

Подходы к моделированию возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах

С. М. ЗАХАРОВ¹, Е. В. ТОРСКАЯ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва, 119526, Россия

Аннотация. Контактно-усталостные повреждения рельсов наряду с их износом являются наиболее распространенными видами дефектов рельсов, в том числе рельсов нового поколения. За последние годы произошли существенные изменения в распределении видов контактно-усталостных повреждений как на российских, так и зарубежных железных дорогах, особенно на линиях с тяжеловесным движением. Поэтому актуальным является изучение механизмов и моделирование появления поверхностных контактно-усталостных повреждений рельсов. Данная статья посвящена обзору подходов к моделированию возникновения контактно-усталостных повреждений на рабочих поверхностях рельсов. Рассмотрены четыре вида подходов к моделированию: основанные на методах и подходах механики контактного взаимодействия; на получении количественных характеристик приспособляемости материалов к циклическому нагружению, устанавливаемых с помощью лабораторных испытаний; на применении критериев, имеющих физический смысл энергии, выделяющейся на контакте; прогнозирующие накопление пластической деформации в условиях циклического нагружения на базе серии стандартных испытаний рельсовых сталей, в том числе в зоне сварного стыка, и конечно-элементного моделирования. Сформулированы направления дальнейших исследований по образованию и развитию поверхностных контактно-усталостных дефектов в рельсах.

Ключевые слова: рельсы; поверхностные контактно-усталостные повреждения; моделирование возникновения; сварной стык

Введение. За прошедшие годы произошли существенные изменения в распределении видов контактно-усталостных повреждений (КУП) рельсов как на российских железных дорогах [1, 2, 3], так и на железных дорогах за рубежом [4]. Это связано главным образом с тем, что за эти годы в разное время произошли изменения технологии производства рельсов, в результате которых повысилась чистота сталей, существенно уменьшилось количество и размеры неметаллических включений, которые являлись источником зарождения подповерхностных трещин, приводящих к выщербинам; повысились механические свойства рельсовых сталей.

Основные виды поверхностных КУП в рельсах. Одним из основных видов КУП в рельсах в настоящее

время, особенно на линиях с тяжеловесным движением, являются поверхностные КУП в виде мелких наклонных параллельных трещин на поверхности катания рельса [1, 2, 3, 4]. Такие трещины возникают на выкружке головки рельса и на поверхностях катания в результате накопления больших однонаправленных пластических деформаций, ведущих к исчерпанию способности материала к такому воздействию. Эти трещины при правильной организации ведения путевого хозяйства удаляются шлифованием, технология и периодичность которого постоянно совершенствуется на зарубежных железных дорогах, но, к сожалению, не так широко применяется на российских железных дорогах.

Существует опасность, что некоторые трещины могут начать быстро расти, неожиданно поворачивать вглубь рельса и становиться причиной его излома [1, 3]. Условия, которые приводят к повороту трещины, являются одним из предметов исследований разных организаций. В частности, анализируются в совместном международном исследовательском проекте ICRI (International Collaboration Research Initiative) [5].

Имеются и другие виды поверхностных КУП, типа squat (сквот)/stud (стад), описанию и причинам возникновения которых посвящен ряд работ, в частности [4, 6, 7]. Эти повреждения в виде темных пятен и вдавлен на поверхности катания рельсов также привлекают внимание исследователей и требуют отдельного рассмотрения, особенно та разновидность, названная stud [7] (вдавливание в форме «шляпки от гвоздя»), от которой могут развиваться поперечные трещины.

Фактором, влияющим на возникновение и интенсивность развития поверхностных КУП в виде наклонных параллельных трещин, являются механические свойства рельсовых сталей. Результаты экспериментальных исследований возникновения и развития наклонных параллельных трещин на железных дорогах в Германии в зависимости от пропущенного тоннажа при использовании обычных рельсовых сталей R260 и сталей повышенного качества R350 НТ по-

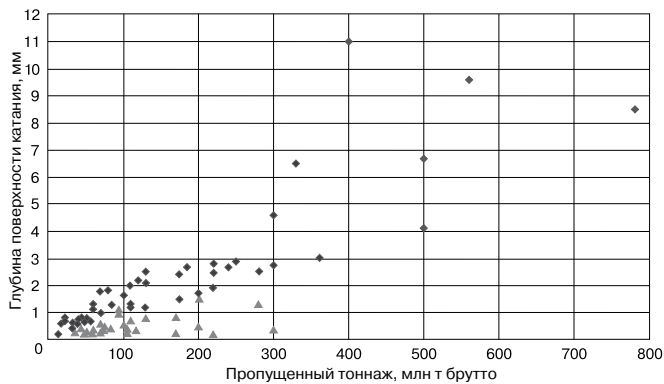


Рис. 1. Изменение глубины наклонных параллельных трещин в рельсах различных категорий (R260 — ромбы, R350 HT — треугольники) от пропущенного тоннажа [8]

Fig. 1. Head check depth variation in various categories of rails versus MGT (R260 — diamonds, R350 HT — triangles) [8]

казали (рис. 1) [8], что повышение качества рельсовой стали существенно влияет на интенсивность развития трещин.

Аналогичные данные по изменению глубины поверхностных наклонных параллельных трещин были получены и по российским рельсам [1, 3].

Помимо механических свойств применяемых сталей, на возникновение и интенсивность развития КУП существенно влияют так называемые внешние факторы, в число которых входит характер вписывания тележек вагонов в колею, профили колеса и рельса, несоответствие возвышения рельса в кривых радиусу кривых и скоростям движения вагонов. Имеются исследования по выявлению степени воздействия ведущей и ведомой колесных пар на образование КУП наружного и внутреннего рельсов [4].

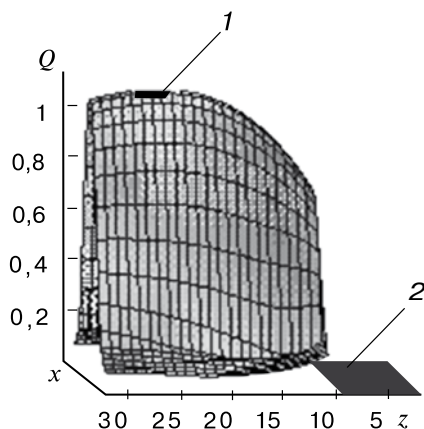


Рис. 2. Распределение накопленной контактно-усталостной поврежденности Q под поверхностью при наличии износа [15]: $z=0$ — положение неизношенной поверхности; x, z — координаты поверхности точек контакта ($m = 2,1$; $c = 0,91 \cdot 10^{-11}$); 1 — максимальная поврежденность; 2 — область износа

Fig. 2. Distribution of accumulated rolling contact fatigue damage Q under surface considering wear [15]: $z=0$ — position of unworn surface; x, z — surface rolling contact coordinates ($m = 2,1$; $c = 0,91 \cdot 10^{-11}$); 1 — maximal damage; 2 — wear area

ВНИИЖТ, ИПМех РАН и БГТУ [9] на базе программного комплекса «Универсальный механизм» было выполнено исследование влияния параметров вагонов на тележках 18-100 и пути в кривых разных радиусов и прямых на базовые показатели взаимодействия колеса и рельса с ранжированием степени влияния каждого из исследуемых факторов (боковых сил, угла набегания колесной пары, перекоса колесных пар, завышения и занижения фрикционных клиньев, профиля колес, разности диаметров колес, зазора в колесе) на удельную работу сил трения, интенсивность износа и контактно-усталостную повреждаемость.

Поведение материалов при циклическом нагружении. В соответствии с подходом, предложенным К. Джонсоном [10], имеется три типа реакций металла на циклическое нагружение: режим приспособляемости материала в условиях упругой деформации, режим приспособляемости материала в условиях пластической деформации и режим накопления пластической деформации. При режиме приспособляемости материала в условиях упругой деформации (elastic shakedown behavior) имеет место пластическая деформация в процессе приработки, однако благодаря формированию остаточных напряжений или рабочему упрочнению (наклепу) установившееся состояние материала остается упругим. При режиме приспособляемости материала в условиях пластической деформации (plastic shakedown behavior) установившееся состояние в объеме — упругопластическое, но накопления пластической деформации не происходит. В режиме накопления деформации (ratcheting behavior) установившееся состояние имеет место в упругопластическом объеме, в котором материал накапливает деформацию с каждым циклом и образуются повреждения.

В связи с этими состояниями режимов приспособляемости материалов к циклическому нагружению модели зарождения усталостных повреждений делятся на высокочастотные, применимые к режиму приспособляемости материала в условиях упругой деформации, и низкочастотные, применимые к условиям пластической деформации и накопления деформации с каждым циклом нагружения.

В [11] рассмотрены общие условия зарождения и развития поверхностных трещин при повторно-переменном нагружении, включающие стадии их развития в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений, и различные подходы к моделированию роста поверхностных усталостных трещин. Предложена схема расчета долговечности с учетом конкурирующих механизмов износа и усталости применительно к паре «колесо — рельс». Результаты расчетов сопоставляются с работой [12], в которой

моделируется накопление контактно-усталостной поврежденности на поверхности рельса с учетом его изнашивания (рис. 3).

Имеется ряд критериев зарождения поверхностной трещины в разных режимах. Не рассматривая подробно эти критерии, которые, в частности, приведены в работе [13], можно их сгруппировать следующим образом: связанные с максимальными касательными напряжениями или с деформацией сдвига в наиболее неблагоприятно расположенной кристаллографической плоскости (критерий Данг Вана); основанные на энергии (плотности энергии); различные эмпирические модели.

Моделирование (и прогнозирование) образования поверхностных КУП. Можно условно выделить следующие группы моделей:

- основанные на методах и подходах механики контактного взаимодействия и включающие определение амплитудных значений максимальных касательных или эквивалентных напряжений в условиях циклического нагружения подповерхностных слоев рельса и расчет функции поврежденности с использованием экспериментально определенного закона накопления повреждений для данного материала рельса [12, 14, 15, 16] (рис. 2, 3). На функцию накопления поврежденности в значительной степени влияет износ поверхности рельса, в результате которого удаляется поврежденный слой;
- основанные на получении количественных характеристик приспособляемости материалов к циклическому нагружению в виде показателя повреждаемости КУП, устанавливаемого на основе лабораторных испытаний, моделирующих взаимодействие колеса и рельса [17, 18];

- основанные на применении критериев, имеющих физический смысл энергии, выделяющейся на контакте, в частности показателя $T\gamma$ — произведения тангенциальной силы в контакте на относительное проскальзывание [18];

- прогнозирующие накопление пластической деформации в условиях циклического нагружения на базе серии стандартных испытаний рельсовых сталей и конечно-элементного моделирования, при котором находится стабилизированный максимум степени исчерпания пластичности материала [19];

- вероятностные модели, основанные на допущении возможности «переноса» результатов выхода рельсов по этим дефектам на опытный участок пути на любой другой участок пути [20].

Подходы, используемые для моделирования (и прогнозирования) КУП на основе лабораторных испытаний. Использование результатов лабораторных испытаний, в разной степени воспроизводящих условия контакта колеса с рельсом, осуществляется в большинстве методов моделирования. В данную группу

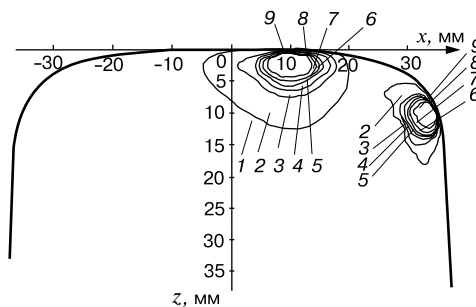


Рис. 3. Изолинии накопленной контактно-усталостной поврежденности по модели [12]:

1–9 — число циклов нагружения от 140 до 10 000

Fig. 3. Isolines of accumulated rolling contact fatigue damage according to the model [12]:

1–9 — number of loading cycles from 140 to 10 000

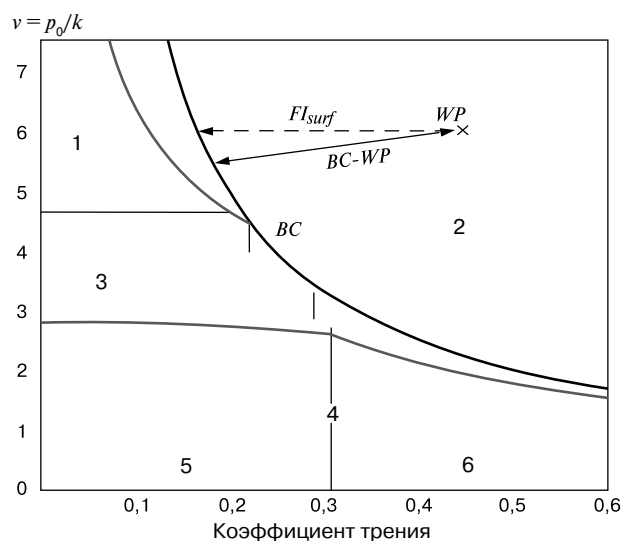


Рис. 4. Индекс контактно-усталостной поврежденности рельса (FI_{surf}) [16], устанавливаемый на основе диаграммы Джонсона [10]: 1 — область накопленной поврежденности; 2 — область пластической приспособляемости; 3 — область упругой приспособляемости; 4 — область упругого состояния; 5 — подповерхностная подобласть; 6 — поверхностная подобласть; WP — рабочая точка; BC — граница области пластической приспособляемости

Fig. 4. Index of rolling contact fatigue damage of rail (FI_{surf}) [16] on the basis of Johnson's diagram [10]:

- 1 — area of accumulated damage; 2 — area of plastic shakedown; 3 — area of elastic shakedown; 4 — elastic area; 5 — subsurface subarea; 6 — surface subarea; WP — work point; BC — boundary of plastic shakedown area

условно выделены методы, в которых применяются зависимости типа уравнения Веллера.

В работах [15, 16] для моделирования накопления поврежденности использовалась модель линейного суммирования повреждений, а скорость накопления поврежденности q связана с амплитудным значением максимальных касательных напряжений в рассматриваемой точке (x, y, z, t) $\Delta\tau$ степенной зависимостью

$$q(x, y, z, t) = c[\Delta\tau(x, y, z, t)]^m,$$

в которой коэффициенты s и m устанавливались в результате экспериментов, проведенных во ВНИИЖТ [16].

В работе [17] для количественной оценки возникновения поверхностных КУП был предложен показатель (индекс) FI_{surf} , основанный на использовании диаграммы приспособляемости материала к циклическому нагружению. Предполагалось при этом, что на площадке контакта, где имеются зоны сцепления и проскальзывания, имеет место проскальзывание при максимальном значении коэффициента трения. Форма и размеры площадки контакта получены из решения негерцевской контактной задачи. В логарифмических координатах связь между FI_{surf} и числом циклов до возникновения КУП имеет вид зависимости типа уравнения Веллера:

$$FI_{surf} = A(N_f)^B, \quad (1)$$

где N_f — число циклов до возникновения КУП, а A и B — параметры материала, которые определяются из экспериментов на различных лабораторных стендах и с разными коэффициентами трения.

Далее в логарифмических координатах строится связь между индексом КУП, полученным из диаграммы приспособляемости материала к циклическому нагружению, и числом циклов для образования поверхностных КУП, определяемым в ходе экспериментов. Так, при средних значениях, полученных в испытаниях на разных испытательных машинах, $A = 1,78$ и $B = -0,25$ (рис. 4) [16].

Модели этой группы, основывающейся на использовании диаграммы Джонсона [10], дают возможность установить границы упругой и пластической приспособляемости материала к циклическому нагружению и области возникновения КУП в зави-

симости от тангенциальной нагрузки, представленной коэффициентом трения.

Устанавливая степень удаленности реальных значений показателей нормализованной нагрузки p_0/k , где p_0 — максимальное контактное давление, а k — показатель, определяемый пределом текучести применяемого материала, дается некоторая характеристика вероятности возникновения КУП.

Модели второй группы базируются на использовании показателя $T\gamma$, предложенного в 80-х гг. Клейтоном для классификации видов изнашивания в системе «колесо — рельс», который был расширен в начале 2000-х гг. М. Бурстоу и для оценки условий возникновения поверхностных КУП; позднее этот подход стал называться моделью «жизненного цикла» [18].

В зависимости от количественного значения показателя (фактора) $T\gamma$ — энергии, диссипированной на площадке контакта, выделяются области возникновения изнашивания и/или контактной усталости (рис. 5) [4, 18]. В области $T\gamma < 15$ Дж/м — нет опасности возникновения КУП. В области от 15 до 65 Дж/м вероятность возникновения КУП возрастает по мере увеличения показателя $T\gamma$. В области от 65 до 175 Дж/м имеет место и КУП, и изнашивание, а в области больше 175 Дж/м имеет место изнашивание.

В рамках международного совместного проекта ICRI [5] М. Бурстоу, автор этой модели, на семинаре в Ванкувере в 2016 г. провел сопоставление показателей, связанных с диаграммой Джонсона и $T\gamma$, в одинаковых условиях (рис. 6) [18]. Были выделены разные диапазоны значений показателя $T\gamma$ (15–30, 30–40, 50–60, 70–80, 90–100), что позволило из большого числа точек, приведенных на рис. 6, выделить области наибольшей вероятности возникновения КУП. В частности, видно, что при коэффициенте тяги (трения) меньше 0,20–0,25 нет условий для образования КУП.

Показатель $T\gamma$ может использоваться и для более детального выявления влияния ведущих и ведомых осей тележек, радиуса кривой, наружного и внутреннего рельсов и других факторов. Он также применяется для прогнозирования зарождения КУП и для верификации разных моделей образования КУП [21, 22].

В рамках проекта ICRI в Канадском национальном исследовательском центре (NRC) был создан «пакет ICRI» [22] в виде базы данных по выбранному участку пути (кривая радиусом 426 м), содержащей геометрию пути, а также все необходимые входные данные для моделирования динамики взаимодействия экипажа и пути с помощью программы VAMPIRE. Входные данные для моделирования задавались методом Монте-Карло из распределений, взятых из измерений на пункте ударной нагрузки от колес, установ-

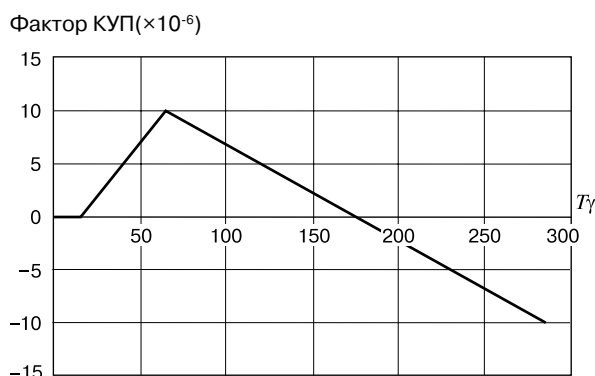


Рис. 5. Диаграмма $T\gamma$, характеризующая области износа и контактно-усталостной повреждаемости в зависимости от энергии, диссипированной в области контакта [4, 18]

Fig. 5. $T\gamma$ diagram characterizing area of wear and rolling contact fatigue depending on energy dissipated in the contact area [4, 18]

ленном у этой кривой. Использовались три модели вагонов — закрытый хоппер, цистерна и платформа, которые покрывают 85 % грузового потока, идущего через пункт измерения ударной нагрузки от колес с профилями их колес. Моделирование было выполнено 1000 раз по каждому направлению движения (однопутной линии) и типу вагона при скорости, весе вагона, уровне коэффициента трения и профилях колес, взятых случайным образом из соответствующих распределений. Вес вагона также выбирался из распределений, полученных при измерениях на этом пункте ударной нагрузки от колес.

В результате через каждые 0,3 м опытной кривой можно было получать для тележек и их осей положение и форму площадок контакта, контактные напряжения, проскальзывания, силы и показатель $T\gamma$.

Критерий зарождения КУП базируется на максимальных растягивающих напряжениях и состоянии пластической сдвиговой деформации вблизи поверхности контакта. Основное дополнительное допущение модели состоит в том, что зарождение трещины происходит тогда, когда имеется «благоприятная» микроструктура, которая способствует образованию трещины под углом к поверхности. Было проведено изучение деформации поверхностных слоев (рис. 7, а) [22] и найдены зависимости между глубиной деформированного слоя и углом, характеризующим деформацию слоев (рис. 7, б) [22] при разных проскальзываниях C_0 . Благоприятными условиями для зарождения трещины с поверхности считаются такие, при которых существует сдвиговая деформационная микроструктура. Такая микроструктура способствует распространению микротрещины

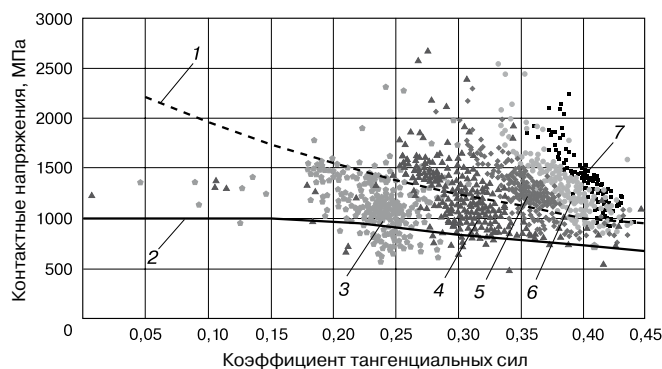


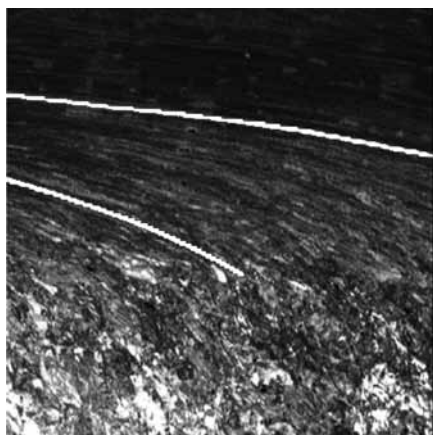
Рис. 6. Выделение диапазонов по модели $T\gamma$ [18] на диаграмме «Контактные напряжения — коэффициент тангенциальных сил (коэффициент трения)»: 1 — границы области пластической приспособляемости; 2 — границы области упругой приспособляемости; 3 — $15 < T\gamma < 20$; 4 — $30 < T\gamma < 40$; 5 — $50 < T\gamma < 60$; 6 — $70 < T\gamma < 80$; 7 — $90 < T\gamma < 100$

Fig. 6. The allocation of $T\gamma$ [18] areas on the diagram “contact stress — traction (friction) coefficient”: 1 — boundaries of plastic shakedown area; 2 — boundaries of elastic shakedown area; 3 — $15 < T\gamma < 20$; 4 — $30 < T\gamma < 40$; 5 — $50 < T\gamma < 60$; 6 — $70 < T\gamma < 80$; 7 — $90 < T\gamma < 100$

на десятки доли миллиметра вглубь поверхности [21]. Считается также, что поверхности с тонкими трещинами и мелкими выкрашиваниями образовывались под воздействием колес преимущественно перпендикулярно к направлению векторов местной сдвиговой деформации (рис. 8, а).

Были сформированы (случайным образом отобранные) две группы моделей — А и В, каждая из которых имела по 20 реализаций из 240 осей для каждого типа проходящих вагонов. Зависимости поврежденности

а)



б)

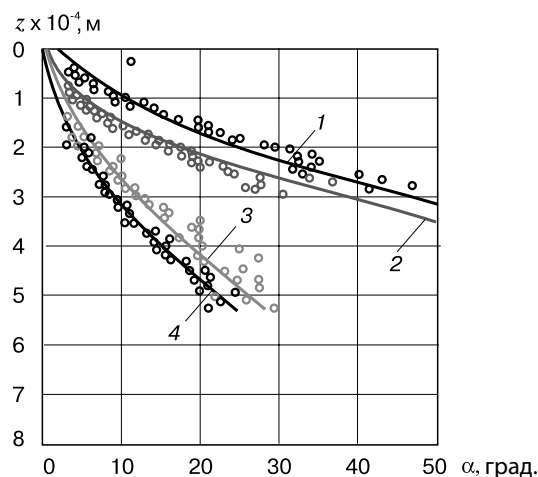


Рис. 7. Деформация поверхностных слоев (а) и зависимость между глубиной деформированного слоя z и углом деформации слоев α (б) [22] при разных контактных давлениях P_0 и проскальзываниях C_0 :

б: 1 — $p_0 = 900$ МПа, $c_0 = 1,0\%$; 2 — $p_0 = 900$ МПа, $c_0 = 5,0\%$; 3 — $p_0 = 1500$ МПа, $c_0 = 1,0\%$; 4 — $p_0 = 1500$ МПа, $c_0 = 5,0\%$

Fig. 7. Deformation of surface layers (а) and the dependence between the depth of deformed layers z and its angle α (б) [22] at different contact pressures P_0 and slippages C_0 :

б: 1 — $p_0 = 900$ МПа, $c_0 = 1,0\%$; 2 — $p_0 = 900$ МПа, $c_0 = 5,0\%$; 3 — $p_0 = 1500$ МПа, $c_0 = 1,0\%$; 4 — $p_0 = 1500$ МПа, $c_0 = 5,0\%$

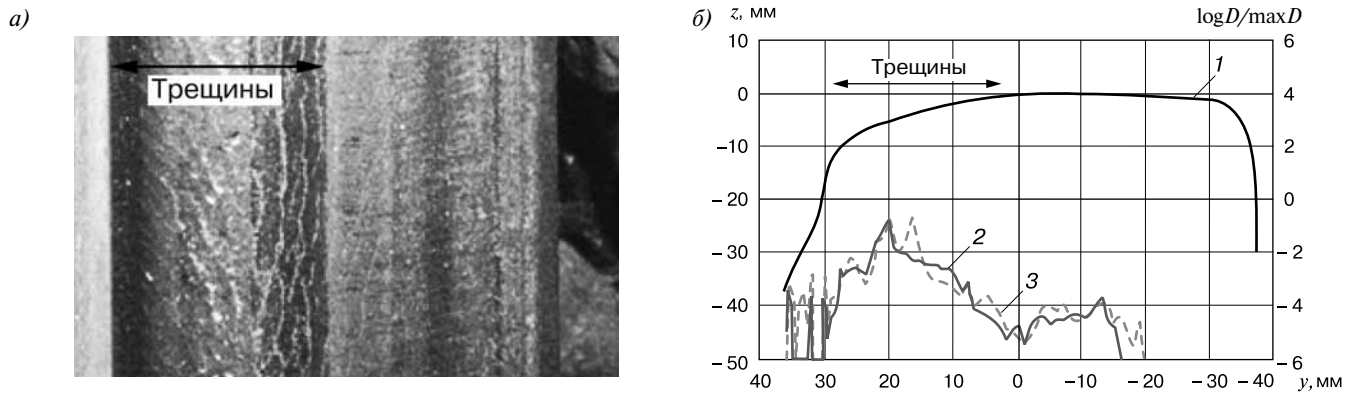


Рис. 8. Фотография поверхности катания наружного рельса в исследуемой точке кривой (а) и распределения поврежденности $\log D/\max D$, полученные по результатам моделирования (б) [22]:

б: 1 — профиль; 2 — группа А; 3 — группа В

Fig. 8. Photo of high rail rolling surface in the point of curve under observation (a) and a distribution of damage function $\log D/\max D$ obtained from modeling (b) [22]:

б: 1 — profile; 2 — A group; 3 — B group

поверхности от воздействий групп А и В (рис. 8, б) достаточно близки. Таким образом, сделан вывод, что созданные модели нагружения адекватно воспроизводят процессы [22], что «клиновья» модель позволяет лучше прогнозировать зарождение трещин, в частности

на выкружке головки наружного рельса в кривой, так, как это имеет место в реальности (рис 8, а и б) [21, 22].

КУП в зоне сварного стыка и моделирование их возникновения. Трещина зарождается в зоне сварного стыка с пониженными твердостью и пределом текучести материала и меньшей способностью материала к рабочему упрочнению сфероидальной микроструктуры, имеющей место в зоне термического влияния (рис. 9, а), в отличие от пластинчатой структуры в основном рельсе [23]. Твердость основного рельса составляет 380–420 НВ.

Трещина распространяется в зоне с пониженной твердостью вследствие большей глубины распространения поверхностной пластической деформации. На глубине 5 мм направление распространения трещины может измениться и перейти от направления горизонтального роста к поперечному.

Моделирование прогнозирования возникновения КУП рельса в зоне сварного стыка состоит из следующих этапов (рис. 10) [23]:

- воспроизведения диапазона микроструктур и механических свойств сварных соединений;
- экспериментального определения накопления пластической деформации материалов (в данном случае в зоне сварки) при циклическом нагружении;
- воспроизведения контактных параметров и динамических воздействий, необходимых для создания объемной модели пластической деформации в зоне сварных стыков.

Установление условия пластической деформации материала при циклическом нагружении на основе конечно-элементного моделирования определяется на базе стабилизированного максимума степени истощения предела пластичности материала. Этим условием в конечно-элементной модели является неравенство, приведенное в следующем выражении:

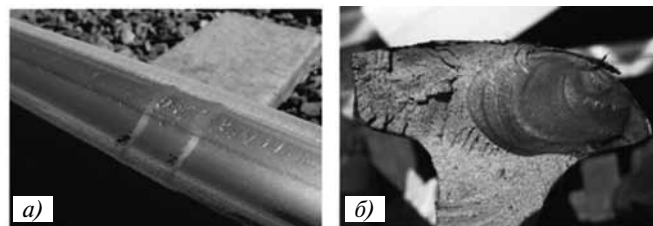


Рис. 9. Зона сварного стыка (а), излом рельса от поперечной трещины, развившейся от поверхностной трещины в зоне выкружки головки рельса (б), изменение твердости поверхности рельса в зоне стыка (с) [23]:

1 — на глубине 2 мм со стороны рабочей выкружки головки рельса; 2 — то же на глубине 10 мм; 3 — на глубине 2 мм на наружной выкружке головки рельса

Fig. 9. Area of welded joint (а), rail failure from the transverse crack developed from gage corner surface crack (б) change in rail hardness in welded area (с) [23]:

1 — depth 2 mm from working gage corner of the rail head; 2 — the same at 10 mm depth; 3 — 2 mm depth on the outer rail gage corner

$$\frac{(d\varepsilon_r / dN)_{\max, N} - (d\varepsilon_r / dN)_{\max, N-1}}{(d\varepsilon_r / dN)_{\max, N-1}} < 0,5 \%,$$

где $(d\varepsilon_r / dN)_{\max, N}$ — максимальная степень истощения пластичности материала в текущем цикле нагружения; $(d\varepsilon_r / dN)_{\max, N-1}$ — то же в предыдущем цикле нагружения.

Принято, что установившийся режим достигается, если данное условие удовлетворяется в пяти последовательных итерациях.

Зная стабилизированное значение степени истощения пластичности материала и предел текучести материала T , число циклов до зарождения трещины определится как

$$N_i = \frac{T}{(d\varepsilon_r / dN)_{\max, sta}}.$$

Конечно-элементная модель области сварного стыка. Негерцевское распределение контактных давлений было получено из квазистатической конечно-элементной модели (при допущении о независимости контактного давления от коэффициента трения). Эти результаты затем использовались для нахождения распределения продольных тангенциальных сил. Стоит заметить, что негерцевское распределение контактных давлений каждого элемента сетки находится усреднением соответствующих узловых элементов, размер элемента которых равен одному кубическому миллиметру.

Для 3D расчетов контактных параметров с использованием сетки, приведенной на рис. 11, применялся пакет ABAQUS. Детали модели, показанной на рисунке, даны в [22, 23].



Рис. 10. Блок-схема модели прогнозирования возникновения КУП рельса в зоне сварного стыка [23]
Fig. 10. Scheme of welded joint rolling contact fatigue initiation [23]

В отношении свойств материала рельса на данном этапе сделано предположение, что поведение материала сварной зоны с пониженной твердостью в отношении пластической деформации материала в условиях циклического нагружения принимается такое же, как у основного рельса. В дальнейшем это допущение будет уточнено.

Для количественной оценки пластической деформации на головке рельса определяется эффективная

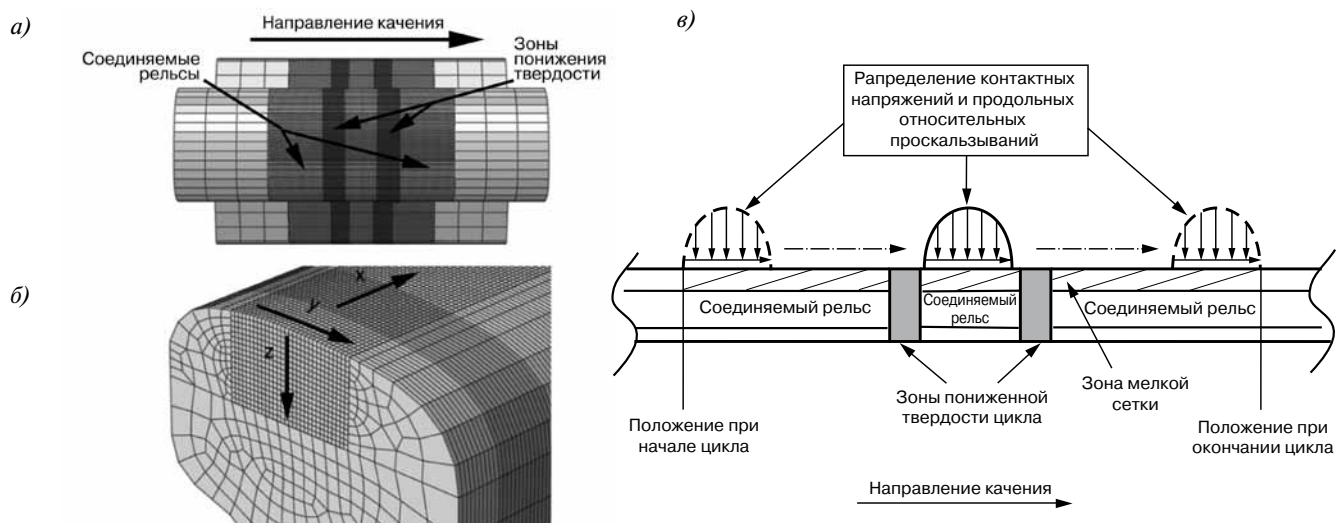


Рис. 11. Конечно-элементная модель рельса (а), зоны сварного стыка (б) и участка рельса со сварным стыком (в) [23]
Fig. 11. Finite element model of a rail (a), zone of welded joint (b) and section of rail with welded joint (c) [23]

пластическая деформация за каждый цикл нагружения. Она находится в виде нормальных и сдвиговых компонент пластической деформации для каждого нагрузочного цикла.

В зоне термического влияния имеет место более высокая степень пластической деформации, в частности на 94 % выше, чем в основном рельсе.

Вероятностный подход. Вертикальная и боковая силы, действующие на сечение пути в момент прохода через это сечение колеса, являются случайными величинами, а их статистические характеристики определяются с помощью программы «Взаимодействие экипажа и пути» (ВЭИП). За меру повреждаемости рельсов контактно-усталостными дефектами в одном цикле нагружения (при проходе по рельсу одной оси экипажа) принимается квадрат равнодействующей вертикальной и боковой нагрузок, передаваемых от колеса экипажа на рельс [20].

Закключение. 1. Поверхностные контактно-усталостные повреждения рельсов, зарождающиеся в виде наклонных параллельных трещин на поверхности катания, становятся преобладающими видами, особенно на линиях тяжеловесного движения как на зарубежных, так и на отечественных железных дорогах.

2. Факторами, оказывающими влияние на возникновение поверхностных контактно-усталостных повреждений рельсов, помимо механических свойств рельсовых сталей, являются характер вписывания тележки и ее колесных пар в кривые, профили колес и рельсов, соответствие возвышения рельса радиусу кривой и скорости движения, трибологическое состояние поверхностей трения.

3. Имеются следующие группы моделей образования КУП в рельсах:

- базирующиеся на максимальных касательных напряжениях;
- основанные на получении количественных характеристик приспособляемости материалов к циклическому нагружению (в виде индекса повреждаемости КУП, устанавливаемого на основе лабораторных испытаний);
- основанные на применении критериев, имеющих физический смысл энергии, выделяющейся на контакте, в виде показателя $T\gamma$ — произведения тангенциальной силы на относительное проскальзывание в контакте;
- прогнозирующие накопление пластической деформации в условиях циклического нагружения на базе серии стандартных испытаний материалов (рельсовых сталей) и конечно-элементного моделирования, при котором находится стабилизированный максимум степени истощения пластичности материала;

• вероятностные модели, основанные на допущении возможности «переноса» результатов выхода рельсов по этим дефектам на опытный участок пути на любой другой участок пути.

4. Моделирование условий зарождения и развития поверхностных КУП (типа наклонных параллельных трещин на поверхности катания рельса) для воспроизведения условий вписывания тележек и характера взаимодействия колеса и рельса в кривых и прямых участках пути целесообразно проводить с использованием программных комплексов динамики взаимодействия подвижного состава и пути («Универсальный механизм», VAMPIRE, MEDINA и др). При моделировании реакции материала рельса на эти воздействия целесообразно применять результаты лабораторных испытаний, воспроизводящих условия качения с проскальзыванием при контактных давлениях и величинах проскальзываний, близких к реальным. Что касается критериев зарождения КУП, то целесообразно иметь набор наиболее употребительных критериев, накапливая материал для установления областей их применения.

5. Дальнейшие усилия исследователей, занимающихся проблемами образования и развития поверхностных контактно-усталостных дефектов в рельсах (в частности, объединенных международным инициативным проектом — ICRI), следует направлять:

- на выяснение условий трансформации образовавшейся продольной трещины в поперечную;
- выявление степени и характера влияния микроструктуры рельсовой стали вблизи поверхности на возникновение и развитие КУП;
- выявление влияния остаточных напряжений в рельсах на образование поверхностных КУП;
- установление особенностей возникновения поверхностных КУП в зоне сварных соединений;
- влияние состояния поверхностных слоев, в частности модификаторов трения, на образование и развитие КУП.

Данная работа выполнена в рамках проекта РФФИ офи-м РЖД № 17-20-01147 «Разработка комплексного научного подхода к исследованию и прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения в условиях обращения тяжеловесных поездов, в том числе с повышенными осевыми нагрузками».

Благодарность. Авторы выражают благодарность рецензенту за внимательное прочтение рукописи статьи, ценные замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е. А. Шур, А. И. Борц, А. В. Сухов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3–9.
2. Шур Е. А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 191 с.

3. Изучение механизмов контактно-усталостных дефектов в рельсах / В. Н. Цвигун [и др.]. Новокузнецк: Центр СибГНУ, 2017. 133 с.
4. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2017. 420 с.
5. Magel E. Editorial for JRRT ICRI special edition // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. May 2017. SAGE Publishing. DOI: 10.1177/0954409717710100.
6. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения. Вопросы взаимодействия колеса и рельса / пер. с англ. Дж. У. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Ландгрэн [и др.]. М.: Интекст, 2002. 408 с.
7. Grassie S. L. Squats and squat-type defects in rails: The Understanding to date // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. 24 October 2011. DOI:10.1177/0954409711422189.
8. Heyder R., Brehmer M. Empirical studies of head check propagation on the DB network // Wear. 2014. Vol. 314. P. 36–43.
9. Computer-aided simulation of the influence of track and vehicle parameters on wheel/rail interaction characteristics / S. M. Zakharov, I. G. Goryacheva, D. Yu. Pogorelov et al. // Proceedings of the 8th International conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems (Firenze, Italy, 15–18th September, 2009). Firenze, 2009. P. 1075–1083.
10. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
11. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.
12. Моделирование процессов контактирования, изнашивания и накопления повреждений в сопряжении колесо — рельс / В. М. Богданов [и др.] // Трение и износ. 1996. Т. 17. № 1. С. 12–27.
13. Сакало В. И., Сакало А. В. Выбор критерия для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава // Четвертый научно-технический семинар «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (Брянск, 3–4 апр., 2018). Брянск, 2018. С. 63–70.
14. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
15. Горячева И. Г., Торская Е. В. Моделирование условий образования контактно-усталостных повреждений поверхности катания // Контакт-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / под. ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2004. С. 58–97.
16. Goryacheva I. G., Zakharov S. M., Torskaya E. V. Rolling contact fatigue and wear of wheel/rail simulation // Proceedings of the Second International conference on railway technology research development and maintenance. Paper 0123456789. Stirlingshire: Civil-Comp Press, 2014. 15 p.
17. Kabo E., Ekberg A. Prediction of RCF from laboratory tests // Concluding technical report INNTRACK. [S.l.], 2010. P. 131–133.
18. Burstow M. A whole life rail model application and development for RSSB — continued development of an RCF damage parameter // Rail Standard and Safety Board. London, UK. 2004.
19. Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul systems / Chung Lun Pun, D. Welsby, P. Mutton, W. Yan // Proceedings of the International Heavy Haul Conference IHHA-2015 (Perth, Australia, 2015). Perth, 2015.
20. Коган А. Я., Абдурашитов А. Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 4. С. 3–7.
21. Modeling surface rolling contact fatigue crack initiation taking severe plastic shear deformation into account / G. Trummer, C. Marte, P. Dietmaier et al. // Wear. 2016. Vol. 352–353. P. 136–145.
22. Comparison of rolling contact fatigue crack initiation models under heavy haul conditions / G. Trummer, K. Six, A. Woelfle et al. // Proceedings of the International Heavy Haul Conference IHHA-2017 (Cape Town, SA, 2017). Cape Town, 2017. P. 79–84.
23. Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul / Chung Lun Pun, D. Welsby, P. Mutton, W. Yan // Proceedings of the International Heavy Haul Conference IHHA-2017 (Cape Town, SA, 2017). Cape Town, 2017. P. 56–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАХАРОВ Сергей Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, научный консультант, научный центр «Рельсы, сварка, транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ТОРСКАЯ Елена Владимировна,

д-р физ.-мат. наук, профессор, ИПМех РАН

Статья поступила в редакцию 05.06.2018 г., принята к публикации 20.08.2018 г.

Approaches to modeling occurrence of rolling contact fatigue damages in rails

S. M. ZAKHAROV¹, E. V. TORSKAYA²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budgetary Scientific Institution of Problems of Mechanics n.a. A. Yu. Ishlinskiy of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow, 119526, Russia

Abstract. Rolling contact-fatigue damages of rails along with their wear are the most common types of rail defects. In recent years, there have been significant changes in the distribution of rolling contact fatigue damages of rails especially on railways operating under heavy haul conditions.

This paper is devoted to the overview of approaches to modeling of the occurrence of rolling contact fatigue (RCF) damages on working surfaces of rails. Four types of such approaches to modeling are considered. The first is based on the methods of contact mechanics. To realize it, the vehicle movement on the characteristic sections of the track is modeled, the forces acting in contact are determined, the contact problem is solved, and the values of the linear criterion of contact fatigue damage are determined. The required characteristics of rolling contact fatigue of the rail material are established on the basis of laboratory tests. The second ap-

proach uses the diagram of the adaptability of rail material to cyclic loads, proposed by K. Johnson, established on the basis of laboratory tests. The third approach uses criteria that have the physical meaning of the energy released at the contact as an index of the product of the tangential force in contact and relative slippage. In the fourth approach predicting the accumulation of plastic deformation under conditions of cyclic loading is performed on the basis of a series of standard tests of rail steels, including in the welded joint zone, and finite element modeling. In addition, there is also a probabilistic model, based on the assumption that it is possible to transfer the results of the RCF damage of rails on the experimental section of the road to any other site.

As the conclusion the authors formulated directions for further studies on the formation and development of surface rolling contact fatigue defects in rails.

Acknowledgement. Authors would like to express their gratitude to the reviewer for thorough reading of the article's manuscript as well as for valuable comments and suggestions.

This work was undertaken as part of the project The Russian Foundation for Basic Research of RZD No. 17-20-01147 "Development of complex approach to research and forecasting for operational integrity and new generation of rail resources in terms of heavy trains passing which includes high axle loads".

Keywords: rails; rolling surface contact fatigue defects; occurrence modeling; welded joint

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-259-268>

REFERENCES

- Shur E. A., Borts A. I., Sukhov A. V., Abdurashitov A. Yu., Bazanova L. V., Zagranichnik K. L. *Evolutsiya povrezhdaemosti rel'sov defektami kontaktnoy ustalosti* [Evolution of rail damage by contact fatigue defects]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2015, no. 3, pp. 3–9.
- Shur E. A. *Povrezhdeniya rel'sov* [Rail damage]. Moscow, Intext Publ., 2012, 191 p.
- Tsvigun V. N., Shur E. A., Kuznetsov V. N., Koynov R. S. *Izucheniye mekhanizmov kontaktno-ustalostnykh defektov v rel'sakh* [Study of the mechanisms of contact fatigue defects in the rails]. Novokuznetsk, Tsentr SibGNU Publ., 2017, 133 p.
- Zakharov S. M. *Obobshcheniye mirovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya. Upravleniye soderzhaniiem sistemy koleso – rel's* [Generalization of the world experience of heavy haul traffic. Maintenance of the system wheel – rail, English-Russian translation]. Moscow, Intext Publ., 2017, 420 p.
- Magel E. *Editorial for JRRT ICRI special edition*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit, May 2017, SAGE Publishing.
- Harris U. J., Zakharov S. M., Landgren J., Turne Kh., Ebersson V. *Obobshcheniye peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i rel'sa* [Generalization of advanced experience on heavy-weight movement: issues of wheel and rail interaction, English-Russian translation]. Moscow, Intext, 2002, 408 p.
- Grassie S. L. *Squats and squat-type defects in rails. The Understanding to date*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit, October 24, 2011.
- Heyder R., Brehmer M. *Empirical studies of head check propagation on the DB network*. *Wear*, 2014, Vol. 314, pp. 36–43.
- Zakharov S. M., Goryacheva I. G., Pogorelov D. Yu., Zharov I. A., Soshenkov S. N., Simonov V. A., Yasikov V. N. *Computer-aided simulation of the influence of track and vehicle parameters on wheel/rail interaction characteristics*. Proceedings of the 8th International conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems, Firenze, Italy, 15–18th September, 2009. Firenze, 2009, pp. 1075–1083.
- Dzhonson K. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya* [Mechanics of contact interaction]. Moscow, Mir Publ., 1989, 510 p.
- Morozov E. M., Zernin M. V. *Kontaktnye zadachi mekhaniki razrusheniya* [Contact problems of fracture mechanics]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1999, 544 p.
- Bogdanov V. M., Goryachev A. P., Goryacheva I. G., Do-bychin M. N. *Modelirovaniye protsessov kontaktirovaniya, iznashivaniya i nakopleniya povrezhdeniy v sopryazhenii koleso – rel's* [Modeling the processes of contacting, wear and accumulation of damage in the wheel – rail interface]. *Friction and wear*, 1996, Vol. 17, no. 1, pp. 12–27.
- Sakalo V. I., Sakalo A. V. *Vybor kriteriya dlya modelirovaniya nakopleniya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy v kolesakh zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [The choice of criteria for modeling the accumulation of contact fatigue damage in the wheels of railway rolling stock]. *Chetverty nauchno-tekhicheskii seminar "Komp'yuternoe modelirovaniye na zheleznodorozhnom transporte: dinamika, prochnost', iznos"*, Bryansk, 3–4 Apr., 2018 [Fourth scientific and technical seminar "Computer modeling in railway transport: dynamics, strength, wear", Bryansk, 3–4 Apr., 2018]. Bryansk, 2018, pp. 63–70.
- Goryacheva I. G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya* [Mechanics of friction interaction]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 478 p.
- Goryacheva I. G., Torskaya E. V., Zakharov S. M. *Modelirovaniye usloviy obrazovaniya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy poverkhnosti kataniya. Kontaktno-ustalostnye povrezhdeniya koles gruzovykh vagonov* [Simulation of conditions for the formation of contact fatigue damage to the rolling surface. Contact and fatigue damage to the wheels of freight cars]. Moscow, Intext Publ., 2004, pp. 58–97.
- Goryacheva I. G., Zakharov S. M., Torskaya E. V. *Rolling contact fatigue and wear of wheel/rail simulation*. Proceedings of the Second International conference on railway technology research development and maintenance. Paper no. 0123456789. Stirling-shire, Civil-Comp Press, 2014, 15 p.
- Kabo E., Ekberg A. *Prediction of RCF from laboratory tests*. Concluding technical report INNTRACK. [S. I.], 2010, pp. 131–133.
- Burstow M. *A whole life rail model application and development for RSSB – continued development of an RCF damage parameter*. Rail Standard and Safety Board. London, UK, 2004.
- Chung Lun Pun, Welsby D., Mutton P., Yan W. *Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul systems*. International heavy haul conference IHHA-2015, Perth, Australia, 2015. Perth, 2015.
- Kogan A. Ya., Abdurashitov A. Yu. *Prognozirovaniye otkazov rel'sov po defektam kontaktno-ustalostnogo proiskhozhdeniya* [Prediction of rail failure by contact-fatigue defects]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 4, pp. 3–7.
- Trummer G., Marte C., Dietmaier P. *Modelling surface rolling contact fatigue crack initiation taking severe plastic shear deformation into account*. *Wear*, 2016, Vol. 352–353, pp. 136–145.
- Trummer G., Six K., Woelfle A. *Comparison of rolling contact fatigue crack initiation models under heavy haul conditions*. Proceedings of the International Heavy Haul Conference IHHA-2017, Cape Town, SA, 2017. Cape Town, 2017. P. 79–84.
- Chung Lun Pun, Welsby D., Mutton P., Yan W. *Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul systems*. Proceedings of the International Heavy Haul Conference IHHA-2017, Cape Town, SA, 2017. Cape Town, 2017. P. 56–62.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey M. ZAKHAROV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Consultant of the Scientific Center "Rails, welding, transport material science", JSC "VNIIZhT"

Elena V. TORSKAYA,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, IPMech RAS

Received 05.06.2018

Accepted 20.08.2018

■ E-mail: smzakharov@yandex.ru (S. M. Zakharov)