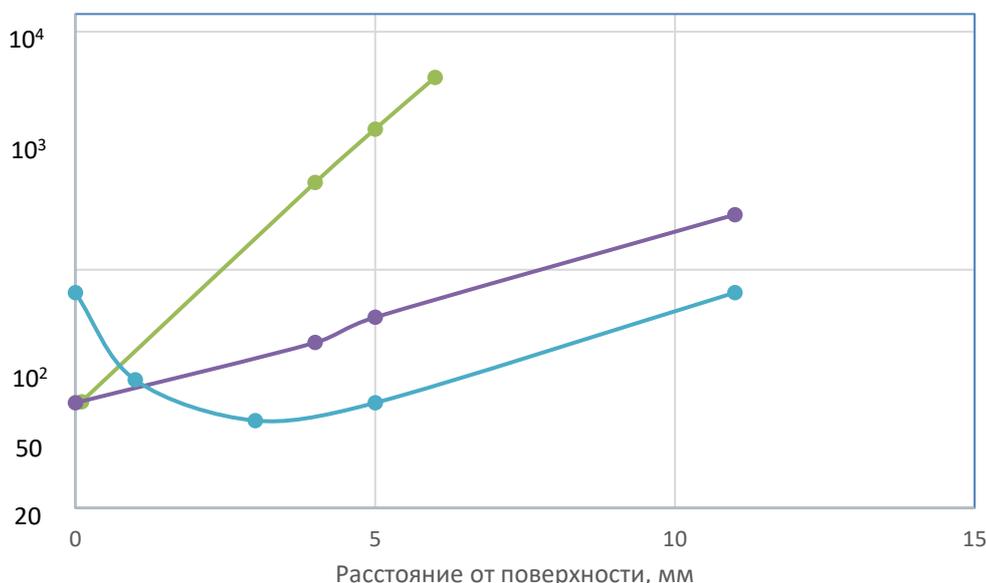


Рис. 7. Графики [2] зависимости предельно допустимого размера неразвивающейся трещины от глубины ее удаления от поверхности при различных возможных углах ее развития:

1 – $\theta = 0^\circ$; 2 – $\theta = 25^\circ$; 3 – $\theta = 50 - 60^\circ$

Fig. 7. Graphs [2] showing the dependence of the maximum allowable size of a non-propagating crack on its depth from the surface at various possible crack propagation angles:

1 – $\theta = 0^\circ$; 2 – $\theta = 25^\circ$; 3 – $\theta = 50 - 60^\circ$

Кроме того, расчетная глубина залегания трещины, соответствующая минимуму на графике (рис. 3), не всегда совпадает с наблюдаемыми значениями на практике. Это расхождение можно объяснить замедлением роста трещины вследствие высоких сжимающих остаточных напряжений, присутствующих вблизи поверхности рельса.

Моделирование и анализ траекторий трещин

Модель [6], представленная на рисунке 8, позволила провести расчеты для продольно-поперечной трещины и выявить влияние ее размера и расположения на напряженно-деформированное состояние в рельсе.

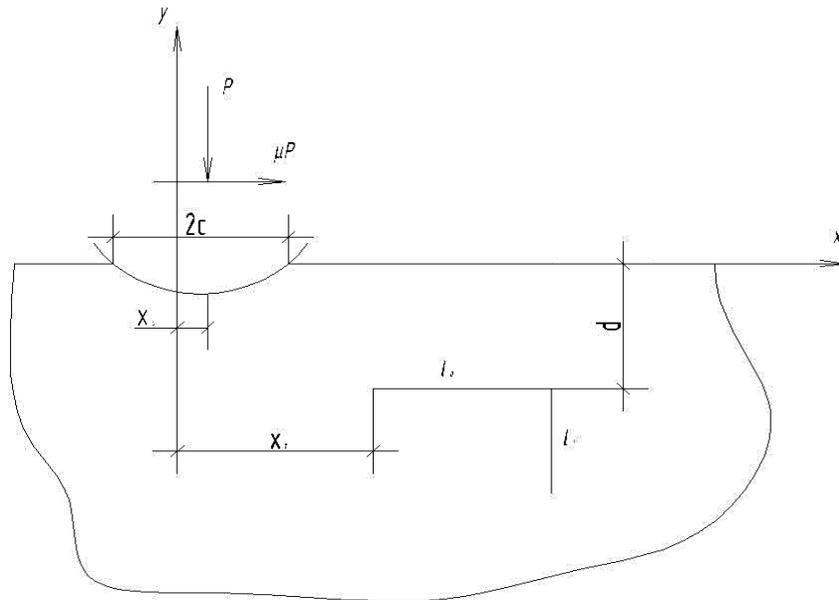


Рис. 8. Схема продольно-поперечной трещины в полуплоскости [6]
 Fig. 8. Schematic of a longitudinal-transverse crack in a semi-infinite plane [6]

Для упрощения задачи нагрузка от колеса была заменена приложением распределенной по площадке контакта силы, состоящей из нормальной (P) и касательной (fP) компонентов. Однако применение данной методики потребовало введения ряда упрощающих допущений. Во-первых, использована модель полуплоскости со сквозной трещиной. Принято, что можно суммировать силовые и остаточные напряжения для расчета полного поля напряжений, однако влияние трещин на изменение остаточных напряжений не учитывалось. Также не рассматривалось трение между берегами трещины, что может быть значимым при прохождении нагрузки непосредственно над трещиной. Дополнительно было принято, что поворот горизонтальной трещины на 90° реализуется при достижении длины трещины 10 мм, что частично подтверждается отсутствием поперечных ответвлений от продольных трещин длиной более 35 мм.

Построенная модель позволила провести расчеты для продольно-поперечной трещины (рис. 8) и выявить влияние размера и расположения трещин на напряженно-деформированное состояние в рельсе в рамках используемой плоской модели [11]. Эти результаты были сопоставлены с аналогичными расчетами для поперечной трещины, где отсутствовала горизонтальная компонента трещины и была только вертикальная трещина длиной l_1 .

На графике (рис. 9) представлены зависимости максимальных коэффициентов интенсивности напряжений в первой и второй модах для продольно-поперечной трещины, а также второй моды для поперечной трещины без горизонтальной компоненты. Для поперечной трещины коэффициент интенсивности напряжений по первой моде не приведен, так как такой дефект всегда закрыт при прохождении над ним контактной нагрузки. Развитие такого дефекта определяется второй модой в рамках рассматриваемой плоской расчетной схемы. В случае продольно-поперечного дефекта обе моды могут быть значимы: при малых относительных длинах трещины более важна первая мода, при больших – вторая.

Для оценки развития усталостных продольно-поперечных трещин применена зависимость:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 - K_{th}^2) \times \frac{(\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2)^{(m-1)/2}}{K - |K_{\max 1,2}|},$$

где $|K_{\max 1,2}|$ – максимальное (из обеих мод) значение коэффициента интенсивности напряжений в цикле нагружения (по линии 1 или 2 на рис. 9).

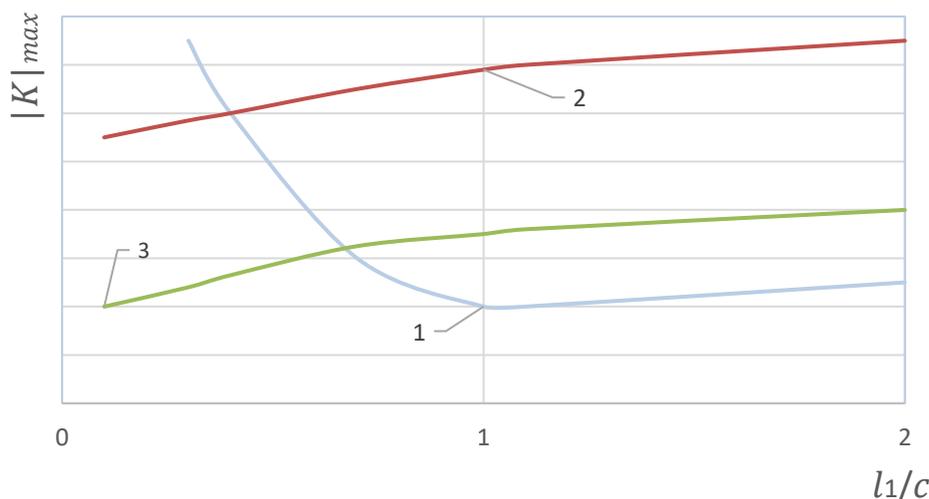


Рис. 9. Зависимость максимальных значений коэффициентов интенсивности напряжений по первой моде (1) и второй моде (2) для продольно-поперечной трещины (рис. 8), а также по второй моде (3) для поперечной трещины (рис. 8, но без горизонтальной трещины)

Fig. 9. Dependence of the maximum values of stress intensity factors for the first mode (1) and the second mode (2) for a longitudinal-transverse crack (Figure 8), as well as for the second mode (3) for a transverse crack (Figure 8, but excluding the horizontal crack)

Выбрав соответствующие геометрические параметры задачи, включая начальную длину трещины и приращение длины, можно построить расчетные кривые роста трещины.

Этот подход, несмотря на свои упрощения, дает возможность прогнозировать развитие трещин в условиях, близких к реальным эксплуатационным, и может быть полезен для разработки методов предотвращения разрушений рельсов.

На рисунке 10 представлены графики роста усталостных трещин в рельсах: продольно-поперечных и поперечных (по схеме на рис. 8). Эти данные наглядно демонстрируют, что продольно-поперечные трещины растут значительно быстрее, чем поперечные, что ускоряет разрушение рельса.

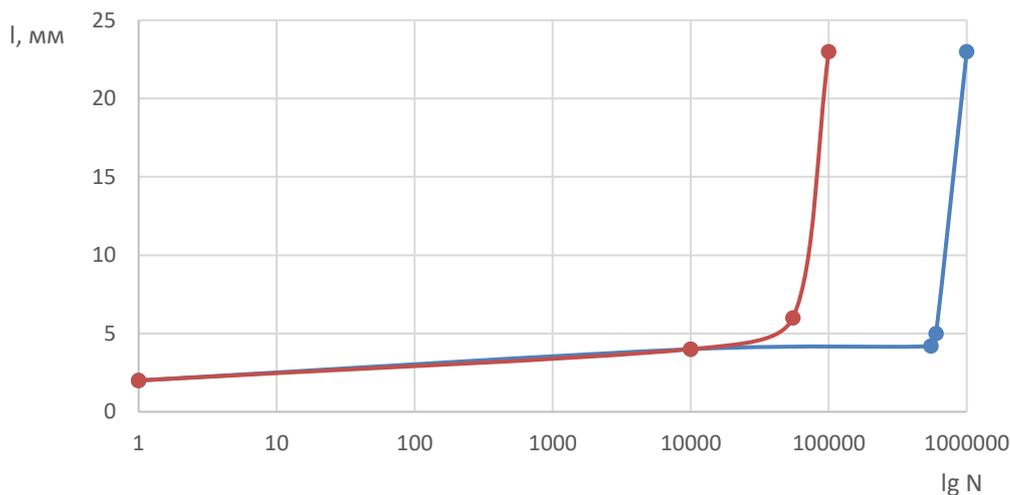


Рис. 10. Графики роста поперечных (1) и продольно-поперечных (2) трещин по схеме рис. 8

Fig. 10. Graphs of the growth of transverse (1) and longitudinal-transverse (2) cracks according to the scheme in fig. 8

Модель [6] предполагает ответвление поперечной трещины от продольной горизонтальной трещины фиксированной длины. В то же время работы [4–5] более детально исследуют возможность такого ответвления. В частности, модель [4] развития горизонтальной под

поверхностной трещины (на рис. 8 изображена только продольная трещина длиной l) включает влияние двух мод нагружения от скользящего индентора. Аспекты моделирования изменения траектории развития трещины – отклонение от горизонтали – подробно рассмотрены в этой работе (рис. 11).

Возможность отклонения траектории трещины оценивается на основе прочностного критерия. Практические наблюдения показали, что вершина трещины может развиваться по зигзагообразной траектории, сохраняя горизонтальное направление в макромасштабе, но со временем отклоняется от горизонтали (рис. 11).

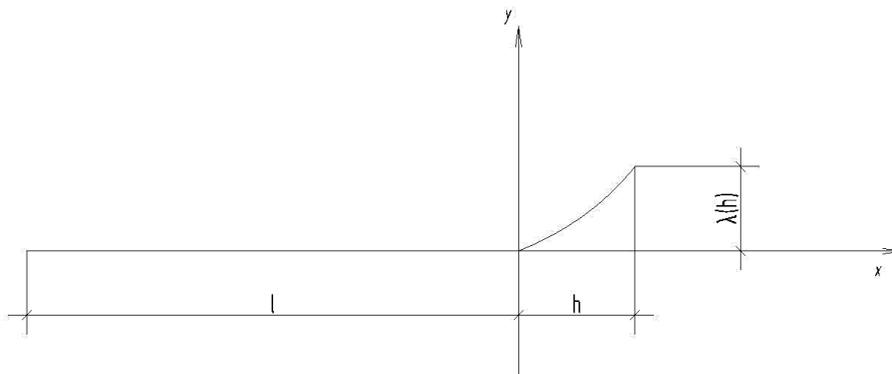


Рис. 11. Схема траектории трещины по модели [4]

Fig. 11. Schematic of the crack trajectory according to the model [4]

Эта траектория описывается уравнением:

$$\lambda(h) = \alpha h + \beta h^{3/2} + \gamma h^2,$$

где коэффициенты имеют геометрический смысл.

Из условия равенства коэффициента интенсивности напряжений второй моды ($K_2 = 0$) определяются значения параметров α , β , γ и малые приращения координат вершины трещины $x = h, y = \lambda$. Изменения коэффициентов β и γ позволяют сформулировать критерии устойчивого горизонтального развития трещины или ее отклонения к поверхности или вглубь полуплоскости.

Прохождение индентора над трещиной вызывает циклическое изменение нагрузки и, соответственно, изменение величины и знака коэффициента интенсивности напряжений K_2 . Поэтому необходимо вычислять минимальные и максимальные значения K_2 и оценивать их эффективное значение. Этот критерий оценки траектории трещины распространен и на случаи циклической нагрузки.

Расчеты показали, что возможны сценарии ответвления трещины вниз, особенно при увеличении нагрузки от колеса. Варианты изменения траектории двух краев трещины включают:

- развитие одного края вверх, а другого – вниз (наблюдается при значительном различии нагрузок на поезда, движущиеся в противоположных направлениях [12]);
- зигзагообразное малое приращение обоих краев при сохранении горизонтальности траектории.

Применение механики разрушения в работе [4], несмотря на приближенный характер модели, объясняет некоторые реальные сценарии развития подповерхностных трещин в рельсах.

Оценка вероятности повреждения рельса

По данным Георгиева, Межовой и Рейнхарда, после достижения трещиной длины 35 мм ответвление поперечной трещины становится маловероятным. Эти исследователи предполагают, что участок материала над трещиной может деформироваться особым образом, например, за счет пластического раскатывания поверхностного слоя [13]. При наезде колеса на такой дефект (рис. 12) могут возникнуть растягивающие напряжения у вершины трещины, что ведет к ее развитию по первой моде.

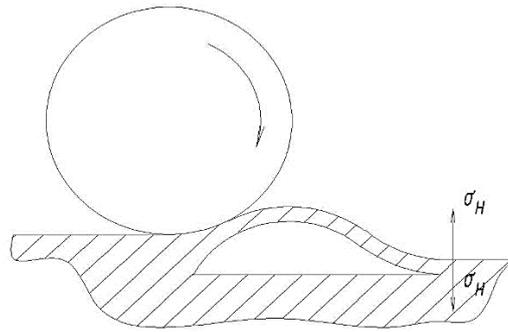


Рис. 12. Схема возможного перерастания продольной подповерхностной трещины в трещину нормального отрыва

Fig. 12. Schematic of the possible transition of a longitudinal subsurface crack into a normal separation crack

Для оценки вероятности повреждения рельса при наличии нескольких видов дефектов предлагается использовать формулу:

$$P = \left\{ 1 - \prod_{j=1}^3 [1 - P(A_j)] \right\} a_0 ,$$

где a_0 учитывает статистическую взаимосвязь событий A_j , соответствующих различным типам повреждений.

Функция плотности распределения критического значения коэффициентов интенсивности напряжений аппроксимирована функцией Вейбулла, а распределение коэффициентов для каждого вида дефектов – нормальными законами.

Сравнение результатов с существующими исследованиями

Интерпретация полученных результатов показала, что развитие продольно-поперечных трещин является более критичным фактором, чем развитие поперечных трещин, что видно из зависимости роста трещин на рисунке 10. Продольно-поперечные трещины растут значительно быстрее, что ускоряет разрушение рельса. Это подтверждается также расчетами, представленными на рисунке 9, где видно, что обе моды напряжений могут играть значимую роль в развитии трещин.

Сравнение с моделями, представленными в литературе [4–6], подтвердило, что предложенная методика расчетов дает адекватные прогнозы развития трещин. Однако следует отметить, что модель имеет ограничения, связанные с упрощениями, принятыми при расчетах. В частности, не учитывалось трение между берегами трещины и изменение остаточных напряжений в зависимости от развития трещины. Модель [9], предложенная для анализа изнашивания рельсов, может быть дополнена рассмотрением этапов развития трещин с применением приведенных выше зависимостей, что позволит улучшить точность прогнозирования и повысить надежность оценки состояния рельсов в процессе их эксплуатации [14].

Заключение

В ходе данного исследования были изучены механизмы развития продольно-поперечных трещин в рельсах, включая их возможное перерастание в трещины нормального отрыва. Полученные результаты позволили детально проанализировать влияние эксплуатационных факторов и остаточных напряжений на процессы трещинообразования, а также разработать модели, учитывающие эти параметры.

Сравнение с ожидаемыми результатами показывает, что продольно-поперечные трещины действительно имеют более высокие темпы роста, чем это предполагалось ранее. В частности, установлено, что влияние остаточных напряжений, возникающих из-за закалки рельсов и их износа, значительно усиливает процесс трещинообразования, что приводит к более быст-

рому разрушению рельсовых конструкций. Этот вывод подтверждается расчетными данными и экспериментальными наблюдениями, представленными в различных частях статьи.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их применения для разработки методов мониторинга и диагностики состояния рельсов в реальных условиях эксплуатации. Использование предложенных моделей и подходов позволит повысить безопасность железнодорожного транспорта, предотвратить аварийные ситуации и продлить срок службы рельсовых конструкций.

Рекомендации для дальнейших исследований включают необходимость более детального изучения влияния трения и динамических нагрузок на процесс трещинообразования. Кроме того, представляется целесообразным проведение экспериментальных исследований с использованием более сложных моделей, учитывающих все возможные факторы, влияющие на развитие трещин в рельсах. Также рекомендуется разработка и тестирование новых методов мониторинга состояния рельсов, основанных на предложенных моделях, что позволит оперативно выявлять критические дефекты и предотвращать их развитие.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Автор подтверждает ответственность за следующее: разработка концепции и дизайна исследования; сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста.

The author confirms responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдурашитов А.Ю. Исследование взаимосвязи между величиной бокового износа рельсов и процессом зарождения внутренних поперечных трещин в их головке // Тезисы докладов 2-го Международного симпозиума по трибофатике. ИМАШ, 1996. С. 96–97.
2. Marich S. Fatigue and fracture associated with surface and sub-surface defect in rails // Fracture prevention in energy and transport systems: Proc. Conf. Rio de Janeiro. Nov. 28, 1983. Vol. I. Warley, 1984. P. 25–36.
3. Смирнов В.И., Атрошенко С.А. О трещиностойкости рельса с поперечным усталостным дефектом // Актуальные вопросы прочности: сборник тезисов LXVII Международной конференции, Екатеринбург, 02–05 апреля 2024 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. С. 177–179. EDN: IXJLJN
4. Farris T.N., Keer L.M., Steele R.K. The effect of service loading on shell growth in rails // J. Vech. Phys. Solids. 1987. Vol. 35, no. 6. P. 677–700.
5. Wojcik R. Direction of crack growth initiation in roller contact: strain energy density criterion / Theor. and Appl. Fract. Mech. 1991. Vol. 15, no. 2. P. 191–198.
6. Yu M.M., Keer L.M. Growth of the sheel / transverse defect in rails // Trans. ASME. J. of Tribology. 1989. Vol. III. No. 4. P. 648–654.
7. Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Контактнo-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) // Заводская лаборатория. 1992. № 11. С. 44–61.
8. Сосновский Л.А., Махутов Н.Л. Методологические проблемы комплексной оценки поврежденности и предельного состояния силовых систем // Заводская лаборатория. 1991. № 5. С. 27–40.
9. Богданов В.М., Горячев А.П., Горячева И.Г. и др. Моделирование процессов контактирования, изнашивания и накопления повреждений в сопряжении колесо – рельс // Трение и износ. 1996. Т. 17, № 6. С. 12–26.
10. Смирнов В.И., Майер С.С. Многоцикловая трещиностойкость балки с внутренней трещиной в эксплуатационных условиях // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2(85). С. 68–74. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-2-68-74>
11. Смирнов В.И., Майер С.С. Влияние формы внутренней поперечной трещины на усталостную прочность балки при циклическом изгибе // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4(93). С. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-58-64>

12. Кошохов А.Д., Шур Е.А. Пластическая деформация головок рельсов с контактно-усталостными разрушениями // Вестник ВНИИЖТ. 1964. № 2. С. 52–55.
13. Тариков Г.П., Акулова Е.М. Определение трещиностойкости рельса при его контактном взаимодействии с колесом // Механика. Исследования и инновации. 2020. № 13. С. 147–153. EDN: UGSSCH.
14. Атрошенко С.А., Смирнов В.И. Механизмы разрушения рельсовой стали с внутренними трещинами после эксплуатации // Актуальные проблемы прочности (АПП-2023): материалы LXVI Международной конференции, Зеленогорск, Санкт-Петербург, 23–27 сентября 2023 года. Санкт-Петербург: Изд-во ВВМ, 2023. С. 72. EDN: PSWSKW

REFERENCES

1. Abdurashitov A.Yu. Research on the connection between lateral rail wear magnitude and the initiation of internal transverse cracks in the rail head. *Abstracts of the 2nd International Symposium on Tribofatigue*. IPME, 1996, pp. 96–97. (In Russ.).
2. Marich S. Fatigue and fracture associated with surface and sub-surface defect in rails. *Fracture prevention in energy and transport systems: Proc. Conf. Rio de Janeiro. Nov. 28, 1983*. Vol. I. Warley, 1984, pp. 25–36.
3. Smirnov V.I., Atroshenko S.A. On the fracture toughness of a rail with a transverse fatigue defect. *Actual Problems of Strength: abstracts of the LXVII international conference, Yekaterinburg, April 02–05, 2024*. Yekaterinburg, Ural State Mining University, 2024, pp. 177–179. (In Russ.).
4. Farris T.N., Keer L.M., Steele R.K. The effect of service loading on shell growth in rails. *J. Vech. Phys. Solids*, 1987, vol. 35, no. 6, pp. 677–700.
5. Wojcik R. Direction of crack growth initiation in roller contact: strain energy density criterion. *Theor. and Appl. Fract. Mech*, 1991, vol. 15, no. 2, pp. 191–198.
6. Yu M.M., Keer L.M. Growth of the sheel / transverse defect in rails. *Trans. ASME. J. of Tribology*, 1989, vol. III, no. 4, pp. 648–654.
7. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Shurinov V.A. Contact-mechanical fatigue: main patterns (overview article). *Zavodskaya Laboratoriya*, 1992, no. 11, pp. 44–61. (In Russ.).
8. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.L. Methodological issues of comprehensive assessment of damage and limit state of power systems. *Zavodskaya Laboratoriya*, 1991, no. 5, pp. 27–40. (In Russ.).
9. Bogdanov V.M., Goryachev A.P., Goryacheva I.G. et al. Modeling of contact, wear, and damage accumulation processes in rail interaction. *Friction and Wear*, 1996, vol. 17, no. 6, pp. 12–26. (In Russ.).
10. Smirnov V.I., Maier S.S. Multicycle crack resistance of a beam with an internal crack under operational conditions. *Vestnik of Civil Engineers*, 2021, no. 2(85), pp. 68–74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-2-68-74>
11. Smirnov V.I., Mayer S.S. Effect of the shape of an internal transverse crack on the fatigue strength of a beam under cyclic bending. *Vestnik of Civil Engineers*, 2022, no. 4(93), pp. 58–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-58-64>
12. Koshokhov A.D., Shur E.A. Plastic deformation of rail heads with contact-fatigue failures. *Vestnik VNIIZHT*, 1964, no. 2, pp. 52–55. (In Russ.).
13. Tarikov G.P., Akulova E.M. Determination of rail fracture resistance during its contact interaction with the wheel. *Mechanics: Research and Innovations*, 2020, no. 13, pp. 147–153. (In Russ.).
14. Atroshenko S.A., Smirnov V.I. Mechanisms of failure in rail steel with internal cracks after operation. *Current Issues in Strength (APP–2023): Proceedings of the LXVI International Conference. Zelenogorsk, St. Petersburg, September 23–27, 2023*. St. Petersburg, VVM Publishing House, 2023, pp. 72. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майер Сергей Сергеевич – соискатель, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

✉ sergzo@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4917-2578>

Sergei S. Maier, Graduate Applicant, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 21.08.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 30.10.2024.

Принята к публикации / Accepted: 09.12.2024.