

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья
УДК 625.143:620.1:539.3
EDN: <https://elibrary.ru/euiibc>



Кривые контактной усталости рельсовой стали

В. И. Сакало, А. В. Сакало ✉

Брянский государственный технический университет (БГТУ),
Брянск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема контактно-усталостных повреждений рельсов приобрела особую актуальность в связи с ростом грузонапряженности железных дорог. Эффективным методом исследования влияния различных факторов на образование повреждений является метод математического моделирования динамики движения и процессов накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса. При моделировании процессов накопления повреждений используется кривая зависимости количества циклов нагружения колеса или расчетного сечения рельса до появления контактно-усталостных разрушений от значения выбранного критерия контактной усталости. Такая кривая может быть получена только экспериментальным путем.

Материалы и методы. Проведены стендовые испытания на контактную усталость образцов из рельсовой стали в форме роликов. Установка для испытаний оригинальной конструкции позволяла создавать нагрузку на ролики до 4000 Н. Обработка опытных данных выполнена с помощью метода конечных элементов. Задача перекачивания образца и контртела решалась в упругопластической постановке.

Результаты. Выполнено исследование влияния размеров и формы контактирующих поверхностей образцов для испытаний на контактную усталость на распределение контактных давлений. Сконструирована и изготовлена установка для испытаний на контактную усталость по схеме качения ролика по ролику. Проведены испытания образцов из рельсовой стали на контактную усталость. Обработка результатов выполнена с помощью метода конечных элементов, построены кривые контактной усталости рельсовой стали по трем критериям: комбинированному, критерию Данг Вана, амплитудному значению максимального касательного напряжения.

Обсуждение и заключение. В результате применения разработанного методического подхода были получены кривые контактной усталости рельсовой стали. Кривые могут быть использованы в моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса при различных нагрузках на ось, динамических нагрузках, возникающих при движении подвижного состава в кривых и прямых участках пути, различных профилях катания колес и рельсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовая сталь, контактная усталость, образцы для испытаний на контактную усталость, установка для испытаний на контактную усталость, критерии контактной усталости, моделирование накопления контактно-усталостных повреждений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сакало В. И., Сакало А. В. Кривые контактной усталости рельсовой стали // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 2. С. 124–135.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143:620.1:539.3

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



Rail steel contact fatigue curves

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo✉

Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of contact fatigue damage of rails has become especially urgent with the intensified railway freight load. An effective method of studying various damage factors is mathematical simulation of the dynamics of motion and accumulation of contact fatigue damage in the rail material. The damage accumulation simulation uses a curve of dependence of the number of wheel loading cycles or design rail section until contact fatigue failure on the value of the selected contact fatigue criterion. This curve could only be obtained in an experiment.

Materials and methods. The authors performed bench-scale contact fatigue testing of roller-shape rail steel specimens. The test rig of original design created a load of up to 4000 N on the rollers. The experimental data were processed using the finite element method. The problem of rolling the specimen and the counterbody was solved in the elastoplastic formulation.

Results. The authors studied the effects of the size and shape of the contact surfaces for the contact fatigue test specimens on the distribution of contact pressures. They designed and built a roller-on-roller contact fatigue test rig. The researchers tested rail steel specimens for contact fatigue. The results were processed using the finite element method with the plotting of contact fatigue curves of rail steel according to three criteria: combined, Dang Van criterion, amplitude value of maximum shear stress.

Discussion and conclusion. The developed methodological approach yielded contact fatigue curves of rail steel. The curves may be used in simulations of the accumulation of contact fatigue damage in the rail material under different axle loads, dynamic loads arising when the rolling stock moves in curves and straight track sections with different rolling profiles of wheels and rails.

KEYWORDS: rail steel, contact fatigue, contact fatigue test specimens, contact fatigue test rig, contact fatigue criteria, contact fatigue damage accumulation simulation

FOR CITATION: Sakalo V.I., Sakalo A.V. Rail steel contact fatigue curves. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(2):124-135. (In Russ.).

Введение. Увеличение объема грузовых перевозок на отечественных магистралях приводит к интенсивному росту количества контактно-усталостных повреждений рельсов. За период с 2019 по 2021 г. доля дефектов контактно-усталостного происхождения возросла с 48 до 55 % от общего числа дефектов [1]. Для решения проблемы прогнозирования контактно-усталостной долговечности рельсов разрабатываются методы моделирования возникновения контактно-усталостных повреждений рельсов на основе различных подходов и критериев контактной усталости [2, 3]. Одним из подходов является компьютерное моделирование накопления повреждений [4]. Для реализации этого подхода необходимы кривые зависимости контактно-усталостной долговечности (количества циклов переменных напряжений до образования выщербин) рельсовой стали от значения критерия, в качестве которого может использоваться максимальное контактное давление, амплитудное значение максимального касательного напряжения, критерий Данг Вана и другие. Кривые могут быть использованы для качественного сравнения сопротивления контактной усталости рельсов выпуска разных заводов, рельсов с разной структурой сталей (например, бейнитных и перлитных заэвтектоидных и др.). Для каждой марки стали усталостные кривые получаются путем испытания образцов. С использованием кривых контактной усталости расчет долговечности рельсов может быть выполнен для различных условий эксплуатации: при различных нагрузках на ось, в прямых и кривых участках пути, при различных профилях поверхностей катания колес и рельсов.

Целью настоящей работы является получение кривых контактной усталости рельсовой стали, необходимых для компьютерного моделирования процессов накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах. В ходе исследования решались следующие задачи: выбор формы и размеров образцов, разработка установки для испытаний на контактную усталость, проведение испытаний на контактную усталость образцов, обработка результатов испытаний и построение кривых контактной усталости рельсовой стали.

Методика исследования. Как правило, в лабораторных условиях для испытаний образцов на контактную усталость используются машины трения, позволяющие реализовать схему качения ролика по ролику. В [5] приведены результаты испытаний с образцами типа роликов диаметром 30 мм и толщиной 8 мм. Образец из бандажной стали имел цилиндрическую форму, образец из рельсовой стали — торообразную, описанную радиусом 25 мм (рис. 1). В средней части образца из рельсовой стали поверхность катания цилиндрическая шириной 4 мм. Пару контактирующих

образцов составляли: один из бандажной стали, другой из рельсовой. Каждый из них имел индивидуальный привод, при этом продольное проскальзывание в контакте составляло 10 %. Испытания проводились на девяти уровнях нагрузки на образцы, при которых максимальное давление в контакте варьировалось от 496 до 1570 МПа. На поверхности образцов подавалось легкое минеральное масло. Испытания продолжались до появления на поверхностях образцов контактно-усталостных трещин.

В [6] приведены результаты экспериментальных исследований контактной усталости рельсовой стали с целью определения влияния остаточных напряжений на ее долговечность. Испытания проводились на высокоскоростной установке, позволяющей моделировать шелинг поверхностей катания. Диаметры образцов: колесной стали — 500 мм, рельсовой стали — 350 мм. Профили поверхностей катания назначались такими, чтобы контакт был подобен контакту колеса и рельса на линиях высокоскоростной сети железных дорог «Синкансэн» (Япония). Испытания проводились на трех уровнях нагрузки на ролики: 13,7; 15,6 и 31 кН, которые соответствовали нагрузкам для натуральных условий 75, 85 и 170 кН. Моделировалось движение экипажа со скоростью 200 км/ч. В контакте создавалась продольная касательная сила, равная по величине 0,02 от нормальной нагрузки на модель колеса. В качестве лубриканта использовалась вода. Остаточные напряжения в образце из рельсовой стали определялись после испытания на контактную усталость с вырезанием фрагментов образца на середине ширины поверхности катания и измерением их деформации, соответствующей релаксации напряжений во фрагменте.

В [7] описаны испытания с образцом, отличающимся по форме от ранее рассмотренных. Образец представлял собой кольцо диаметром 30 мм с диаметром внутренней поверхности 16 мм и толщиной 12,7 мм. Поверхность катания образца — плоская торцевая. Нижний образец фиксировался в корпусе установки с горизонтальным расположением торцевой поверхности. На него устанавливалась обойма с шариками диаметром 3,69 мм. На шарики опирался верхний образец, закрепленный на валу, по вертикальной осевой линии которого прикладывалась нагрузка. Испытания велись при скорости вращения вала 1840 об/мин на шести уровнях нагрузки, при которых максимальные контактные давления были равны 2165, 2434, 2724, 3117, 3434 и 5696 МПа. В качестве лубриканта, подаваемого на поверхности катания, использовалось минеральное масло. Для отключения установки и таймера при возникновении заданного уровня вибраций использовался виброметр. Повышенные вибрации свидетельствовали о появлении повреждений

на поверхности образца. Такого же типа образец для испытания рельсовой стали на контактную усталость применялся в [8]. Плоские образцы в виде колец были вырезаны из слоя рельсовой стали, максимально приближенного к поверхности катания. Образец имел диаметр наружной поверхности 26 мм и толщину 6 мм. Испытания проводились на установке следующего устройства. В центральной части установки расположен электродвигатель с зубчатым колесом с вертикально ориентированной осевой линией. Зубчатое колесо входит в зацепление с девятью шестернями, установленными в подшипниковых узлах, расположенных в окружном направлении вокруг зубчатого колеса. Испытываемый образец устанавливается на валу шестерни. На него опираются 4 шарика диаметром 4,8 мм из подшипниковой стали ШХ15, расположенные в обойме. Сверху на обойму с шариками укладывается шайба, через которую прикладывается нагрузка. Установка позволяет испытывать одновременно 9 образцов. Скорость вращения вала с зубчатым колесом составляет 4250 об/мин.

В [9, 10] приведены результаты испытаний перлитных и бейнитных сталей на контактную усталость. Образцы выполнялись из двух марок рельсовой перлитной стали и четырех марок бейнитной стали. Использовалась машина трения типа Амслер в режиме контакта диска с диском. Машина типа Амслер в этом режиме обеспечивает нагрузку на образцы до 2000 Н. Для приложения более высоких нагрузок тензометрическая пружина заменялась на пружину с большей жесткостью, что обеспечило проведение испытаний с нагрузками от 700 до 5000 Н. Использовались цилиндрические образцы диаметром 35 мм, толщиной 10 мм с фасками. Ширина поверхности катания составляла 4 мм. Для периодического определения деформаций сдвига точек подконтактного слоя, обусловленных пластическими деформациями, без разрезания образцов один из них выполнялся составным из двух одинаковых частей (рис. 2). На стыкуемых поверхностях составного образца наносилась сетка с размещением 50 линий на 1 мм. Две половины составного образца плотно скреплялись тремя болтами. Периодически испытания прерывались и замерялись перемещения внедрений точек с помощью микроскопа с увеличением $400\times$.

С использованием результатов испытаний авторами приведенных выше работ получены кривые контактной усталости рельсовых сталей в виде зависимости количества циклов нагрузки до появления контактно-усталостных повреждений от максимального контактного давления. Критерий контактной прочности — максимальное контактное давление —

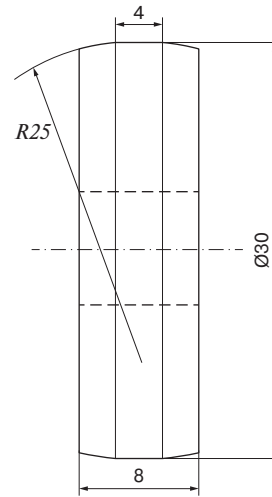


Рис. 1. Образец из рельсовой стали [5]

Fig. 1. Rail steel specimen [5]

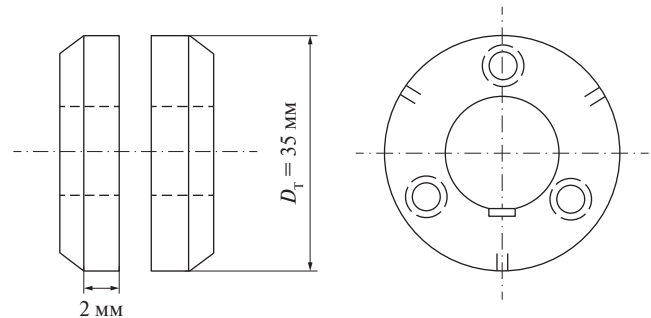


Рис. 2. Составной образец [9, 10]

Fig. 2. Composite rail steel specimen [9, 10]

используется в расчетах на контактную усталость, хотя он не позволяет учесть такой фактор, как наличие касательной силы в контакте. Напряженное состояние в подконтактном слое материала может оцениваться лишь косвенным образом.

В настоящей работе решаются задачи проведения испытаний рельсовой стали на контактную усталость и с использованием их результатов получения кривых контактной усталости в зависимости от критериев, которые позволяют учесть в том или ином виде компоненты трехосного напряженного состояния в точках подконтактного слоя.

Выбор формы образцов для испытания на контактную усталость. В рекомендациях Р-50-54-30-87 «Методы испытаний на контактную усталость»¹ приведен обширный перечень геометрических форм образцов и контртел. Из них в испытаниях на контактную усталость рельсовых сталей нашли применение:

¹ Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. Рекомендации Р-50-54-30-87: утв. приказом ВНИИИНАШ от 08.12.1987 № 379. М., 1988. 122 с.

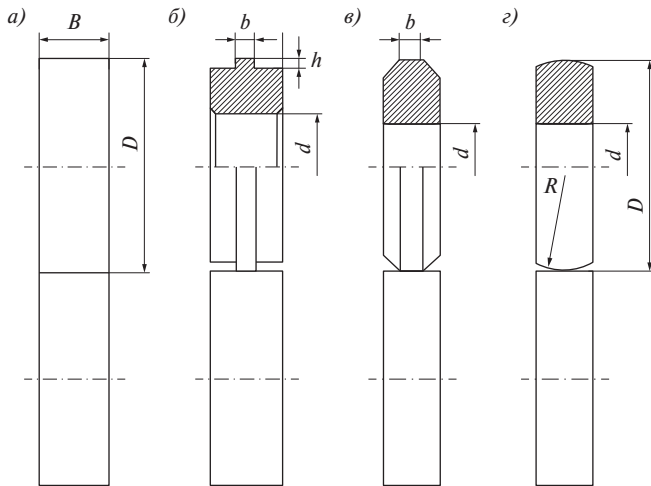


Рис. 3. Геометрические формы образцов для испытания на контактную усталость:
 а — цилиндрические; б — с буртиком; в — с фасками;
 г — с тороидальной поверхностью

Fig. 3. Geometric shapes of specimens for rolling contact fatigue testing:
 a — cylindrical; б — with flange; в — with chamfers;
 г — with toroidal surface

цилиндр с цилиндром, тороид с цилиндром, шар с плоской плитой.

Планирование испытаний на контактную усталость начинается с выбора размеров испытываемых образцов и формы их контактирующих поверхностей. Важным аспектом является необходимость соблюсти баланс: получить большое давление в контакте при относительно небольшой нагрузке на ролики. С помощью метода конечных элементов авторами исследовано влияние формы контактирующих поверхностей роликов на максимальное давление в контакте [11].

К образцам, используемым для испытаний на контактную усталость, предъявляются два основных требования: постоянство распределения давлений по длине контакта, сохранение геометрии поверхностей катания в ходе испытаний. К выполнению этих требований близки ролики цилиндрической формы (рис. 3, а). Для них под длиной контакта понимается размер полосы контакта по образующей цилиндра, а под шириной — размер полосы по направлению качения.

Эпюра распределения давлений в контакте роликов диаметром $D = 40$ мм и толщиной $B = 8$ мм при приложенной к ним нагрузке P , равной 880 Н, и максимальном давлении $p_0 = 1000$ МПа приведена на рис. 4, а. Она получена при решении в упругой постановке. Лишь вблизи торцевых плоскостей образца на небольших участках наблюдается снижение давлений. Это объясняется тем, что в центральной части образца напряженное состояние — плоская деформация, а у торцов — плоское напряженное состояние.

Для получения максимального давления около 2000 МПа погонная нагрузка на образцы должна быть

равной 1146 кН/м. При толщине образца 8 мм необходимо приложить нагрузку 9,168 кН. Для проведения таких испытаний необходима установка с максимальной нагрузкой около 10 кН, в то время как установки для испытания на контактную усталость в режиме диск — диск обеспечивают приложение наибольшей нагрузки 2 кН.

Если образец имеет толщину $B = 3$ мм, то при приложении нагрузки 880 Н погонная нагрузка должна составлять 293 кН/м, а максимальное условное герцевское давление — 3200 МПа. Материал подконтактного слоя при этом пластически деформируется. Поэтому решение выполнено в упругопластической постановке и получено распределение давлений, показанное на рис. 4, б. По всей длине контакта они распределены неравномерно.

С целью уменьшения нагрузки на образцы уменьшают ширину поверхности катания за счет выполнения буртиков шириной b и высотой h (рис. 3, б).

В [12] использованы образцы с буртиком с размерами $D = 60$ мм, $B = 10$ мм, $h = 1,5$ мм, $b = 1,5$ мм, в [13] — с размерами $D = 60$ мм, $B = 20$ мм, $b = 5$ мм, $h = 3$ мм. Здесь было выполнено решение контактной задачи для образца диаметром $D = 40$ мм с буртиком размерами $b = 3$ мм, $h = 3$ мм при нагрузках $P = 880$ Н и $P = 3600$ Н. При небольшой нагрузке, равной 880 Н, не вызывающей пластических деформаций в подконтактном слое, давления близки к постоянным по длине контакта (рис. 4, в). При большой нагрузке $P = 3600$ Н для получения максимального давления хотя бы 1420 МПа, вызывающей пластические деформации, распределение давлений (рис. 4, г) еще более неравномерное, чем для образца толщиной $B = 3$ мм без буртика (рис. 4, б).

Уменьшение ширины поверхности катания образца достигается также снятием фасок (рис. 3, в). Составные образцы с шириной поверхности катания 4 мм использованы в [9, 10]. Фаски сняты под углом 45° . Распределения давлений по полосе контакта для образцов с фасками, снятыми под углами 30 и 45° , при нагрузках $P = 1000$ Н и максимальном давлении 1000 МПа показаны на рис. 4, д, е. Они слабо зависят от угла наклона фаски и характеризуются явно выраженными краевыми эффектами по концам полосы контакта. Для всех приведенных вариантов максимальное давление принималось равным давлению на середине длины полосы контакта.

В [14, 15] в качестве контртел использованы ролики диаметром 40 мм, изготовленные из твердого сплава ВК8 (рис. 3, г). Они имеют тороидальную поверхность катания, описанную радиусом 18 мм. В процессе испытаний такие ролики прокатывают на образце желоб, по краям которого наблюдаются краевые эффекты.

Для проведения испытаний образцов из рельсовой стали на контактную усталость авторами выбрана схема качения ролика по ролику, представленная на рис. 3, в:

- первый образец — цилиндрический диаметром 40 мм с фасками, снятыми под углом 30°, толщина 8 мм, ширина дорожки катания 3 мм;

- второй образец — цилиндрическое контртело диаметром 40 мм, толщиной 8 мм.

Установка для испытания образцов на контактную усталость. Для испытания образцов на контактную усталость используются машины трения марок СМЦ-2, ИИ 5018, 2070 СМТ-1, которые в режиме диск—диск обеспечивают максимальное усилие сжатия образцов до 2000 Н, что недостаточно для создания нужного давления. Авторами была сконструирована установка для испытания образцов при нагрузках, достигающих 4000 Н [11].

Все узлы установки смонтированы на основании 8 (рис. 5). На нем установлен электродвигатель 1 мощностью 1,1 кВт со скоростью вращения 1000 об/мин, упругая муфта 2, вал 3, опирающийся на корпусные шарикоподшипники 4 и 5, установленные на плите 10. На консольную часть вала насаживается образец 12. Для надежной фиксации образца на валу его консольная часть выполнена конической. Образец 12 с конической посадочной поверхностью насаживается затяжкой гайки. Между торцом образца и гайкой установлена тарельчатая пружина. Испытываемый образец диаметром 40 мм с фасками, снятыми под углом 30°, имеет ширину дорожки катания 3 мм.

Второй образец (цилиндрическое контртело) диаметром 40 мм насажен на вал с двумя подшипниками и установлен в каретке 6. На каретку опирается рычаг 7, один конец которого фиксируется в проушине 11, а ко второму присоединена тяга 14. Передаточное число рычага равно 6. Для приложения нагрузки к рычагу используется пружина 16, затяжка которой обеспечивается гайкой 18, насаженной на нарезную часть тяги 14. Жесткость пружины равна 30,5 Н/мм. Для измерения осадки пружины служит стержень 19 и шкала 15. Установка обеспечивает максимальную нагрузку на образцы 4000 Н при осадке пружины 22 мм. Общий вид установки показан на рис. 6.

В качестве лубриканта используется вода. На посадочные поверхности она подается фитильным методом. Количество циклов нагружения образцов определяется по времени испытаний. Испытания заканчиваются при появлении на поверхности образца выщербины размером 2...3 мм или при повышении уровня шума установки.

Результаты испытания образцов из рельсовой стали на контактную усталость. Испытания проведены на 6 уровнях нагрузки P на образцы: 780, 1140, 1396, 1602, 2838, 3450 Н. Максимальные контактные давления p_0 при этом составили 950, 1152, 1270, 1360, 1814, 2000 МПа

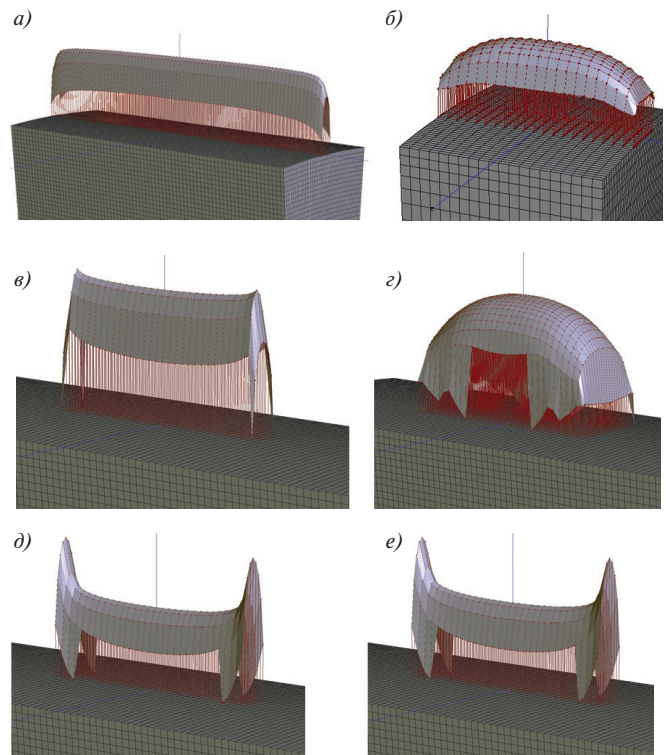


Рис. 4. Распределение давлений на поверхностях контакта образцов: а — цилиндрический образец, $D = 40$ мм, $B = 8$ мм, решение в упругой постановке, $P = 880$ Н, $p_0 = 1000$ МПа; б — цилиндрический образец, $D = 40$ мм, $B = 3$ мм, решение в упругопластической постановке, $P = 880$ Н, $p_0 = 1000$ МПа; в — образец с буртиком, $h = 3$ мм, $b = 3$ мм, решение в упругой постановке, $P = 880$ Н, $p_0 = 1000$ МПа; г — образец с буртиком, $h = 3$ мм, $b = 3$ мм, решение в упругопластической постановке, $P = 3600$ Н, $p_0 = 1420$ МПа; д — образец с фасками, снятыми под углами 30°, $b = 3$ мм, решение в упругой постановке, $P = 1000$ Н, $p_0 = 1000$ МПа; е — образец с фасками, снятыми под углами 45°, $b = 3$ мм, решение в упругой постановке, $P = 1000$ Н, $p_0 = 1000$ МПа

Fig. 4. Pressure distribution on the contact surfaces of specimens: а — cylindrical specimen, $D = 40$ mm, $B = 8$ mm, elastic solution, $P = 880$ N, $p_0 = 1000$ MPa; б — cylindrical specimen, $D = 40$ mm, $B = 3$ mm, elasto-plastic solution, $P = 880$ N, $p_0 = 1000$ MPa; в — specimen with flange, $h = 3$ mm, $b = 3$ mm, elastic solution, $P = 880$ N, $p_0 = 1000$ MPa; г — specimen with flange, $h = 3$ mm, $b = 3$ mm, elasto-plastic solution, $P = 3600$ N, $p_0 = 1420$ MPa; д — specimen with chamfers taken at an angle of 30°, $b = 3$ mm, elastic solution, $P = 1000$ N, $p_0 = 1000$ MPa; е — specimen with chamfers taken at an angle of 45°, $b = 3$ mm, elastic solution, $P = 1000$ N, $p_0 = 1000$ MPa

соответственно. Была проведена серия испытаний с подачей на поверхности катания образцов индустриального масла И-20А. Появления контактно-усталостных трещин на образцах при перечисленных нагрузках не обнаружено. Вторая серия испытаний проведена с подачей на поверхности воды. Образцы вырезаны из головки бывшего в эксплуатации рельса Р65 категории ДТ350 по ГОСТ Р 51685—2013². Торцевыми поверхностями они располагались перпендикулярно

² ГОСТ Р 51685—2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 95 с.

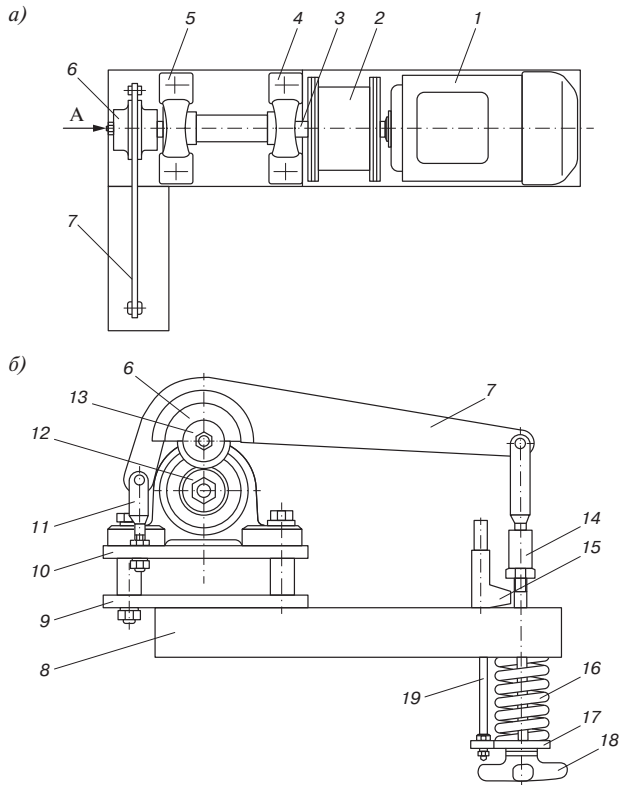


Рис. 5. Схема установки для испытания образцов на контактную усталость:

a — вид сверху; *б* — вид по А; 1 — электродвигатель; 2 — упругая муфта; 3 — вал; 4, 5 — корпусной подшипник; 6 — каретка; 7 — рычаг; 8 — основание; 9, 10 — плита; 11 — проушина; 12 — образец; 13 — контртело; 14 — тяга; 15 — шкала; 16 — пружина; 17 — чашка; 18 — гайка; 19 — стержень

Fig. 5. Scheme of the test rig for testing specimens for rolling contact fatigue:

a — view from above; *б* — view A; 1 — electric motor; 2 — elastic coupling; 3 — shaft; 4, 5 — bearing; 6 — carriage; 7 — lever arm; 8 — base; 9, 10 — plate; 11 — eye; 12 — specimen; 13 — counterbody; 14 — rod; 15 — scale; 16 — spring; 17 — bowl; 18 — nut; 19 — bar

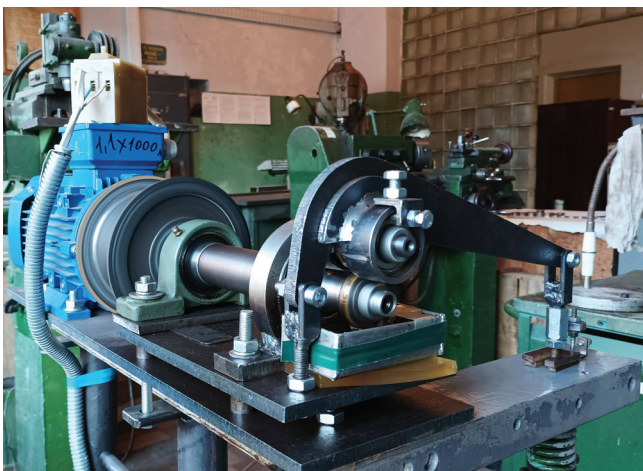


Рис. 6. Общий вид установки для испытания образцов на контактную усталость

Fig. 6. General view of the test rig for testing specimens for rolling contact fatigue

оси рельса. Образцы № 18 и 19 вырезаны из подконтактного слоя головки рельса с расположением торцевых поверхностей параллельно поверхности катания.

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Кроме нагрузок и максимальных расчетных давлений в ней представлено количество циклов до появления выщербины и ширина полосы контакта $2b$. Выщербины имели размеры: 2 мм по ширине поверхности катания образца, 3 мм в окружном направлении, глубину 0,15...0,28 мм. Вид образца с выщербиной показан на рис. 7.

Для образцов № 17 и 18, один из которых вырезан с расположением торцевой поверхности перпендикулярно оси рельса, а другой с расположением торцевой поверхности параллельно поверхности катания, получены близкие результаты по количеству циклов до появления выщербин.

Обработка результатов испытаний. Построение кривых контактной усталости. Для построения кривых контактной усталости выполнена обработка результатов испытаний с помощью метода конечных элементов. Цель обработки результатов испытаний — получение компонентов напряжений в подконтактной области образца с учетом остаточных напряжений при нагрузке, приложенной в испытаниях, и вычисление с их использованием значений трех критериев контактной прочности: амплитудного значения максимального касательного напряжения, Данг Вана и комбинированного. Для получения остаточных напряжений моделировалось качение образцов на длине пути качения, достаточной для получения участка, свободного от влияния краевых эффектов.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из рельсовой стали на контактную усталость

Table 1

Results of contact fatigue testing of rail steel specimens

№ образца	Нагрузка P , Н	Максимальное контактное давление p_0 , МПа	Ширина полосы контакта $2b$, мм	Число циклов нагружения $N \cdot 10^6$
12	3450	2000	0,732	1,055
13	2838	1814	0,664	1,135
14	1602	1360	0,500	1,830
15	1396	1270	0,466	1,880
17	1140	1152	0,420	1,970
18	1140	1152	0,420	1,830
19	780	950	0,348	3,030

Моделировалось перекачивание образца и контртела. Контактная задача качения решалась в упруго-пластической постановке. Для построения конечно-элементных моделей фрагментов образца и контртела использовалась плоская сетка. На рис. 8, *a* показана сетка для образца.

Сетка сгущена к поверхности контакта с целью более точного определения положения точки с наибольшим значением критерия контактной прочности. К краям контакта размеры элементов также уменьшены в связи со значительными градиентами напряжений в области краевых эффектов. Объемная конечно-элементная модель фрагмента образца получалась методом протягивания: плоская сетка поворачивалась вокруг оси образца на угол, соответствующий выбранному размеру конечного элемента, прилегающего к поверхности катания, по оси *z* (рис. 8, *б*). С использованием узлов плоской сетки, расположенных на ее двух соседних позициях, создавались восьмиузловые конечные элементы объемной конечно-элементной модели.

Размер конечно-элементной сетки по направлению качения образцов вдоль оси *z* выбран таким, чтобы длина моделируемого фрагмента равнялась сумме длин 54 конечных элементов, включая отступы по 7 элементов от торцов до первой и последней позиции, в которых к образцам прикладывались нагрузки, чтобы избежать влияния краевых эффектов. Длина пути качения с учетом отступов равнялась сумме длин 40 элементов с тем, чтобы после перекачивания роликов из позиции 1 в позицию 41 на середине пути в позиции 21 получить остаточные напряжения, свободные от краевых эффектов. Аналогично строилась конечно-элементная сетка фрагмента контртела. При этом обеспечивалось условие согласованности координат контактирующих узлов. Размер конечных элементов по направлению качения вдоль оси *z* принимался таким, чтобы на ширине контакта укладывалось 8–10 узлов.

Модели контртела и образца устанавливались в положение, при котором в начальный линейный контакт входили узлы сеток, занимающих первую позицию. К модели контртела прикладывалась нагрузка, при которой проводились испытания на контактную усталость, и решалась контактная задача в упругопластической постановке. Затем выполнялась процедура разгрузки, в результате которой вычислялись остаточные деформации и напряжения в образце. Для установки в следующую позицию модели поворачивались на угол, соответствующий размеру конечного элемента по оси *z*, вокруг своих осей. Повторялось нагружение моделей и решение контактной задачи с учетом остаточных деформаций, полученных на предыдущей позиции. Перекачивание осуществлялось до достижения позиции 41. В результате на всем протяжении пути качения



Рис. 7. Образец с контактно-усталостной выщербиной

Fig. 7. Specimen with contact fatigue crack

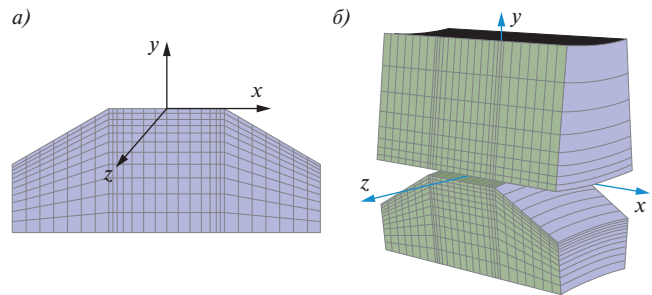


Рис. 8. Конечно-элементная модель:

- a* — плоская сетка для построения трехмерной модели образца;
- б* — трехмерные конечно-элементные модели образца и контртела

Fig. 8. Finite element model:

- a* — flat mesh for constructing a three-dimensional model of the specimen;
- б* — three-dimensional finite element models of the specimen and counterbody

от позиции 1 до позиции 41 получалось поле остаточных напряжений в образце.

После прокатывания модели помещались на середину пути качения в позицию 21, к ним прикладывалась такая же нагрузка, как и при моделировании перекачивания, и решалась контактная задача с учетом остаточных напряжений. Значения напряжений получались для каждого узла *i* плоской сетки для каждой ее позиции *j*. Для получения характеристик цикла напряжений использованы их значения в положениях сетки от позиции 11 до позиции 33.

Для определения значения критерия амплитудного значения максимального касательного напряжения τ_{\max}^a на первом проходе вычислялось максимальное касательное напряжение $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ для каждого узла *i* в позициях *j*.

Путем деления суммы вычисленных значений τ_{\max} на количество позиций *n* вычислялось среднее напряжение

$$\tau_{\max}^m = \sum \tau_{\max} / n. \quad (1)$$

Таблица 2

Значения критериев контактной усталости в зависимости от нагрузки на образцы

Table 2

Values of contact fatigue criteria depending on the load on the specimens

Нагрузка P , Н	3450	2838	1602	1396	1140	780
Напряжения по критерию амплитудного значения максимального касательно-го напряжения τ_{\max}^a , МПа	360	333	266	247	234	203
Напряжения по критерию Данг Вана τ_{DV} , МПа	193	188	128	120	136	116
Напряжения по комбинированному критерию σ_{RCF} , МПа	462	382	306	280	260	223

На втором проходе определялось амплитудное значение для всех позиций узла

$$\tau_{\max}^a = \tau_{\max} - \tau_{\max}^m \quad (2)$$

В качестве критерия τ_{\max}^a для узла принималось наибольшее из них.

Для определения значения критерия Данг Вана τ_{DV} [3] на первом проходе кроме τ_{\max} для узла i в позициях j определялось также гидростатическое напряжение $\sigma_h = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$. В качестве критерия принималось наибольшее значение величины

$$\tau_{DV} = \tau_{\max}^a + \alpha_{DV} \sigma_h \quad (3)$$

Значение коэффициента Данг Вана α_{DV} принималось равным 0,26 [16].

Для определения значений комбинированного критерия [17] для каждого узла i в позициях j определялись главные напряжения и значение эквивалентного напряжения:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + (1 - 2\nu) \sigma_h \quad (4)$$

Определялись максимальное и минимальное эквивалентные напряжения $\sigma_{eq}^{\max}, \sigma_{eq}^{\min}$, а также среднее $\sigma_{eq}^m = (\sigma_{eq}^{\max} + \sigma_{eq}^{\min})/2$

и амплитудное $\sigma_{eq}^a = (\sigma_{eq}^{\max} - \sigma_{eq}^{\min})/2$.

В качестве критерия для узла i принималось значение величины

$$\sigma_{RCF} = \psi_{\sigma} \sigma_{eq}^m + \sigma_{eq}^a \quad (5)$$

где ψ_{σ} — коэффициент, учитывающий асимметрию цикла эквивалентных напряжений.

Значения критериев контактной усталости приведены в табл. 2.

Для построения кривой контактной усталости использована зависимость

$$N = C \sigma_c^{-m} \quad (6)$$

где σ_c — выбранный критерий контактной прочности, характеризующий напряженное состояние в области контакта; N — число циклов переменных напряжений до появления выщербин усталостного характера; C, m — константы материала, определяемые экспериментально.

Константы материала C и m получены с помощью аппроксимации результатов, приведенных в табл. 2. Значения констант для трех критериев контактной усталости представлены в табл. 3.

Кривые контактной усталости представлены на рис. 9.

В качестве примера в программном комплексе «Универсальный механизм» с помощью модуля UM RCF Rail выполнено моделирование процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса Р65, уложенного в прямом участке пути, и для наружного рельса в кривой радиусом

Таблица 3

Значения констант материала рельсовой стали для трех критериев контактной усталости

Table 3

Values of rail steel constants for three contact fatigue criteria

Критерий контактной усталости	Константа материала в выражении для кривой контактной усталости (6)	
	C	m
Комбинированный критерий	$5,988 \cdot 10^9$	1,424
Критерий Данг Вана	$4,966 \cdot 10^9$	1,606
Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения	$3,333 \cdot 10^{10}$	1,767

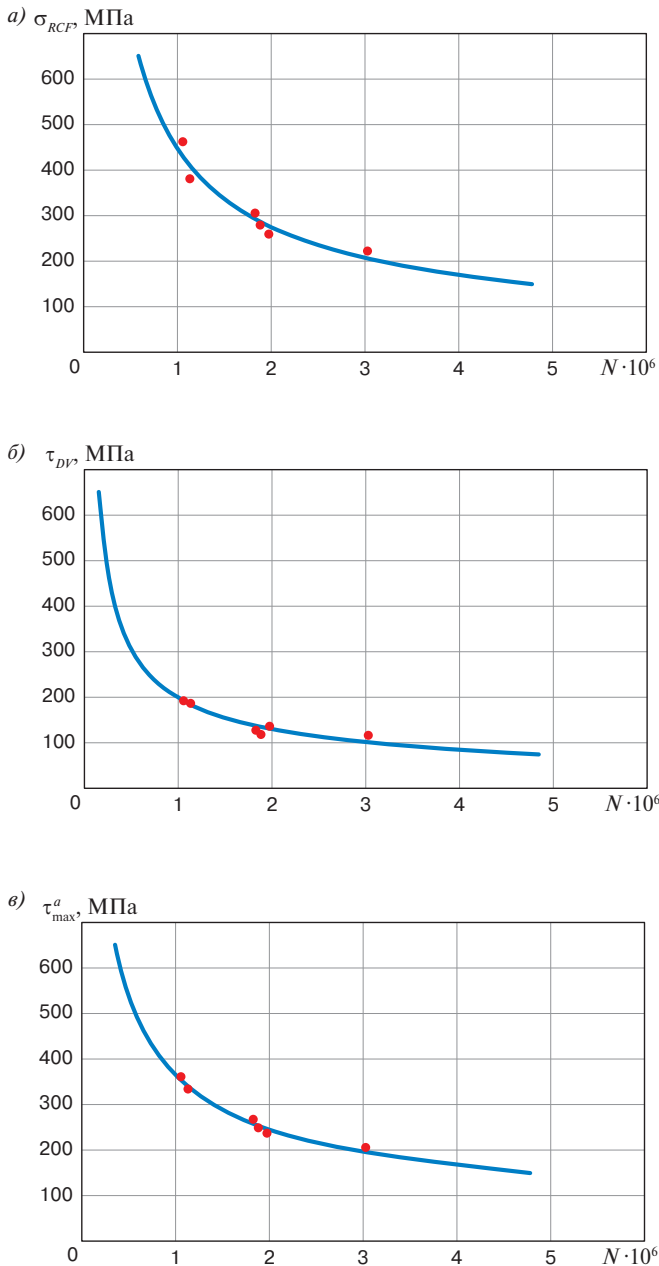


Рис. 9. Кривые контактной усталости, полученные с использованием критерия:
a — комбинированного; *b* — Данг Вана; *c* — амплитудного значения максимального касательного напряжения;
N — число циклов до разрушения; ● — эксперимент;
 — аппроксимация

Fig. 9. Contact fatigue curves obtained using the criterion:
a — combined; *b* — Dang Van; *c* — amplitude value of the maximum shear stress; *N* — number of cycles to failure;
 ● — experiment; — approximation

600 м. Результаты моделирования с использованием полученной кривой контактной усталости рельсовой стали для комбинированного критерия после пропущенного тоннажа 100 млн т показаны на рис. 10.

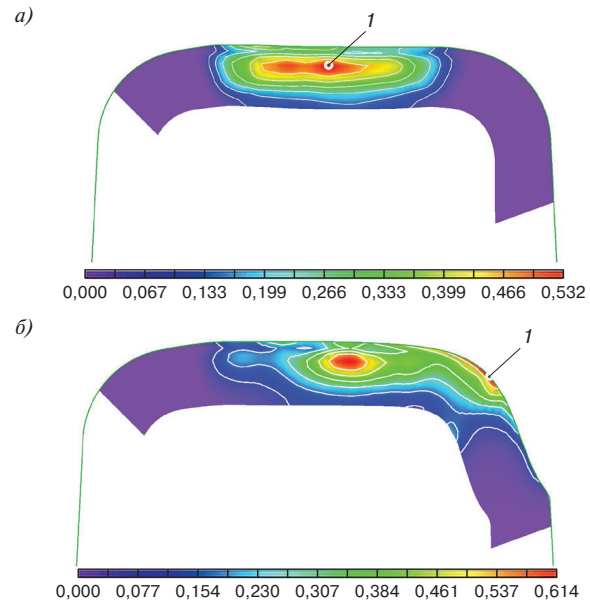


Рис. 10. Пример визуализации результатов моделирования с использованием кривой контактной усталости рельсовой стали для комбинированного критерия — изолинии накопленной поврежденности в поперечном сечении рельса R65 после пропущенного тоннажа 100 млн т:
a — рельс в прямом участке пути; *b* — наружный рельс в кривой радиусом 600 м; 1 — точка с максимальным значением накопленной поврежденности

Fig. 10. Example of visualisation of simulation results using a contact fatigue curve of rail steel for a combined criterion — isolines of accumulated damage in the cross section of the R65 rail after passing a tonnage of 100 million tons:
a — rail in straight track section; *b* — outer rail in curve with 600 m radius;
 1 — point with the maximum value of accumulated damage

Обсуждение и заключение. Рост грузонапряженности железных дорог страны за прошедшее двадцатилетие привел к увеличению количества дефектов контактно-усталостного происхождения, преимущественно это трещины и выкрашивание металла на поверхности катания рельса. Проблема контактно-усталостных повреждений поверхности катания головки приобрела особую актуальность. Эффективным методом исследования влияния таких факторов, как повышение нагрузок от колес на рельсы, скоростей движения железнодорожного транспорта, геометрии поверхностей катания колес и рельсов, является метод математического моделирования динамики движения и процессов накопления контактно-усталостных повреждений. При моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений используется кривая зависимости количества циклов нагружения колеса или расчетного сечения рельса до появления контактно-усталостных разрушений от значения выбранного критерия контактной усталости. Основное внимание авторов уделено получению параметров таких кривых для

рельсовой стали при использовании критериев контактной усталости: комбинированного, критерия Данг Вана, амплитудного значения максимального касательного напряжения.

Для получения кривых контактной усталости решались следующие задачи: исследование влияния геометрии образцов для испытания на контактную усталость на распределение контактных давлений; выбор формы образцов; разработка и изготовление установки для испытания на контактную усталость, позволяющей получать максимальные давления в контакте образцов, имеющих формы дисков, достигающие 2000 МПа; проведение испытаний, математическое моделирование процессов перекачивания образцов с решением контактных задач качения в упругопластической постановке; обработка результатов испытаний и математического моделирования, получение параметров кривых контактной усталости.

Исследование законов распределения давлений в контакте различных образцов с использованием конечно-элементных моделей показало, что лучшим вариантом является пара цилиндрических образцов, обеспечивающих сохранение геометрической формы поверхностей катания в процессе испытаний и постоянные давления по длине контакта, если отношение длины контакта к ширине близко к десяти. Однако для получения высоких максимальных давлений необходимо обеспечить приложение больших нагрузок на образцы. В образцах с буртиками при больших нагрузках пластические деформации охватывают буртик по всей высоте и ширине, следствием чего является сильно выраженная неравномерность давления по длине контакта. Образцы с фасками обеспечивают лучшее распределение давлений по длине контакта за исключением краевых эффектов на его краях. Для испытаний выбран образец диаметром 40 мм, толщиной 8 мм со снятыми под углом 30° фасками, с шириной поверхности катания 3 мм.

Для проведения испытаний разработана и изготовлена установка, обеспечивающая приложение нагрузки на образцы с получением максимальных контактных давлений до 2000 МПа. Установка характеризуется консольным расположением образца, с приложением к контртелу нагрузки с помощью рычага и динамометрической пружины, скоростью вращения образца 1000 об/мин, с фитильной подачей лубриканта на поверхность катания образца.

Проведены две серии испытаний с подачей на поверхности катания двух вариантов лубриканта: масла И-20А и воды. При подаче масла контактно-усталостных разрушений не наблюдалось. Это отмечалось и в работах других авторов. При подаче воды испытания проводились до появления выщербин на образце. При выбранной форме образца и цилиндрическом контртеле на краях поверхности катания, где

проявлялись краевые эффекты, появлялись микротрещины, однако они не приводили к образованию выщербин. Выщербины возникали на середине поверхности катания или вблизи нее. Это позволило сделать вывод о допустимости использования образцов с фасками.

При обработке результатов испытаний процесс перекачивания образцов моделировался с использованием конечно-элементных моделей. Контактные задачи качения решались в упругопластической постановке. Получены параметры кривых контактной усталости рельсовой стали с использованием трех критериев: комбинированного, критерия Данг Вана, амплитудного значения максимального касательного напряжения.

Полученные в работе кривые контактной усталости могут быть использованы в моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений в рельсовой стали для различных эксплуатационных условий: при различных нагрузках на ось, динамических нагрузках, возникающих при движении единицы подвижного состава в кривых и прямых участках пути, при различных профилях поверхностей катания колес и рельсов.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

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 ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бурков Д. Н., Ваганова О. Н. Актуальные проблемы рельсового хозяйства // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 8. С. 2–7.
Burkov D. N., Vaganova O. N. Actual problems of rail facilities. *Railway Track and Facilities*. 2022;(8):2-7. (In Russ.).
2. Захаров С. М., Торская Е. В. Подходы к моделированию возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 5. С. 259–268. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-259-268>.
Zakharov S. M., Torskaya E. V. Approaches to modeling occurrence of rolling contact fatigue damages in rails. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(5):259-268. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-259-268>.
3. Сакало В. И., Сакало А. В. Критерии для прогнозирования возникновения 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. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-141-148>.
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>.
4. Сакало В. И., Сакало А. В., Коссов В. С. Механика контактного взаимодействия колеса и рельса. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2021. 376 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/yjchir>.

Sakalo V. I., Sakalo A. V., Kossov V. S. *Mechanics of contact interaction of wheel and rail*. Moscow, Berlin: Direct-Media; 2021. 376 p. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/jychir>.

5. Akaoka J., Hirasawa K. Fatigue Phenomena under Rolling Contact Accompanied with Sliding. *Bulletin of JSME*. 1959;2(5):43-50. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.2.43>.

6. Ishida M., Abe N. Experimental study on rolling contact fatigue from the aspect of residual stress. *Wear*. 1996;191:65-71.

7. Liu C. R., Choi Y. Rolling contact fatigue life model incorporating residual stress scatter. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008;50(12):1572-1577. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2008.10.008>.

8. Борц А. И., Долгих Л. В., Заграничек К. Л. Испытания рельсов на выносливость // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 2. С. 16–22.

Borts A. I., Dolgikh L. V., Zagranichek K. L. Rail endurance testing. *Railway Track and Facilities*. 2013;(2):16-22. (In Russ.).

9. Clayton P., Su X. Surface initiated fatigue of pearlitic and bainitic steels under wear lubricated rolling/sliding contact. *Wear*. 1996;200:63-73.

10. Su X., Clayton P. Ratchetting strain experiments with a pearlitic steel under rolling/sliding contact. *Wear*. 1997;205:137-143.

11. Сакало В. И., Сакало А. В. Контактная усталость рельсовых и колесных сталей. Лабораторные испытания // Пятый научно-технический семинар «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ», Брянск, 4–6 октября 2022. Брянск: БГТУ, 2022. С. 99–102.

Sakalo V. I., Sakalo A. V. Contact fatigue of rail and wheel steels. Laboratory tests. In: *Fifth scientific and technical workshop "Computer simulation in railway transport: dynamics, strength, wear", 4–6 October 2022, Bryansk*. Bryansk, BG TU; 2022. p. 99–102. (In Russ.).

12. Ramalho A. Wear modelling in rail–wheel contact. *Wear*. 2015;330-331:524-532.

13. Zhao X., Wang Z., Wen Z., Wang H., Zeng D. The initiation of local rolling contact fatigue on railway wheels: An experimental study. *International Journal of Fatigue*. 2020;132:105354. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105354>.

14. Повышение стойкости вагонных колес в эксплуатации карбонитридным упрочнением стали / Л. М. Школьник [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1994. № 6. С. 40–44.

Shkolnik L. M., Markov D. P., Proydak Y. S., Prokhorenko I. M., Tsurenko V. N., Miroshnichenko N. G., Bondarenko L. I. Increasing the endurance of railway wheels in operation by carbonitride hardening of steel. *Russian Railway Science Journal*. 1994;(6):40-44. (In Russ.).

15. Марков Д. П. Повышение твердости колес подвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1995. № 3. С. 10–17.

Markov D. P. Improving the hardness of rolling stock wheels. *Russian Railway Science Journal*. 1995;(3):10-17. (In Russ.).

16. Dang Van K., Maitournam M. H. On some recent trends in modeling of contact fatigue and wear in rail. *Wear*. 2002;253(1-2):219-227. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00104-7).

17. Sakalo V., Sakalo A., Rodikov A., Tomashevskiy S. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion. *Wear*. 2019;432-433:102900. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.015>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович САКАЛО,

д-р техн. наук, профессор, кафедра наземных транспортно-технологических комплексов, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Алексей Владимирович САКАЛО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра наземных транспортно-технологических комплексов, Брянский государственный

технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Land Transport and Technological Complexes, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Alexey V. SAKALO,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Land Transport and Technological Complexes, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, проведение исследований по выбору размеров и формы контактирующих поверхностей роликов, конструирование установки для испытаний образцов на контактную усталость, проведение испытаний образцов из рельсовой стали на контактную усталость, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50%).

Алексей Владимирович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, проведение исследований по выбору размеров и формы контактирующих поверхностей роликов, разработка и программная реализация математических моделей, компьютерное моделирование, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, research on selection of size and shape of contacting surfaces of rollers, design of the specimen contact fatigue test rig, testing rail steel specimens for contact fatigue, evaluation of results, article editing and preparation (50%).

Alexey V. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, research on selection of size and shape of contacting surfaces of rollers, development and software implementation of mathematical models, computer simulation, evaluation of results, article editing and preparation (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 01.04.2024, рецензия от второго рецензента получена 18.04.2024, рецензия от третьего рецензента получена 22.04.2024, принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 28.03.2024, first review received 01.04.2024, second review received 18.04.2024, third review received 22.04.2024, accepted for publication 03.05.2024.