



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.032.3

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-47-57

EDN: <https://elibrary.ru/grepdu>



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ РЕЛЬСОВ В ЗОНЕ СВАРНОГО СТЫКА

Е. В. Торская^{1,2}✉, И. Ю. Цуканов^{1,2}, А. Р. Мещерякова^{1,2},
К. Л. Заграничек³, С. М. Захаров³, Е. А. Шур³

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),
Москва, Российская Федерация

²Научно-технологический университет «Сириус»,
Сочи, Российская Федерация

³Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования является изучение процесса образования и накопления контактно-усталостных повреждений в зоне сварного стыка и выявление степени влияния наличия и характера деформации поверхности катания рельса в зоне сварного соединения, полученного электроконтактной сваркой, на возникновение и развитие контактно-усталостных повреждений, в том числе на количество циклов до зарождения трещины, которое определяет ресурс сварного стыкового соединения.

Материалы и методы. Для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в поверхностных слоях материала при циклически изменяющемся поле напряжений использован подход, при котором в качестве критерия накопления рассматривается величина амплитудных значений максимальных касательных напряжений. В рамках данного подхода были реализованы следующие этапы: определение параметров распределения плотности вероятности нагрузки от колес на рельсы; решение контактной задачи о качении колеса по рельсу с учетом формоизменения рельса в области смятия; моделирование процесса накопления повреждений.

Результаты. Смятие материала рельса в зоне сварного стыка приводит, с одной стороны, к возникновению дополнительной динамической нагрузки, увеличивающей контактные и внутренние напряжения, с другой — к увеличению площади контакта за счет выдавливания головки рельса, что снижает напряжения при контакте. В зависимости от глубины смятия, начальной поврежденности, характера нагружения процесс накопления контактно-усталостных повреждений может как ускоряться, так и замедляться.

Обсуждение и заключение. Подтверждается необходимость устранения термообработкой зон пониженной твердости в местах сварных стыков, приводящих к образованию седловин, трещин и выкрашиваний. Уменьшение размера разупрочненной зоны до размеров пятна контакта практически исключит образование импульсных неровностей, а в случае их образования при контакте не будет дополнительной динамической нагрузки. Вариантом решения проблемы является интенсификация процесса нагрева при локальной термической обработке после сварки, отказ от отдельной локальной термической обработки рельсов после сварки и совмещение ускоренного охлаждения головок рельсов с общим процессом сварки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовый стык, динамическая нагрузка, контактная задача, контактно-усталостные повреждения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торская Е. В., Цуканов И. Ю., Мещерякова А. Р., Заграничек К. Л., Захаров С. М., Шур Е. А. Моделирование контактно-усталостной поврежденности рельсов в зоне сварного стыка // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 1. С. 47–57. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-47-57>.

© Торская Е. В., Цуканов И. Ю., Мещерякова А. Р.,
Заграничек К. Л., Захаров С. М., Шур Е. А., 2023

✉ torskaya@mail.ru (Е. В. Торская)



Original article

UDK 625.032.3

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-47-57

EDN: <https://elibrary.ru/gpepdu>



SIMULATION OF CONTACT-FATIGUE DAMAGE TO RAILS IN A WELDED RAIL JOINT AREA

Elena V. Torskaya^{1, 2✉}, Ivan Yu. Tsukanov^{1, 2},
Almira R. Meshcheryakova^{1, 2}, Konstantin L. Zagranichek³,
Sergey M. Zakharov³, Evgeniy A. Shur³

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

²Sirius University of Science and Technology,
Sochi, Russian Federation

³Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The aim is to study the formation and accumulation of contact-fatigue damage in a welded rail joint area and to determine the degree of influence of the presence and deformation behaviour of the rail tread surface on an electrically welded joint on the occurrence and development of contact-fatigue damage, including the number of cycles to crack formation, which determines the service life of the welded joint.

Materials and methods. In order to simulate the accumulation of contact-fatigue damage in the material surface under cyclical stress the authors take an approach that considers the peak values of the maximum shear stresses as an accumulation criterion. The following stages have been implemented as part of the given approach: determine the distribution of the probability density of wheel load on the rails; solve the contact problem of a rolling wheel considering the rail shape change in the collapse area; simulate the damage accumulation process.

Results. The collapse of the rail material in a welded rail joint area causes, on the one hand, an additional dynamic load that increases the contact and internal stresses, and on the other hand, increases the contact area due to the flattening of the rail head, which reduces contact stresses. Depending on the depth of collapse, initial damage, nature of loading, the accumulation of contact-fatigue damage can both accelerate and slow down.

Discussion and conclusion. It is confirmed that need for heat treatment to eliminate zones of reduced hardness in welded rail joint areas resulting in saddling, cracks and spalling. Reducing the weakened zone to the size of the contact spot will practically prevent the formation of impulse irregularities, and their formation upon contact would eliminate additional dynamic load. The problem may be solved by intensifying local heat treatment after welding, abandoning separate local heat treatment of rails after welding, and combining accelerated cooling of rail heads with the general welding process.

KEYWORDS: rail joint, dynamic load, contact problem, contact-fatigue damage

FOR CITATION: Torskaya E. V., Tsukanov I. Yu., Meshcheryakova A. R., Zagranichek K. L., Zakharov S. M., Shur E. A. Simulation of contact-fatigue damage to rails in a welded rail joint area. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(1):47–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-47-57>.

✉ torskaya@mail.ru (E. V. Torskaya)

© Torskaya E. V., Tsukanov I. Yu., Meshcheryakova A. R., Zagranichek K. L., Zakharov S. M., Shur E. A., 2023

Введение. Местное понижение твердости в зонах термического влияния после электроконтактной сварки и последующей локальной термической обработки является слабым местом сварных стыков в головке рельса: в этих зонах возникают контактно-усталостные повреждения [1]. Этот вид разрушения обусловлен циклическим изменением полей напряжений в материале рельса при его контакте с колесом. Как правило, разрушение происходит после большого числа циклов нагружения-разгрузки (причем при контакте колеса и рельса существует значительный разброс нагрузок на колесо), проскальзываний в зоне контакта и точек первоначального касания. Эти обстоятельства существенно усложняют экспериментальное исследование усталостных явлений и увеличивают роль моделирования в прогнозировании ресурса рельса (в данном случае сварного стыка) по критерию контактно-усталостного разрушения.

Для моделирования этих процессов применяются различные подходы, в частности основанные на применении критериев, имеющих физический смысл энергии, выделяющейся на контакте в виде произведения тангенциальной силы в контакте на относительное проскальзывание [2]. Используются модели, основанные на получении количественных характеристик приспособляемости материалов к циклическому нагружению в виде показателя повреждаемости, который устанавливается на основе лабораторных испытаний, моделирующих взаимодействие колеса и рельса [3]. Есть модели, 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 [4]. Критерий зарождения контактно-усталостных повреждений в этих моделях базируется на максимальных растягивающих напряжениях и пластической сдвиговой деформации вблизи поверхности контакта, где имеется «благоприятная» сдвиговая деформационная микроструктура.

Обзор критериев прогнозирования контактно-усталостных повреждений и их оценки применительно к железнодорожным колесам и рельсам дан в [5]. В [6] использован подход, основанный на вероятностных характеристиках процессов взаимодействия пути и подвижного состава на участке с заданными зависимостями, характеризующими состояние пути по его геометрии.

В этой работе для моделирования образования контактно-усталостных повреждений использована группа моделей, основанных на методах и подходах механики контактного взаимодействия, которые

включают определение амплитудных значений максимальных касательных или эквивалентных напряжений в условиях циклического нагружения и расчет функции поврежденности с использованием экспериментально определенного закона накопления повреждений для данного материала рельса [7, 8]. Ранее в рамках исследования сварных стыков было, в частности, установлено, что после смятия материала с меньшей твердостью и быстрого износа деформированного слоя подповерхностный слой имеет начальную поврежденность, которую необходимо учитывать при моделировании процесса накопления повреждений [8]. Наличие поверхностных деформаций (местных или импульсных неровностей), образовавшихся в результате смятия, приводит к дополнительным динамическим эффектам и существенно влияет на характер контакта колеса и рельса из-за «выполаживания» поверхности в результате смятия [9].

Целью данного исследования является изучение процесса образования и накопления контактно-усталостных повреждений в зоне сварного стыка и выявление степени влияния наличия и характера деформации поверхности катания рельса в зоне сварного соединения, полученного электроконтактной сваркой, на возникновение и развитие контактно-усталостных повреждений, в том числе на количество циклов до зарождения трещины, которое определяет ресурс сварного стыкового соединения.

Методы и этапы исследования. Для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в поверхностных слоях материала при циклически изменяющемся поле напряжений применен подход, при котором в качестве критерия накопления рассматривается величина амплитудных значений максимальных касательных напряжений. В рамках данного подхода были реализованы следующие этапы:

1. Определение параметров нормального распределения плотности вероятности нагрузки от колес на рельсы.
2. Решение контактной задачи о качении колеса по рельсу с учетом формоизменения рельса в области смятия.
3. Моделирование процесса накопления повреждений.
4. Анализ результатов и возможных путей снижения повреждаемости.

Источником исходных данных для моделирования служили результаты эксплуатационных наблюдений и последующего материаловедческого анализа контактно-усталостных повреждений в сварных стыках, полученные на двух представительных участках Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог.

Анализ полученных эксплуатационных данных в прямых участках пути позволил выбрать два случая, в

Таблица 1

Сведения об обследованных рельсах с контактно-усталостными повреждениями в зоне сварных стыков

Table 1

Information on inspected rails with contact-fatigue damage in welded rail joint areas

Перегон	Железная дорога	Категория рельса	Пропущенный тоннаж, млн т брутто	Глубина смятия, мм	Износ, мм	Расстояние повреждения от поверхности катания, мм
Тальцы — Онохой	Восточно-Сибирская	T1, НЭ	674,90	3	2	5
Ледяная — Усть-Пёра	Забайкальская	T1	637,80	0,7	3	6,3

которых наблюдалось возникновение поверхностных контактно-усталостных повреждений в зоне сварного стыка и по которым было проведено их обследование после пропущенного тоннажа более 600 млн т брутто (табл. 1) при среднем значении 656,35 млн т брутто.

При проведении обследования головки рельса на участке Тальцы — Онохой на поверхности катания головки рельса внутри неровности (седловины), образовавшейся в области сварного стыка, было зафиксировано наличие параллельных поверхностных трещин контактной усталости (head checks), а также выкрашиваний длиной до 7 мм, шириной до 4,6 мм и глубиной до 0,6 мм (рис. 1, а). На поперечном изломе рельса присутствует усталостная трещина в подошве рельса. Вопрос о возможной связи данных видов усталостных разрушений будет обсуждаться далее.

При обследовании рельса с перегона Ледяная — Усть-Пёра, имеющего поперечный излом с поперечной усталостной трещиной в головке, установлено, что очаг зарождения трещины расположен на расстоянии 6,5 мм от поверхности катания (рис. 1, б). Возникло предположение, что такой глубокий очаг образовался из-за исходного дефекта материала (концентратора напряжений, рис. 1, б). Далее разрушение шло по градиенту напряжений, т. е. в сторону поверхности.

Величина пропущенного тоннажа брутто определяется следующим образом [6]:

$$T = \frac{1}{g} \langle 2P \rangle \langle n_j \rangle N, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; $\langle 2P \rangle$ — средняя осевая нагрузка экипажей на участке; $\langle n_j \rangle$ — средневзвешенное число осей в экипажах, обращающихся на

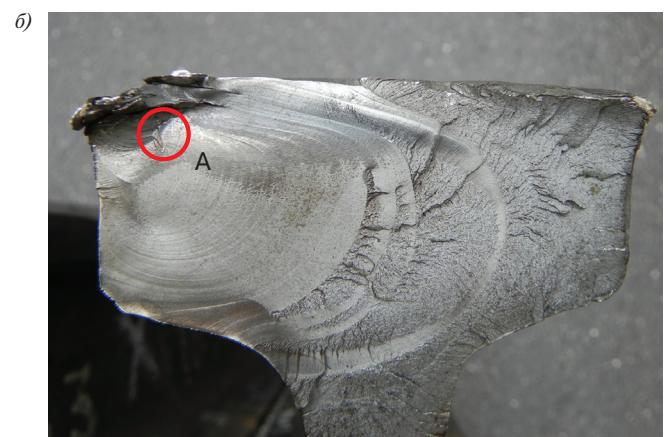
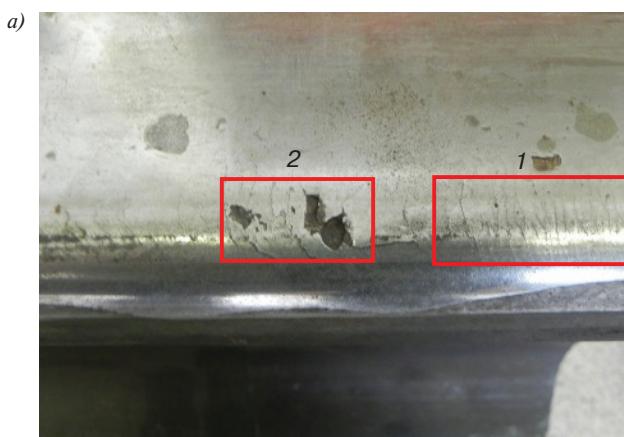


Рис. 1. Варианты разрушения в области сварных стыков:

а — трещины контактной усталости и выкрашивания на поверхности катания рельса в зоне рабочей выкружки на перегоне Тальцы — Онохой:
1 — трещины; 2 — выкрашивания; б — усталостная трещина в головке рельса с перегона Ледяная — Усть-Пёра: А — очаг зарождения поперечной усталостной трещины

Fig. 1. Variations of destruction in welded rail joint areas:

а — contact fatigue and spalling cracks on the rail tread surface in the operating fillet on the Tal'tsy—Onokhoy railway haul:
1 — cracks; 2 — spalling; б — rail head fatigue crack on the Ledyanaya—Ust'-Pyora railway haul:
А — transverse fatigue crack initiation site

участке; N — общее количество экипажей, прошедших по заданному участку пути.

Для дальнейших расчетов была выбрана одна из возможных реалистичных комбинаций параметров, обеспечивающих выполнение приведенных ниже статистических распределений:

$$\langle n_j \rangle = 200, N = 5000. \quad (2)$$

Осевая нагрузка, воспринятая колесом вагона, определяется из соотношения

$$P = \frac{T}{2} \cdot 9,8 \cdot 10^3, \text{Н.} \quad (3)$$

Было построено распределение осевой нагрузки по нормальному закону [10] (табл. 2, рис. 2) так, чтобы в сумме получился средний пропущенный тоннаж, воспринятый обследованными рельсами (табл. 1) [6, 11].

При решении контактной задачи рассматривалась рельс с неровностью, образовавшейся в результате смятия зон с пониженной твердостью, т. е. сам процесс смятия и удаления деформированного слоя (скоротечный по сравнению с общим числом воздействий) не рассматривался. При смятии происходит выплаживание поверхности катания головки рельса, т. е. меняется тип контактного взаимодействия: вместо точки первоначального касания имеем отрезок конечной длины, который зависит от глубины смятия, а область контакта из эллиптической становится близкой к прямоугольной [9]. Это позволяет для расчета распределения нормального напряжения использовать решение Герца для случая плоской деформации [12]:

$$p(x, y) = p_0 \left(1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad p_0 = \left(\frac{\eta P E^*}{2 \pi b R_{\text{up}}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_{\text{up}}} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_c}, \quad E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}, \quad (5)$$

где p_0 — наибольшее контактное давление; a — полуширина области контакта в направлении оси x ; b — полуширина области контакта в направлении, перпендикулярном направлению качения; η — коэффициент динамичности, увеличивающий нагрузку; R_{up} — приведенный радиус кривизны; $R = 450$ мм — радиус колеса (с учетом разной величины обточек колес при ремонтах); $R_c \approx L^2 / (2\pi^2 h)$ — радиус кривизны поверхности седловины в ее центре, где $L = 250$ мм — длина неровности рельсового пути, h — глубина неровности (смятия); E — модуль упругости колеса, рельса; ν — коэффициент Пуассона.

Таблица 2

Параметры нормального распределения плотности вероятности нагрузки от колес на рельсы, воспроизводящего пропущенный тоннаж

Table 2

Parameters of the normal distribution of the probability density of the load from the wheels on the rails, reproducing the passed tonnage

Параметр	Значение параметра
Среднее значение, Н	102 970
Среднее квадратическое отклонение, Н	6 521
Пропущенный тоннаж, млн т брутто	656,35

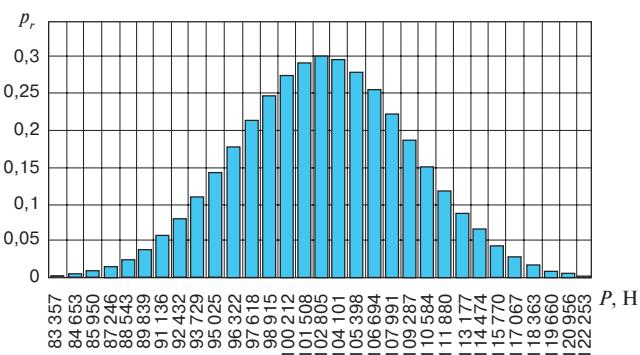


Рис. 2. Распределение вероятности p_r нагрузки от колеса P (половина осевой нагрузки)

Fig. 2. Probability distribution p_r of load from the wheel P (half of the axial load)

Касательные напряжения в области контакта определялись из соотношений [13]:

$$\tau(x, y) = \begin{cases} \mu p(x, y) = \frac{\mu E^*}{4\pi R} \sqrt{a^2 - x^2}, & -a < x < b; \\ \tau_1(x, y) = \frac{\mu E^*}{4\pi R} \left[\sqrt{a^2 - x^2} - \sqrt{(a-x)(x-b)} \right], & b < x < a; \end{cases} \quad (6)$$

$$b = a[2\Delta R / (\mu a) - 1], \quad \Delta = (\omega R - V) / V,$$

где μ — коэффициент трения; b — координата, разделяющая зоны относительного проскальзывания ($-a, b$) и сцепления (b, a), в которой скорость относительного проскальзывания равна нулю; Δ — относительное проскальзывание; ω — угловая скорость, рад/с; V — линейная скорость, м/с.

Наличие неровности приводит к возникновению дополнительной динамической нагрузки, метод моделирования которой предложен в [9] на основе решения уравнений движения колеса по рельсу с учетом

неровности в форме седловины. Коэффициент динамичности нагрузки $\eta = 1 + P_d/P$, где P_d — дополнительная динамическая вертикальная нагрузка на колесо, определяется в зависимости от глубины седловины и жесткости системы «колесо — рельс» как

$$\eta = 1 + \frac{kh}{P} \approx 1 + \frac{h}{\delta}, \quad (7)$$

где k — жесткость пружины, эквивалентная системе «колесо — рельс»; δ — деформация этой пружины ($\delta = 20$ мм) [14]. Для выбранных значений глубины смятия (табл. 1) коэффициенты динамичности принимают следующие значения: при $h = 0,7$ мм $\eta = 1,035$, при $h = 3$ мм $\eta = 1,15$.

Соотношения (1)–(7) позволяют определить нормальные и касательные напряжения в области контакта. Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 3, 4. Увеличение глубины смятия, с одной сто-

роны, увеличивает площадь области контакта, за счет чего уменьшаются максимальные значения напряжений. С другой стороны, чем больше глубина смятия, тем больше динамическая нагрузка. Для рассмотренных параметров геометрии смятия ($L = 250$ мм) [12] и двух выбранных значений осевой нагрузки из рассмотренного диапазона (рис. 2) увеличение размера пятна контакта является превалирующим.

На рис. 5 приведены результаты расчетов максимальных касательных напряжений. Во всех рассмотренных случаях они имеют основной максимум под поверхностью, расстояние от точки максимума до поверхности зависит от нагрузки и глубины смятия. Также имеется локальный максимум на поверхности вблизи границы области контакта, связанный с наличием касательных напряжений.

Для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в поверхностных слоях

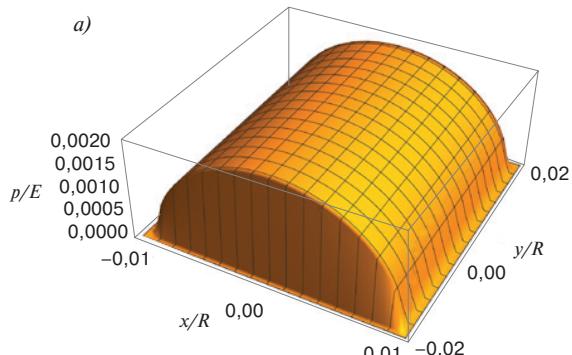


Рис. 3. Распределение нормального напряжения:
 a — в области контакта $h = 0,7$ мм, $P = 83\ 300$ Н; δ — в сечении $y = 0$: 1 — $h = 0,7$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 2 — $h = 0,7$ мм, $P = 122\ 157$ Н; 3 — $h = 3$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 4 — $h = 3$ мм, $P = 122\ 157$ Н

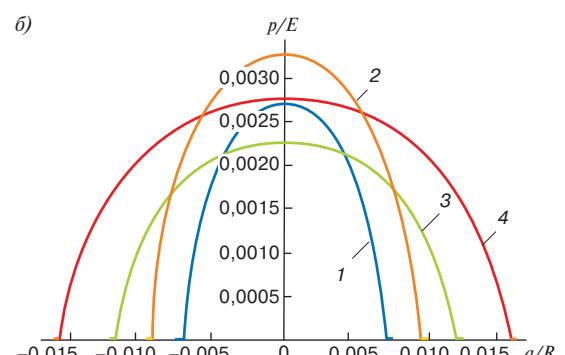


Fig. 3. Distribution of normal stress:
 a — in the contact area $h = 0.7$ mm, $P = 83\ 300$ N; δ — in section $y = 0$: 1 — $h = 0.7$ mm, $P = 83\ 300$ N; 2 — $h = 0.7$ mm, $P = 122\ 157$ N; 3 — $h = 3$ mm, $P = 83\ 300$ N; 4 — $h = 3$ mm, $P = 122\ 157$ N

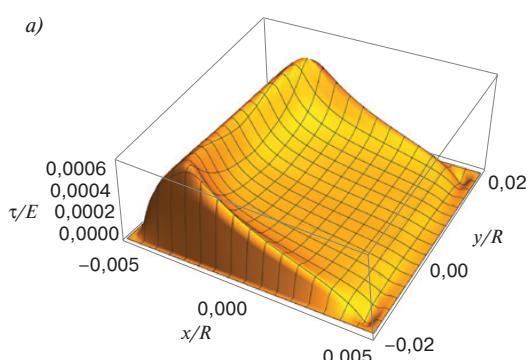


Рис. 4. Распределение касательного напряжения:
 a — в области контакта $h = 0,7$ мм, $P = 83\ 300$ Н; δ — в сечении $y = 0$: 1 — $h = 0,7$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 2 — $h = 0,7$ мм, $P = 122\ 157$ Н; 3 — $h = 3$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 4 — $h = 3$ мм, $P = 122\ 157$ Н; $\Delta = 0,00035$, $\mu = 0,3$ (кривые 1–4)

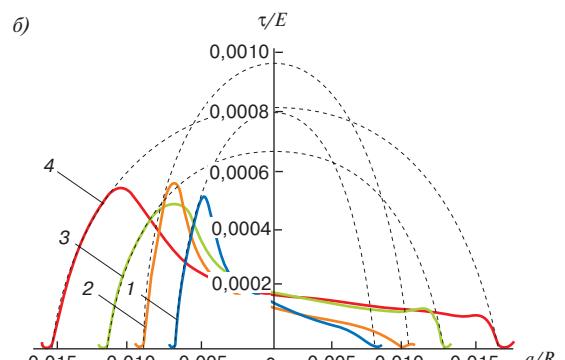


Fig. 4. Distribution of shear stress:
 a — in the contact area $h = 0.7$ mm, $P = 83\ 300$ N; δ — in section $y = 0$: 1 — $h = 0.7$ mm, $P = 83\ 300$ N; 2 — $h = 0.7$ мм, $P = 122\ 157$ Н; 3 — $h = 3$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 4 — $h = 3$ мм, $P = 122\ 157$ Н; $\Delta = 0,00035$, $\mu = 0,3$ (curves 1–4)

материала при циклически изменяющемся поле напряжений применяется макроскопический подход [7]. В качестве критерия накопления усталостных повреждений рассматривается величина амплитудных значений максимальных касательных напряжений $\Delta\tau_{\max}(z, t)$ (ось oz направлена вглубь рельса). Скорость накопления повреждений определяется из соотношения

$$\frac{\partial Q(z, t)}{\partial t} = c \left(\frac{\Delta\tau_{\max}(z, t)}{E} \right)^m, \quad (8)$$

где $Q(z, t)$ — распределение поврежденности вдоль оси oz в момент времени t ; E — модуль упругости материала; m и c — параметры, связанные с прочностными свойствами материала (определяются экспериментально). В результате обработки экспериментальных данных для материала сварного стыка [15] были получены значения $m = 1,684$, $c = 9,344825999 \cdot 10^{-23}$ [8].

На процесс накопления контактно-усталостных повреждений в основном материале влияет начальная поврежденность. Здесь для описания зависимости начальной поврежденности Q_0 от глубины используется следующее соотношение [8]:

$$\frac{Q_0(z)}{ct^*} = \alpha e^{-\beta z/R}, \quad (9)$$

где t^* — момент времени, в который достигается критическое значение поврежденности; α и β — параметры, характеризующие меру начальной поврежденности.

Функция (9) убывает по мере удаления от поверхности.

С учетом вероятностного распределения нагрузки на колеса (рис. 2) расчет функции накопленной поврежденности проводится по формуле

$$\frac{Q}{cN} = \sum_i \left[\left(\frac{\tau_{\max}^i}{E} \right)^m p_{ri} \right] + \frac{Q_0}{cN}, \quad p_{ri} \in (0, 1), \quad (10)$$

где p_{ri} — вероятность реализации нагрузки из рассмотренного диапазона (рис. 2); N — число циклов нагружения.

Расчет функции накопленной поврежденности проводился для момента времени $t = t^*$, $m = 1,684$ и разных значений параметров α и β из (9) [8]. Безразмерная глубина рассматриваемой точки упругого полупространства описывается величиной z/R , где $R = 450$ мм — радиус колеса. Результаты представлены на рис. 6–8. Кривая 1 на данных рисунках получена для относительно малой глубины седлообразного дефекта, а кривая 2 — для относительно большой. В первом случае размер пятна контакта меньше, следовательно больше максимальные значения напряжений в приповерхностном слое, вглубь они быстро убывают.

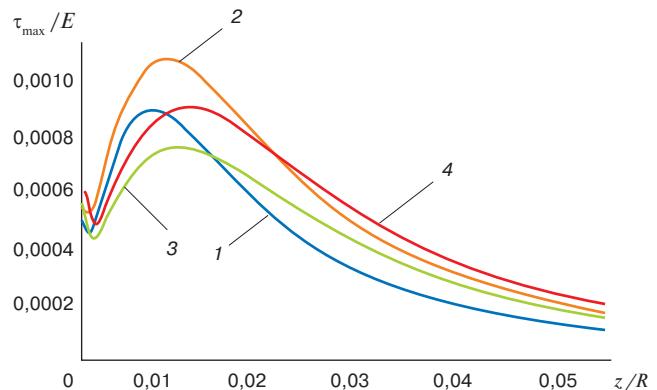


Рис. 5. Зависимость максимальных касательных напряжений от координаты z в безразмерном виде в сечении $y = 0$:
1 — $h = 0,7$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 2 — $h = 0,7$ мм, $P = 122\ 157$ Н;
3 — $h = 3$ мм, $P = 83\ 300$ Н; 4 — $h = 3$ мм, $P = 122\ 157$ Н;
 $\Delta = 0,00035$, $\mu = 0,3$ (кривые 1–4)

Fig. 5. Dependence of maximum shear stresses from coordinate z in dimensionless form in section $y = 0$:
1 — $h = 0,7$ mm, $P = 83\ 300$ N; 2 — $h = 0,7$ mm, $P = 122\ 157$ N;
3 — $h = 3$ mm, $P = 83\ 300$ N; 4 — $h = 3$ mm, $P = 122\ 157$ N;
 $\Delta = 0,00035$, $\mu = 0,3$ (curves 1–4)

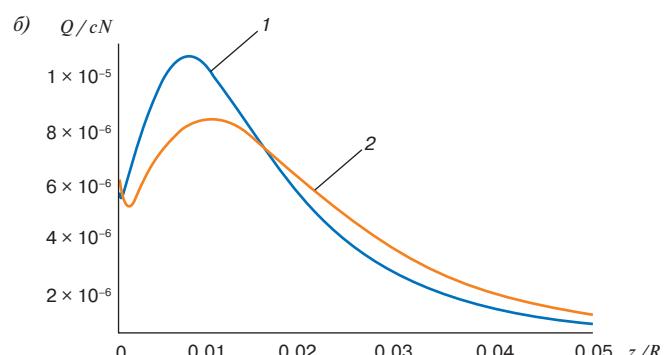
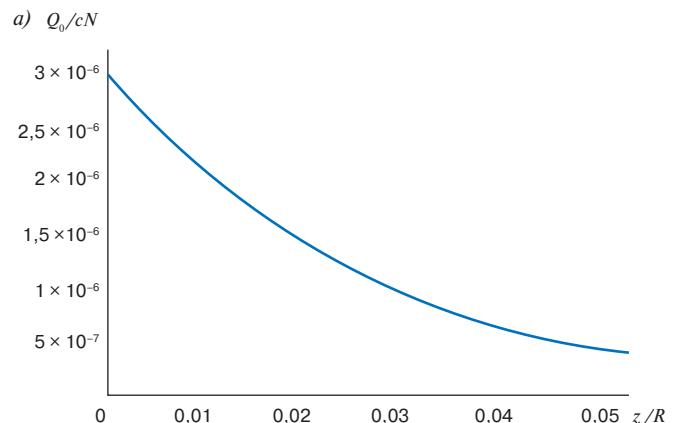


Рис. 6. Кривая начальной поврежденности (а) и кривые накопленной поврежденности (б) при $m = 1,684$, $\alpha = 3 \cdot 10^{-6}$, $\beta = 40$:
1 — $h = 0,7$ мм; 2 — $h = 3$ мм

Fig. 6. Initial damage curve (a) and accumulated damage curves (b) at $m = 1.684$,
 $\alpha = 3 \cdot 10^{-6}$, $\beta = 40$:
1 — $h = 0,7$ mm; 2 — $h = 3$ mm

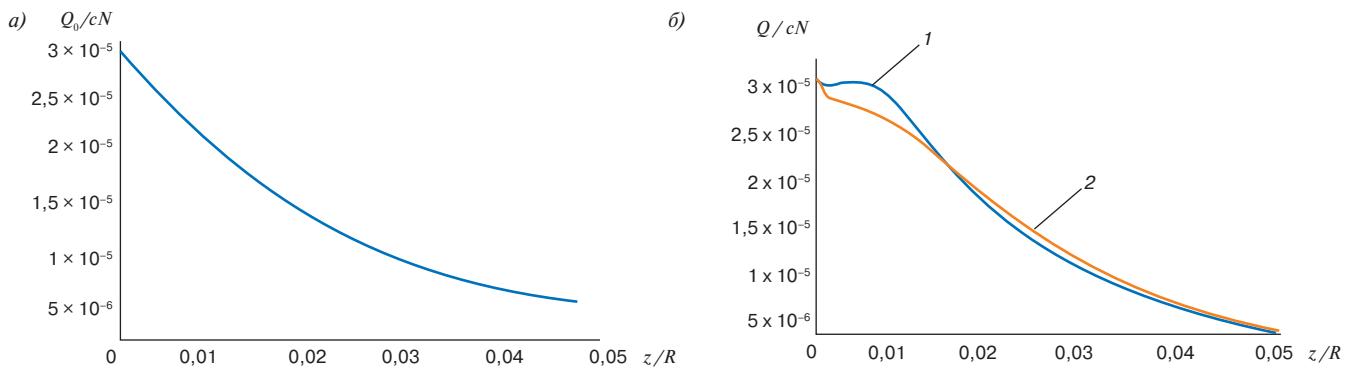


Рис. 7. Кривая начальной поврежденности (а) и кривые накопленной поврежденности (б) при $m = 1,684, \alpha = 3 \cdot 10^{-5}, \beta = 40$:
1 — $h = 0,7$ мм; 2 — $h = 3$ мм

Fig. 7. Initial damage curve (a) and accumulated damage curves (b) at $m = 1.684, \alpha = 3 \cdot 10^{-5}, \beta = 40$:
1 — $h = 0.7$ mm; 2 — $h = 3$ mm

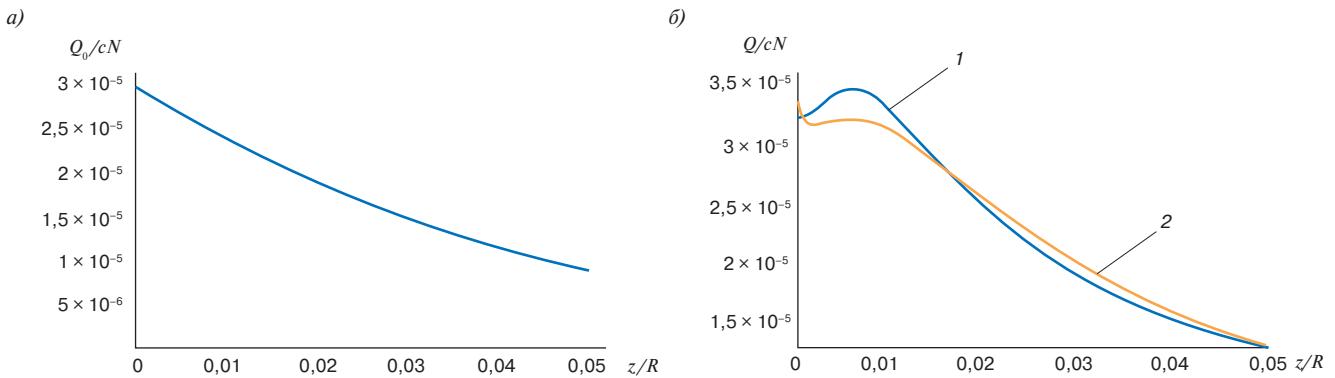


Рис. 8. Кривая начальной поврежденности (а) и кривые накопленной поврежденности (б) при $m = 1,684, \alpha = 3 \cdot 10^{-5}, \beta = 20$:
1 — $h = 0,7$ мм; 2 — $h = 3$ мм

Fig. 8. Initial damage curve (a) and accumulated damage curves (b) at $m = 1.684, \alpha = 3 \cdot 10^{-5}, \beta = 20$:
1 — $h = 0.7$ mm; 2 — $h = 3$ mm

Во втором случае из-за относительно большой площади контакта меньше концентрация напряжений, и они медленнее убывают с увеличением расстояния от поверхности. При этом начальная поврежденность в обоих случаях «сдвигает» максимум к поверхности (более заметно для кривой 2, поскольку в этом случае существенное ее вклад в суммарную поврежденность приповерхностных слоев). Следует отметить, что поврежденность, рассчитанная для рельса без неровности (и без связанных с ней дополнительной динамической нагрузки и начальной поврежденности) при других идентичных входных параметрах расчета, включая статистическое распределение нагрузки, составила (в единицах рис. 6–8) $1,49 \cdot 10^{-5}$ с локализацией $0,009z/R$. При этом расчете предполагалось, что точка первоначального касания колеса и рельса находится в центре дорожки катания рельса, т. е. полученное значение является максимально возможным (учет миграции точки первоначального касания приведет к уменьшению

максимального значения поврежденности и более равномерному ее распределению под дорожкой катания). Полученное значение больше максимальных значений кривых на рис. 6, но меньше аналогичных значений на рис. 7, 8. Из этих результатов следует вывод, что величина начальной поврежденности и глубина смятия определяют локализацию зоны зарождения усталостной трещины (на поверхности или под поверхностью).

Анализ полученных результатов. На образование контактно-усталостных трещин на поверхности катания наличие деформаций и смятий в зоне сварного стыка влияет следующим образом. Возникает дополнительная динамическая нагрузка, которая тем больше, чем больше глубина смятия. В то же время за счет спрямления поверхности головки рельса в результате деформации увеличивается площадь контакта и уменьшается концентрация напряжений, возникающих при контакте с колесом, причем чем глубже смятие, тем меньше концентрация напряжений.

Две эти тенденции работают в противоположном направлении, и в зависимости от глубины смятия, начальной поврежденности, характера нагружения может иметь место как ускорение, так и замедление процесса накопления контактно-усталостных повреждений.

С учетом того что области пониженной твердости располагаются на границах сопряжения зоны термического влияния сварного стыка с основным (цельнокатанным) металлом рельса по обе стороны на расстоянии около 70–100 мм друг от друга, при термообработке необходимо стремиться к минимизации данной области, поскольку размер пятна контакта в системе «колесо—рельс» кратно меньше. Исходя из этого, при уменьшении этих зон до размеров пятна контакта рельса и колеса образование местных импульсных неровностей будет исключено. В этой связи целесообразно рассмотреть вопрос отказа от отдельной локальной термической обработки рельсов после сварки и совмещение ускоренного охлаждения головок рельсов после сварки с общим процессом сварки, что также сможет значительно сократить протяженность зоны термического влияния. Однако следует учитывать, что данный подход на сети предполагает ограниченное применение в зависимости от условий эксплуатации.

С учетом уменьшения максимальных значений контактных напряжений увеличивается вклад в процесс разрушения по усталостному механизму предыдущей накопленной поврежденности, образовавшейся в приповерхностных слоях в результате смятия и последующего быстрого износа деформированного слоя. В рассмотренных случаях в зависимости от вида функции начальной поврежденности, определяемого процессом первоначального смятия, накопленная поврежденность может составлять от 44 до 140 % от поврежденности, накопленной в бездефектном материале рельса.

На усталостные явления в пере подошвы рельса характер распределения контактного давления влияет слабо, поскольку область контакта достаточно удалена от этих зон, но дополнительная динамическая нагрузка, обусловленная смятием, увеличивает максимальные значения напряжений и ускоряет процесс накопления повреждений.

Заключение. 1. Дефект (седловина) в зоне сварного стыка ухудшает динамику взаимодействия экипажа и пути, поскольку создается дополнительная динамическая нагрузка, влияющая на процесс накопления повреждений. В связи с этим подтверждается необходимость шлифования для восстановления геометрии стыка. При этом важно, чтобы прочностные характеристики и твердость материала рельса были малоизменяющимися по глубине для избежания ускоренного образования этого же дефекта после шлифования.

2. При термической обработке зоны сварного стыка необходимо стремиться к уменьшению ширины зоны пониженной твердости. Если дефект существенно меньше размера пятна контакта, он не приводит к перераспределению нагрузки (исходя из постулатов механики разрушения), т. е. дополнительная динамическая нагрузка не будет создаваться. Также при уменьшении этих зон до размеров пятна контакта рельса и колеса образование местных импульсных неровностей будет исключено. Для этого следует опровергнуть интенсификацию процесса нагрева при локальной термической обработке после сварки, а также проработать вопрос о возможности полного отказа от отдельной локальной термической обработки рельсов после сварки и совмещение ускоренного охлаждения головок рельсов после сварки с общим процессом сварки.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005.

Funding: the reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (RFBR), Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success" (Project No. 20-38-51005).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков / Е. А. Шур [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 4. С. 210–217 [Shur E. A., Fedin V. M., Borts A. I., Ronzhina Yu. V., Fimkin A. I. Methods of elimination of rails increased damage in the area of weld joints. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(4):210-217. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-210-217>.
- Burstow M. C. A model to predict and understand rolling contact fatigue in wheels and rails. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research, WCRR 2006*, 4–8 June 2006, Montreal, Canada. Montreal; 2006. P. 7.
- Trummer G., Marte C., Dietmaier P., Sommitsch C., Six K. Modeling surface rolling contact fatigue crack initiation taking severe plastic shear deformation into account. *Wear*. 2016;352-353:136-145. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.008>.
- Pun C. L., Welsby D., Mutton P., Yan W. Rolling contact fatigue life prediction for rails and welds in heavy haul systems. In: *Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference, IHHA 2017*, 2–6 September 2017, Cape Town, South Africa. New York: Curran Associates, Inc.; 2017. P. 56–63.
- Сакало В. И., Сакало А. В. Критерии для прогнозирования контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава и рельсах // Вестник Научно-

исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 3. С. 141–148 [Sakalo V. I., Sakalo A. V. Criteria for predicting the initiation of rolling contact fatigue damage in the railway wheels and rails. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(3):141-148. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-141-148>.

6. Коган А. Я. Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 3. С. 138–145 [Kogan A. Y. Evaluation of the intensity of lateral and vertical wear of rails under passing trains. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(3):138-145. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-138-145>.

7. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с. [Goryacheva I. G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya* [The mechanics of frictional interaction] Moscow: Nauka; 2001. 478 p. (In Russ.)].

8. Контактно-усталостные повреждения материала рельсов в области сварных стыков / Е. В. Торская [и др.] // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 5. С. 12–25 [Torskaya E. V., Goryacheva I. G., Muravieva T. I., Shcherbakova O. O., Tsukanov I. Yu., Meshcheryakova A. R., et al. Rolling contact fatigue damage in welded rail steel joints. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(5):12-25. (In Russ.)]. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_5_12.

9. Мещерякова А. Р., Щуканов И. Ю. Влияние смятия в зоне сварных стыков рельсового пути на контактное взаимодействие в системе «колесо — рельс» // Трение и износ. 2022. Т. 43, № 2. С. 192–201 [Meshcheryakova A. R., Tsukanov I. Yu. Influence of Flattening in the Zone of Welded Joints of a Railway on Contact Interaction in the Wheel—Rail System. *Journal of Friction and Wear*. 2022;43(2):192-201. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2022-43-2-192-201>.

10. Коссов В. С., Краснов О. Г., Акашев М. Г. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 1. С. 9–16 [Kossov V. S., Krasnov O. G., Akashov M. G. The impact of deformation in the zone of welded joints on the force action of the rolling stock on the track. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(1):9-16. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-9-16>.

11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. 12-е изд. М.: Юрайт, 2020. 480 с. [Gmurmam V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov* [The Probability Theory and Mathematical Statistics: textbook for universities]. 12th ed. Moscow: Urait; 2020. 480 p. (In Russ.)].

12. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1985. 452 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139171731>.

13. Carter F. W. On the action of a locomotive driving wheel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1926;112(760):151–157. <https://doi.org/10.1098/rspa.1926.0100>.

14. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / под ред. С. В. Вершинского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 360 с. [Vershinskij S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona: ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta* [Car dynamics: textbook for railway universities]. 3rd ed., upd. and rev. Moscow: Transport; 1991. 360 p. (In Russ.)].

15. Борц А. И., Долгих Л. В., Заграницек К. Л. Испытания рельсов на выносливость // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 2. С. 16–22 [Borts A. I., Dolgikh L. V., Zagranichek K. L. Ispytaniya rel'sov na vynoslivost' [Rail durability testing]. *Railway Track and Facilities*. 2013;2:16-22. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Владимировна ТОРСКАЯ,

д-р физ.-мат. наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник, лаборатория трибологии, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1), Author ID: 13427, <https://orcid.org/0000-0001-5654-7441>

Иван Юрьевич ЦУКАНОВ,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория трибологии, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1), Author ID: 721434, <https://orcid.org/0000-0001-9387-6818>

Альмира Рифовна МЕЩЕРЯКОВА,

канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, лаборатория трибологии, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН, 119526 Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1), Author ID: 963641, <https://orcid.org/0000-0002-5938-5633>

Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК,

заведующий лабораторией, НЦ «Рельсы, сварка и транспортное материаловедение», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

Сергей Михайлович ЗАХАРОВ,

д-р техн. наук, профессор, научный консультант, НЦ «Рельсы, сварка и транспортное материаловедение», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0002-5235-7816>

Евгений Августович ШУР,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, НЦ «Рельсы, сварка и транспортное материаловедение», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. TORSKAYA,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Tribology Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, 101, bldg. 1, Vernadskiy Ave.), Author ID: 13427, <https://orcid.org/0000-0001-5654-7441>

Ivan Yu. TSUKANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Tribology Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, 101, bldg. 1, Vernadskiy Ave.), Author ID: 721434, <https://orcid.org/0000-0001-9387-6818>

Almira R. MESHCHERYAKOVA,

Cand. Sci. (Phys. and Math.), Junior Researcher, Tribology Laboratory, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, 101, bldg. 1, Vernadskiy Ave.), Author ID: 963641, <https://orcid.org/0000-0002-5938-5633>

Konstantin L. ZAGRANICHEK,

Head of Laboratory, Rails, Welding and Transport Material Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

Sergey M. ZAKHAROV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Advisor, Rails, Welding and Transport Material Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0002-5235-7816>

Evgeniy A. SHUR,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Rails, Welding and Transport Material Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Елена Владимировна ТОРСКАЯ. Постановка задачи моделирования (15 %).

Иван Юрьевич ЦУКАНОВ. Моделирование дополнительной динамической нагрузки на неровности сварного стыка (25 %).

Альмира Рифовна МЕЩЕРЯКОВА. Моделирование процесса накопления контактно-усталостных повреждений (25 %).

Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК. Анализ и выбор исходных данных для моделирования (15 %).

Сергей Михайлович ЗАХАРОВ. Обзор и анализ состояния вопроса, анализ результатов моделирования (10 %).

Евгений Августович ШУР. Анализ результатов моделирования, выводы (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Elena V. TORSKAYA. Setting up a simulation problem (15 %).

Ivan Yu. TSUKANOV. A simulation of additional dynamic load on welded joint irregularities (25 %).

Almira R. MESHCHERYAKOVA. A simulation of contact fatigue damage accumulation (25 %).

Konstantin L. ZAGRANICHEK. An analysis and selection of initial simulation data (15 %).

Sergey M. ZAKHAROV. A review of the issue and an analysis of the simulation results (10 %).

Evgeniy A. SHUR. An analysis of the simulation results, conclusions (10 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.10.2022, рецензия от первого рецензента получена 07.11.2022, рецензия от второго рецензента получена 17.11.2022, принята к публикации 09.12.2022.

The article was submitted 26.10.2022, first review received 07.11.2022, second review received 17.11.2022, accepted for publication 09.12.2022.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» ([Ural-Press , export@ural-press.ru](mailto:export@ural-press.ru)).