

УДК 69.04

С. С. Майер

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ РЕЛЬСОВ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И МОДЕЛИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Проблема оценки долговечности железнодорожных рельсов и развития трещин в головке рельса является актуальной для обеспечения надежности и безопасности железнодорожного транспорта. В статье представлено исследование, направленное на оценку влияния различных видов нагрузок, температурных изменений и остаточных напряжений на развитие трещин в головке рельса. Целью исследования является разработка и уточнение моделей, описывающих динамику трещин, а также улучшение методов прогнозирования долговечности рельсов. Для достижения поставленной цели использованы методы аналитического моделирования и экспериментального анализа. Оценены различные виды нагрузок, включая температурные и механические, а также влияние остаточных напряжений на коэффициенты интенсивности напряжений и рост трещин. Представлены модели и уравнения для расчета коэффициентов интенсивности напряжений, учитывающие комплексные нагрузки и реальные условия эксплуатации рельсов. Результаты исследования подтверждают гипотезу о значительном влиянии температурных и механических нагрузок на развитие трещин и их коэффициенты интенсивности напряжений. На основе полученных данных разработаны усовершенствованные модели, которые показывают более точные прогнозы долговечности рельсов по сравнению с существующими. Работа выявила необходимость дальнейших исследований для учета остаточных напряжений и реальных условий эксплуатации, что может улучшить методы прогнозирования и предотвращения разрушений рельсов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: железнодорожные рельсы, трещины в рельсе, коэффициенты интенсивности напряжений, температурные нагрузки, механические нагрузки, остаточные напряжения, долговечность рельсов.

Введение

Трещиностойкость железнодорожных рельсов остается одной из ключевых проблем в обеспечении безопасности и экономической эффективности железнодорожного транспорта. Повреждения рельсов, такие как пластическое деформирование, износ, а также зарождение и развитие усталостных трещин до размеров, при которых возможно разрушение рельса, приводят к значительным экономическим потерям и могут вызывать аварийные ситуации. Согласно статистике, аварийная замена разрушенного рельса не только вызывает нарушение графика движения поездов, но и сопряжена с серьезными финансовыми затратами [1].

Наибольшую опасность представляют усталостные трещины, которые могут развиваться под воздействием эксплуатационных нагрузок, приводя к внезапному хрупкому разрушению рельсов [2]. Эти трещины часто начинаются как микроскопические дефекты, возникающие на поверхностях трения (например, на поверхности катания), и со временем прогрессируют, распространяясь внутрь материала рельса. Важно отметить, что около 82 % трещин в рельсах образуется на поверхностях трения, из них 58 % — на поверхности катания, и 25...75 % дефектов на железных дорогах связаны с наиболее опасными внутренними поперечными трещинами, которые развиваются из подповерхностных трещин в головке рельса [3—5].

Актуальность исследования обусловлена недостаточной разработанностью методик расчета допустимых размеров трещиноподобных дефектов, что является значительным пробелом в существующей научной литературе. Используемые подходы дефектоскопии рельсов являются дорогостоящими, проведение частых инспекций экономически нецелесообразно. Это требует разработки методов, которые позволяют определить критические размеры дефектов, при которых возможен их безопасный допуск в эксплуатацию, и предотвратить внезапное разрушение рельсов под колесами поездов [1, 6].

На данный момент методы оценки трещиностойкости рельсов включают как экспериментальные, так и расчетные подходы. Значительное внимание уделяется расчетным методам, основанным на принципах линейной механики разрушения. Эти методы базируются на том, что рельсовая сталь находится в квазихрупком состоянии при эксплуатационных температурах, а пластическая деформация материала в рельсе ограничена, особенно вблизи вершины наиболее опасных трещиноподобных дефектов. Однако некоторые типы исходных дефектов, такие как микрополости и коррозионные участки, не соответствуют классическим моделям линейной механики разрушения [7, 8]. Это создает необходимость в пересмотре и усовершенствовании методов для более точного прогнозирования критического поведения дефектов.

Ряд исследований по данной проблеме сосредоточен на разработке и верификации моделей трещиностойкости рельсовых сталей. Среди них можно выделить исследования по определению критических условий разрушения рельсов с поперечными трещинами, использующие упрощенные зависимости для коэффициентов интенсивности напряжений и модели трещин в полупространстве [8—12]. Однако эти модели имеют ряд ограничений, поскольку не учитывают сложное взаимодействие различных типов нагрузок и воздействий окружающей среды, что является еще одной важной проблемой для дальнейшего исследования.

С учетом указанных недостатков основная цель настоящего исследования заключается в анализе применимости различных методов механики разрушения к задаче прогнозирования трещиностойкости рельсов и определения критических размеров трещиноподобных дефектов, способных привести к хрупкому разрушению. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику для оценки допустимых размеров трещиноподобных дефектов с учетом всех основных эксплуатационных нагрузок и условий.
2. Сравнить результаты расчетных методов с экспериментальными данными для верификации предложенных моделей.
3. Проанализировать влияние различных типов дефектов и условий нагружения на риск внезапного разрушения рельсов.

Материалы и методы

Исследование трещинообразования в головке рельса

Для исследования процессов развития трещин в головке рельса использовались аналитические методы и методы численного моделирования. Рассмотрены поверхностные трещины, которые в начальной стадии можно аппроксимировать как полуэллиптические дефекты в полупространстве. Это упрощение оправдано до тех пор, пока размеры трещины малы и форма

дефекта близка к эллиптической. В данном случае коэффициент интенсивности напряжений K_I остается постоянным вдоль всего фронта трещины, когда соотношение полуосей эллипса равно 1,5 [2].

Однако по мере увеличения трещины начинают сказываться ограничения, накладываемые геометрией рельса (рис. 1). Фронт трещины вытягивается к свободным боковым поверхностям, стремясь к прямолинейной форме (рис. 1, в), что позволяет схематизировать ее как краевую трещину в прямоугольном брусе конечной ширины (рис. 1, е). Такой подход обеспечивает более точное представление о характере трещинообразования в головке рельса при ограниченных размерах.

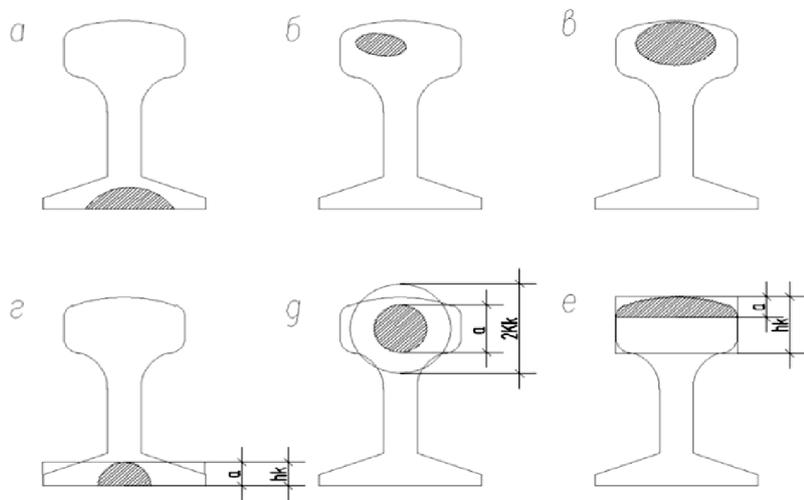


Рис. 1. Три наиболее типичных поперечных повреждения головки и подошвы рельса (а—в) и их расчетные схемы (г—е)

Оценка влияния различных видов нагрузок

Для оценки влияния различных видов нагрузок на развитие трещин применялись приближенные зависимости [13]. Исследование учитывало нагрузки различной природы, включая температурные изменения, изгибы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, контактные напряжения от колеса, а также остаточные напряжения. В частности, температурные деформации, вызванные изменениями температуры, рассчитывались по формуле:

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T,$$

где E — модуль Юнга; α — коэффициент линейного расширения; ΔT — изменение температуры.

Эти напряжения приводят к образованию коэффициентов интенсивности напряжений K_I , которые зависят от геометрии трещины и распределения температурного поля [2].

Для внутренних (овальных) трещин в головке рельса под воздействием нескольких видов напряжений выведены формулы для соответствующих коэффициентов интенсивности напряжений (рис. 1, б).

Моделирование и расчет коэффициентов интенсивности напряжений

Контактные напряжения, возникающие от воздействия колеса на рельс, нагружают эллиптическую трещину по второй и третьей моде. Максимальные нагрузки возникают, когда колесо расположено прямо над трещиной. При этом напряжения и их коэффициенты интенсивности могут быть выражены следующими формулами:

$$K_2 = 0,75\tau\sqrt{\pi a}, \quad K_3 = 0,52\tau\sqrt{\pi a}.$$

Суммарные значения коэффициента интенсивности напряжений, которые учитывают все виды нагрузок, определяются как:

$$K_{1\Sigma} = K_1 + K_2 + K_3 = 1,96\sigma_T\sqrt{a/\pi} + (2/\pi)\sigma_V\sqrt{a} + \\ + (2/\pi)\sigma_L\sqrt{a} + 0,75\tau\sqrt{\pi a} + 0,52\tau\sqrt{\pi a}.$$

Метод позволяет учитывать контактные и остаточные напряжения и дает более полное представление о возможных сценариях разрушения рельса [2].

Расчеты долговечности рельсов

Для прогнозирования долговечности рельсового полотна использовались как экспериментальные данные, так и расчетные методы [14]. Проведены исследования, оценивающие долю площади, занимаемой трещиной, по отношению к площади поперечного сечения рельса (рис. 2). Учитывались данные о величине остаточных напряжений, которые максимальны на глубине около 8 мм от поверхности катания и уменьшаются линейно с увеличением глубины [5]. Исследования показали, что такие модели могут быть полезны для предварительных оценок, хотя не учитывают всех возможных факторов и условий эксплуатации рельсов в реальных условиях [5].

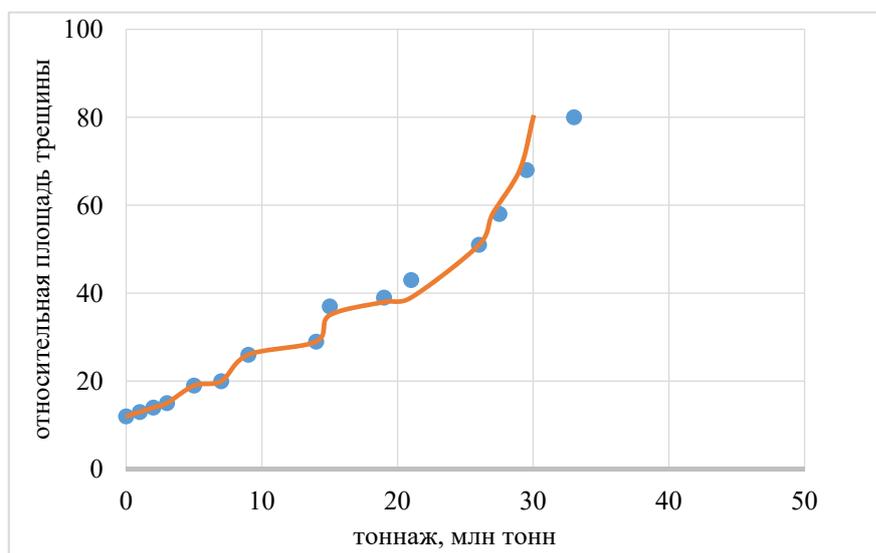


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных о процентном отношении площади трещины к площади сечения рельса (точки) и расчетных (линия) результатов при учете влияния боковой нагрузки (0,05 от вертикальной нагрузки на колесо)

Экспериментальные исследования формы трещин

Проводились экспериментальные исследования формы внутренних трещин в головке рельса (рис. 3). Предложено описание контура трещины в виде овала четвертой степени, что соответствует реальной геометрии дефектов, выявленных в ходе исследований (рис. 3, б):

$$\left(\frac{x}{a}\right)^4 + \left(\frac{y}{b}\right)^4 = 1,$$

где a и b — полуоси овала.

Данная схема применялась для испытаний рельсов с дефектами в лабораторных условиях, что позволило получить данные для расчета коэффициентов интенсивности напряжений при различных видах нагрузок (рис. 3, а) [1, 15]. Формулы, выведенные на основе этих данных, позволили учитывать влияние остаточных, температурных и других компонентов растягивающих напряжений, действующих вдоль оси рельса.

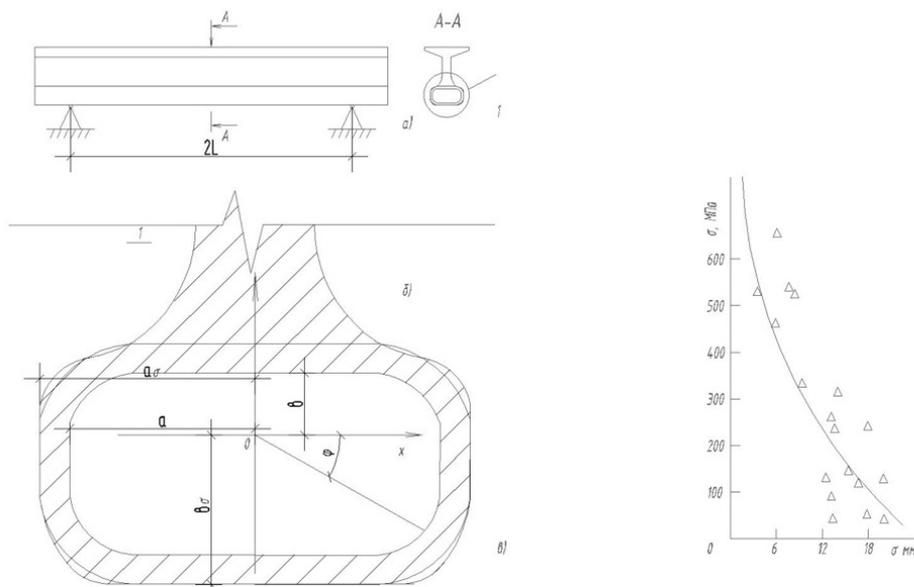


Рис. 3. Экспериментальные исследования рельса: а — схема испытаний рельса на трехточечный изгиб; б — схема внутренней овальной трещины в головке рельса; в — расчетная зависимость (линия) критических размеров трещин в головке нетермообработанных рельсов от напряжений и экспериментальные (точки) результаты испытаний на статический изгиб [1, 16]

Применение теоретических моделей для оценки критических размеров трещин

Полученные экспериментальные и расчетные данные использовались для оценки критических размеров трещин в рельсах, а также для прогноза их роста под воздействием различных нагрузок (см. рис. 3, в). В модели учитывались усталостные свойства материала рельса, тип трещины и ее расположение. Результаты расчетов на основе уравнения Париса и интегрирования

позволяют получить выражения для числа циклов подрастания трещины до критического размера:

$$N_p = \frac{b_0}{C_0 (Mb_0^{3/2} / I_0)^n} \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{[F(\varepsilon_i)]^n},$$

где параметры уравнения Париса определены при испытаниях на циклическую трещиностойкость:

$$n = 3,1 \text{ и } C_0 = 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ — для необработанной стали,}$$

$$n = 2,5 \text{ и } C_0 = 3,86 \cdot 10^{-12} \text{ — для термически упрочненной стали.}$$

Эти данные оказались полезны для оценок живучести рельсов и их долговечности в условиях реальной эксплуатации.

Результаты

Поверхностные и внутренние трещины: особенности роста и формы

Исследование показало, что на начальных стадиях развития поверхностные трещины в головке рельса можно эффективно аппроксимировать как полуэллиптические дефекты в полупространстве. При соотношении полуосей 1,5 коэффициент интенсивности напряжений K_1 остается постоянным по всему фронту трещины, что подтверждает устойчивое развитие усталостной трещины на данном этапе (см. рис. 1, в). Однако по мере увеличения размеров трещины и ее взаимодействия с геометрией рельса наблюдается значительное изменение формы дефекта. Трещина вытягивается к свободным боковым поверхностям, приближаясь к прямолинейной форме, что подтверждает гипотезу о схематизации ее как краевой трещины в прямоугольном брусе конечной ширины.

Для внутренних трещин, расположенных в головке рельса, характерно формирование овальной формы, что подтверждено расчетами и экспериментальными данными (см. рис. 1, б). Полученные результаты демонстрируют, что трещины такого типа подвержены воздействию нескольких видов напряжений, которые определяют коэффициенты интенсивности напряжений. Рассчитанные значения K_1 , K_2 и K_3 в зависимости от нагрузки свидетельствуют о высокой чувствительности дефектов к контактным и остаточным напряжениям. Максимальная нагрузка возникает при расположении колеса непосредственно над трещиной, что приводит к наибольшим значениям коэффициентов интенсивности напряжений K_2 и K_3 .

Анализ воздействия температурных и механических нагрузок

Температурные напряжения, возникающие в результате изменений температуры, создают значительные дополнительные напряжения в головке рельса, что также влияет на развитие трещин. Исследования показали, что коэффициент интенсивности напряжений в верхней и нижней точках трещины достигает значения

$$K_1 = 1,96\sigma_T \sqrt{a/\pi},$$

а в крайних по горизонтали точках

$$K_1 = 1,7\sigma_T \sqrt{a / \pi}.$$

Этот результат подчеркивает необходимость учета температурных факторов при оценке долговечности рельсового полотна.

Изгибы в вертикальной и горизонтальной плоскостях также создают значительные напряжения. При изгибе в вертикальной плоскости возникает номинальное напряжение σ_v , соответствующий коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_1 = 2\sigma_T \sqrt{a} / \pi.$$

При изгибе в горизонтальной плоскости — соответственно σ_L ,

$$K_1 = 2\sigma_L \sqrt{a} / \pi.$$

Эти данные подтверждены как расчетами, так и экспериментами, что свидетельствует о важности учета всех направлений изгиба при прогнозировании усталостного поведения рельсов.

Оценка остаточных напряжений и их влияние на развитие трещин

Остаточные напряжения, возникающие на глубине около 8 мм от поверхности катания рельса, также играют важную роль в развитии дефектов. Они изменяются по линейному закону с увеличением глубины по формуле:

$$\sigma_r = 56,4 - 1,82S.$$

Соответствующие коэффициенты интенсивности напряжений вычислялись по формуле:

$$K_1 = 2\sigma_r \sqrt{a} / \pi.$$

Таким образом, остаточные напряжения оказывают значительное влияние на рост трещин, особенно на начальных стадиях их развития [5].

Применение комплексных подходов к моделированию роста трещин

В ходе исследований проанализированы модели, предложенные различными авторами для прогнозирования роста трещин в рельсах. Например, метод, предложенный П. Тоунэндом, учитывает влияние множества видов нагрузок, что позволяет оценить развитие трещины более комплексно. Результаты таких подходов подтверждены экспериментальными данными и показали, что комбинированные модели могут улучшить точность прогнозирования долговечности рельсов [2].

Для трещин больших размеров, для которых обычные аналитические методы недостаточны, предложены новые подходы к моделированию. В частности, схематизация контура трещины в виде овала четвертой степени позволила создать более точные модели расчета коэффициентов интенсивности напряжений в условиях сложных нагрузок. Результаты расчетов показали, что такие подходы дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными при испытаниях рельсов на трехточечный изгиб (см. рис. 3, в) [1, 16].

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Для оценки применимости различных моделей сопоставлены расчетные и экспериментальные значения коэффициентов интенсивности напряжений и критических размеров трещин. Результаты расчетов показали удовлетворительное соответствие экспериментальным данным (см. рис. 1, в). Анализ зависимости критических размеров трещин от приложенных напряжений демонстрирует достаточно хорошее совпадение, хотя для больших размеров трещин наблюдается значительное рассеивание данных, что, вероятно, связано с различиями в условиях проведения экспериментов и реальной эксплуатации рельсов [1].

Прогнозирование числа циклов роста трещин

На основании формулы для коэффициента интенсивности напряжений и уравнения Париса проведена оценка числа циклов до достижения трещиной критического размера. Для различных типов рельсовой стали, включая необработанную и термически упрочненную, определены значения параметров уравнения Париса.

Результаты этих расчетов хорошо согласуются с данными стендовых испытаний и показывают возможность использования подобных моделей для прогнозирования усталостной долговечности рельсов в условиях реальной эксплуатации.

Оценка эксплуатационной долговечности рельсов

С помощью полученных коэффициентов интенсивности напряжений и расчетных моделей проведена оценка эксплуатационной долговечности рельсов, выраженная в тоннаже, прошедшем по рельсам до их критического износа (рис. 4). Данные показывают, что расчетная долговечность рельсов при различных нагрузках на ось соответствует фактическим эксплуатационным данным, подтверждая корректность примененных методов оценки [17, 18].

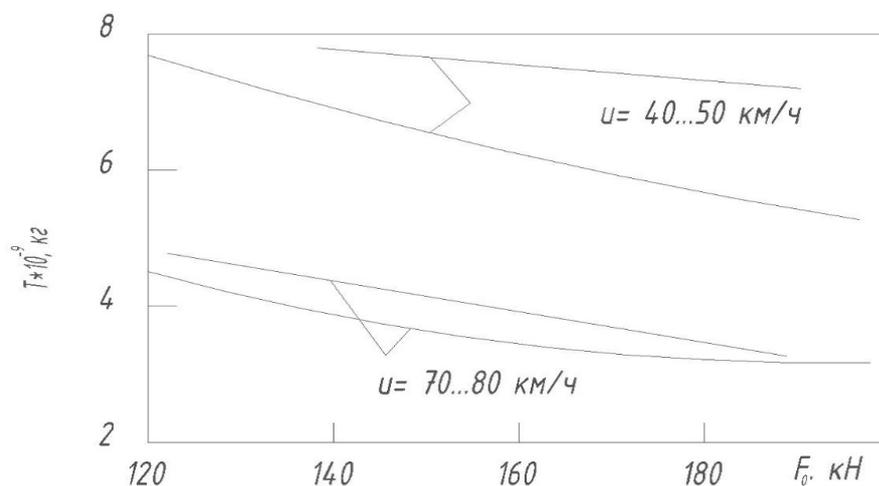


Рис. 4. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (штриховые линии) зависимости живучести рельсов от осевой нагрузки для двух диапазонов скоростей движения поезда

Эти результаты подчеркивают важность комплексного подхода к изучению процессов разрушения рельсов и необходимость учета множества факторов, влияющих на долговечность рельсов в реальных условиях эксплуатации.

Обсуждение результатов

Исследование динамики трещин в головке рельса позволило сделать ряд выводов, имеющих важное значение для понимания процессов разрушения рельсового полотна и его долговечности. Результаты нашего исследования подтверждают теоретические гипотезы о влиянии различных видов нагрузок и температурных изменений на развитие трещин. Они также выявляют ряд аспектов, требующих дальнейшего рассмотрения и уточнения.

Сравнение с результатами других авторов

Наши данные о развитии поверхностных трещин в виде полуэллиптических дефектов согласуются с результатами работ [2, 19], где также обсуждалось устойчивое развитие трещин при определенных соотношениях полуосей. В этом контексте наблюдения о переходе трещин к прямолинейной форме по мере их роста, когда геометрические ограничения рельса становятся значительными, подтверждают предыдущие выводы.

Исследования внутренней овальной трещины в головке рельса, проведенные в работе [1], также показали, что коэффициенты интенсивности напряжений зависят от многовидовой нагрузки. Результаты нашего исследования, соответствующие этим данным, подтверждают, что комплексные модели, учитывающие воздействие различных видов нагрузок, позволяют более точно прогнозировать развитие трещин [20].

Тем не менее, наши результаты несколько отклоняются от ранее представленных моделей, особенно в части оценки влияния остаточных напряжений. В отличие от более упрощенных моделей [5] наше исследование показало, что остаточные напряжения оказывают значительное влияние на рост трещин, особенно на начальных стадиях, что требует более точного учета при расчете долговечности рельсов.

Соответствие гипотезе исследования

Поставленные в начале исследования гипотезы о значении различных видов нагрузок, температурных изменений и остаточных напряжений для роста трещин в рельсовом полотне оказались в целом верными. Результаты подтвердили, что температурные и механические нагрузки имеют существенное влияние на коэффициенты интенсивности напряжений и рост трещин. Особое внимание следует уделить тому, что температурные напряжения, как и остаточные, оказывают более заметное влияние, чем предполагалось изначально.

Однако выявлены ограничения текущих моделей. Например, модели, предполагающие идеализированные формы трещин и нагрузки, не всегда точно отражают реальные условия эксплуатации рельсов. Это согласуется с замечаниями, выдвинутыми в [5], где подчеркивается необходимость уточнения расчетных моделей для более точного прогноза.

Ограничения исследования и обобщение результатов

Основные ограничения нашего исследования связаны с применением упрощенных моделей для сложных дефектов и нагрузок. Модели, учитывающие только определенные виды напряжений или предполагающие идеальные формы трещин, могут не всегда полностью отражать реальную ситуа-

цию. Это особенно касается трещин больших размеров, где рассеивание экспериментальных данных наблюдается в значительной степени.

Системное осмысление результатов показывает, что использование комплексных подходов к моделированию трещин, включая более точные расчетные модели и учет реальных условий эксплуатации, может существенно повысить точность прогнозирования долговечности рельсов. Данные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований, направленных на улучшение существующих моделей и методов оценки.

Заключение

В ходе исследования подтверждено, что поверхностные трещины в головке рельса на начальных стадиях можно эффективно моделировать как полуэллиптические дефекты, а по мере их роста форма трещин изменяется в зависимости от геометрии рельса и нагрузки. Оценка влияния температурных и механических нагрузок на коэффициенты интенсивности напряжений подтвердила значительное влияние этих факторов на развитие трещин.

Наши результаты показывают, что существующие модели, хотя и эффективны в некоторых аспектах, требуют дальнейшего уточнения и улучшения. Особенно важно учитывать остаточные напряжения и реальные условия эксплуатации при прогнозировании долговечности рельсов. Надо отметить, что комплексные модели и более точные подходы к расчетам могут значительно повысить точность прогнозирования. Рекомендуется продолжить работу над улучшением моделей расчета трещин и более глубоким изучением влияния различных факторов на долговечность рельсов для обеспечения надежной эксплуатации железнодорожного полотна в реальных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур Е. А., Кисилева Т. Н., Порошин В. Л., Бейзеров М. С. Прочность рельсов с трещинами // Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 2. С. 48—52.
2. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Шуринов В. А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) // Заводская лаборатория. 1992. № 11. С. 44—61.
3. Marich S. Fatigue and fracture associated with surface and sub-surface defect in rails // Fracture prevention in energy and transport systems: Proc. Conf. 1984. Pp. 25—36.
4. Апрошенко С. А., Майер С. С., Смирнов В. И. Анализ разрушения перлитной рельсовой стали с внутренней макротрещиной // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. № 5. С. 575—581.
5. Orringer O., Steele R. K. Structural integrity of rail in railroad track in the United States // Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium. 1988. No. 969. Pp. 260—278.
6. 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.
7. Rungta R., Rice R. C., Buchheit R. D., Brock D. An investigation of shell and detail cracking in railroad rails // Corrosion, microstructure and metallography: Proc. 16th Ann. Techn. Meet. Int. Metallogr. Soc. 1983. Pp. 383—406.
8. Шур Е. А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1977. № 8. С. 38—41.
9. Meghoo A., Loendersloot R., Tinga T. Rail wear and remaining life prediction using meta-models // Int. J. Rail Transp. 2020. Vol. 8. Pp. 1—26.
10. Mechanism Analysis of Spalling Defect on Rail Surface under Rolling Contact Conditions // R. Yang, S. Cao, W. Kang, J. Li, X. Jiang // Math. Probl. Eng. 2018. Vol. 3. Pp. 1—10.
11. Liu X., Markine V. L. Train hunting related fast degradation of a railway crossing-condition monitoring and numerical verification // Sensors. 2020. Vol. 20. 2278.
12. El-Sayed H. M., Lotfy M., El-Din Zohny H. N., Riad H. S. Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis // Ain Shams Eng. J. 2018. Vol. 9. 2329—2342.

13. Multi-criteria evaluation of wheel/rail degradation at railway crossings / Z. Wei, A. Núñez, X. Liu, R. Dollevoet, Z. Li // Tribol. Int. 2019. Vol. 144. Pp. 106—107.
14. *Игнатъев А. В., Бочков М. И., Иванов С. Ю.* Методика расчета балок с односторонними связями на действие подвижной нагрузки с помощью МКЭ в форме классического смешанного метода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Вып. 2(75). С. 49—57.
15. *Андрейкив А. Е., Шур Е. А., Панько И. Н.* Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для внутренней поперечной трещины в головке рельса // Физ.-хим. механика материалов. 1980. № 1. С. 95—97.
16. *Мураками Ю.* Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х тт. М.: Мир, 1990. Т. 1. 48 с. Т. 2. 1016 с.
17. *Андрейкив А. Е., Шур Е. А., Дарчук А. И.* Прогнозирование живучести железнодорожных рельсов в условиях эксплуатации // Физ.-хим. механика материалов. 1988. № 2. С. 88—91.
18. *Панасюк В. В.* Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие. Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 1990. 680 с.
19. *Nishida S., Sugino K., Urashima C., Masimoto H.* Study on contact rolling fatigue of rails // Bul. JSME. 1985. Vol. 28. Iss. 243. Pp. 1819—1824.
20. Method for evaluating the performance of railway crossing rails after long-term service / Z. Wei, A. Núñez, A. Boogaard, R. Dollevoet, Z. Li // Tribol. Int. 2018. Vol. 123. Pp. 337—348.

© *Майер С. С.*, 2024

*Поступила в редакцию
в октябре 2024 г.*

Ссылка для цитирования:

Майер С. С. Прогнозирование разрушения рельсов: новые подходы и модели трещинообразования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 56—67. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_56.

Об авторе:

Майер Сергей Сергеевич — соискатель, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Российская Федерация, 190068, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9; sergzo@bk.ru; ORCID: 0000-0003-4917-2578

Sergei S. Maier

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

PREDICTION OF RAIL FAILURES: NEW APPROACHES AND CRACK FORMATION MODELS

The issue of assessing the durability of railway rails and the development of cracks in the rail head is critical for ensuring the reliability and safety of railway transport. This paper presents a study aimed at evaluating the impact of various types of loads, temperature changes, and residual stresses on the development of cracks in the rail head. The research goal is to develop and refine models that describe the dynamics of crack propagation, as well as to improve methods for predicting rail longevity. To achieve the research objectives, methods of analytical modeling and experimental analysis were employed. Various types of loads, including thermal and mechanical, were evaluated, as well as the influence of residual stresses on stress intensity factors and crack growth. The paper presents models and equations for calculating stress intensity factors, accounting for complex loads and actual rail operating conditions. The research results confirm the hypothesis of the significant influence of thermal and mechanical loads on crack development and their stress intensity factors. Based on the obtained data, enhanced models were developed, providing more accurate predictions of rail longevity compared to existing ones. The study highlighted the need for further research to account for residual stresses and real operating conditions, which may improve rail failure prediction and prevention methods.

Key words: rails, rail cracks, stress intensity factors, thermal loads, mechanical loads, residual stresses, rail longevity.

For citation:

Maier S. S. [Prediction of rail failures: new approaches and crack formation models]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 4, pp. 56—67. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_56.

About author:

Sergei S. Maier — Graduate Applicant, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. 9, Moskovskiy Ave., Saint Petersburg, 190068, Russian Federation; sergzo@bk.ru; ORCID: 0000-0003-4917-2578